



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



# **Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zur Unterstützung des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting für Unternehmen**

vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

Dissertation von

**Julia Zeulner, M.Sc.**

Erstgutachterin: Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Clemens Rohde

Darmstadt 2023

---

---

**Julia Zeulner (geb. Fischer)**

**Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zur Unterstützung des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting für Unternehmen**

[Dissertation]

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung auf TUprints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-240775

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/24077>

Tag der Einreichung: 08. November 2022

Tag der Disputation: 18. April 2023



Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

---

---

## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand innerhalb meiner Anstellung als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft des Instituts IWAR an der Technischen Universität Darmstadt. Meiner Erstreferentin und Chefin, Frau Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek, bin ich für ihre fachliche Betreuung, ihre wertvollen Fragen und unsere stets konstruktiven und zielgerichteten Diskussionen zu großem Dank verpflichtet. Unsere produktive Zusammenarbeit sowie die direkte und ehrliche Kommunikation haben mich nachhaltig geprägt.

Auch danke ich meinem Zweitreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Clemens Rohde, welcher ohne Zögern und mit großem Interesse das Korreferat übernommen hat.

Einen großen Dank richte ich des Weiteren an meine Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft sowie an das Konsortium des Transferprojektes ArePron. Unser fachlicher und nicht fachlicher Austausch, eure Unterstützung sowie eure Motivation gaben mir in den letzten Jahren viel Auftrieb. Hierbei möchte ich vor allem Matthias Spielmann, Tobias Lohrey, Alessio Campitelli, Karoline Wowra und Steffi Weyand für eure Unterstützung und eure Freundschaft sowie Iris Kohler, Johannes Sossenheimer, Christian Dierks, Vanessa Zeller sowie Malte Vogelgesang für eure Hilfe, euer Feedback und eure Zeit danken.

Meine Eltern sowie mein Bruder geben mir seit jeher den größtmöglichen Rückhalt. Durch euch hatte ich den Mut und den Ehrgeiz, diesen Weg einzuschlagen. Ich danke euch, dass ihr immer für mich da seid.

Der größte Dank gilt meinen beiden Töchtern und insbesondere meinem Mann, Peter, der mich bestärkt, mir Raum geschaffen und mir mit seiner Liebe und seinem Pragmatismus enorm viel Ruhe und Zuversicht geschenkt hat. Ihr seid mein größtes Glück.

---

---

## Kurzfassung

Basierend auf dem Green Deal hat Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 festgesetzt (Bundesregierung 2021). Obwohl das verarbeitende Gewerbe 2019 für 15,5 % der national emittierten Treibhausgase (THG) verantwortlich war (UBA 2021b), existieren diesbezüglich keine direkten regulativen Vorgaben für den Industriezweig. Die politische Agenda weist lediglich das Zielbild der „Sauberen Produktion“ aus und nennt als Hauptansatzpunkte die Energieminderung und -effizienz (COM 2021). Für eine nachhaltige THG-Emissionsminderung auf Unternehmensebene bedarf es zunächst eines adäquaten Bilanzierungsvorgehens auf Prozessebene, um das THG-Inventar zu erfassen (Carbon Accounting). Der auf der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) (DIN EN ISO 14040:2020; DIN EN ISO 14044:2020) basierende Standard DIN EN ISO 14067:2019 für das Carbon Accounting von Produkten bietet als einziges Rahmenwerk die Möglichkeit, partielle Lebenswegabschnitte eines Produktlebenszyklus zu bilanzieren und somit die Produktion mit ihren Fertigungsprozessen als Hauptemittent abzubilden. Aufgrund des Stellenwertes von Zerspanungsprozessen innerhalb des verarbeitenden Gewerbes (Denkena et al. 2020), deren Umweltrelevanz, v. a. in Bezug auf den Energiebedarf (Panagiotopoulou et al. 2022), sowie dem Mangel einer adäquaten Bilanzierungsmethodik liegt der Forschungsschwerpunkt dieser Dissertation auf der Entwicklung eines lebenszyklus- und praxisorientierten Modellierungs- sowie Carbon Accounting Ansatzes des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen für Unternehmen.

Bei der lebenszyklusorientierten Systemmodellierung von Fertigungsprozessen ist ein detailliertes Systemverständnis grundlegend. Daher wurde zunächst die Zusammensetzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen analysiert. Neben dem Energiebedarfsanteil für die eigentliche Zerspanung ist dieser vor allem von der Konstruktion der Werkzeugmaschine in Form der installierten Aggregate (konstante und variable Verbrauchergruppen) sowie von den Betriebszuständen abhängig. Für ein ganzheitliches und verursachergerechtes LCA des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen müssen diese Aufwendungen disaggregiert in die Modellierung einfließen. Auf Basis zweier Inputmodelle (Kellens et al. 2012; Balogun und Mativenga 2013) wurde ein parametrisierter Ansatz zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs von Zerspanungsprozessen, der Extended Energy Modeling Approach (EEMA), entwickelt. Dieser beinhaltet als Hauptelemente Leistungskennwerte der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände. Der EEMA bildet die Berechnungsgrundlage für das LCA. Aufgrund der modellbasierten Parametrisierung liegt der Mehrwert einerseits darin, wiederverwendbare LCA-Datensätze für den Energiebedarf von Zerspanungsprozessen auf einer Werkzeugmaschine zu generieren. Andererseits können generische Datensätze abgeleitet werden, welche durch die Integration in konventionelle Datenbanken die LCA-Datenlandschaft nachhaltig verbessern können. Diese Verbindung des EEMA mit dem LCA begründet zudem den systematischen Verfahrensansatz unter Berücksichtigung der Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019, der für Unternehmen zur Unterstützung des prozessbezogenen Carbon Accounting entwickelt wird. Neben dessen Eignungsprüfung anhand der THG-Bilanzierung eines realen Zerspanungsprozesses werden weitere Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Methodiken im unternehmerischen Kontext vorgestellt sowie Grenzen des Ansatzes diskutiert.

Im Bereich des LCA bietet die entwickelte Methodik einerseits Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Verfügbarkeit praxisnaher Daten und steigert somit die Aussagekraft ermittelter Umweltwirkungen von produkt- und prozessbezogenen LCA-Studien. Andererseits hilft der entwickelte systematische Verfahrensansatz Unternehmen bei einem effizienten Carbon Accounting des Energiebedarfs ihrer Zerspanungsprozesse und schafft durch die hohe Transparenz die Grundlage, Treiber der prozessbedingten THG-Emissionen zu identifizieren und damit verbundene THG-Emissionen nachhaltig zu senken.

---

## Abstract

Based on the Green Deal, Germany has set the target of greenhouse gas neutrality by 2045 (Bundesregierung 2021). Although the manufacturing sector was responsible for 15.5 % of national greenhouse gas (GHG) emissions in 2019 (UBA 2021b), no direct regulatory requirements exist for the industrial sector. The political agenda merely proclaims the goal of "Cleaner Production" and mentions energy reduction and efficiency as the main objectives (COM 2021). For a sustainable GHG emission reduction at the corporate level, an adequate accounting procedure at the process level is needed to capture the GHG inventory (carbon accounting). The DIN EN ISO 14067:2019 standard for product carbon accounting based on the methodology of Life Cycle Assessment (LCA) (DIN EN ISO 14040:2020; DIN EN ISO 14044:2020) is the only framework that offers the possibility to account for partial life cycle stages of a product's life cycle. Thus, the standard enables to map the actual production with its manufacturing processes as the main issuer. Due to the importance of machining processes within the manufacturing industry (Denkena et al. 2020), their environmental relevance, especially concerning their energy demand (Panagiotopoulou et al. 2022), and the lack of an adequate accounting approach, the research focus of the dissertation is on the development of a life cycle- and practice-oriented modeling and carbon accounting approach of the energy demand of machining processes for manufacturing companies.

A detailed understanding of the system is fundamental in lifecycle-oriented system modeling of manufacturing processes. Thus, the composition of the energy demand of machining processes was analyzed first. In addition to the energy demand share for the cutting process, the total energy demand is primarily dependent on the design of the machine tool in the form of the installed aggregates (constant and variable consumer groups) as well as on the operating states. For a holistic and cause-related LCA of the energy demand of machining processes, these expenditures must be included within the modeling approach in a disaggregated manner. Based on two input models (Balogun und Mativenga 2013; Kellens et al. 2012b), a parameterized modeling approach for determining the total energy demand of machining processes, the Extended Energy Modeling Approach (EEMA), was developed. It includes as main elements power key values of the consumer groups depending on the operating states. The EEMA forms the calculation basis for the LCA. Due to the model-based parameterization, the added value lies on the one hand in generating reusable LCA datasets for the energy demand of machining processes on a machine tool. On the other hand, it is possible to derive generic datasets which can sustainably improve the LCA data landscape by integrating them into conventional databases. Furthermore, this linking of the EEMA with the LCA substantiates the systematic procedural approach for the life cycle- and practice-oriented carbon accounting considering the requirements according to DIN EN ISO 14067:2019, which is developed for companies to support process-related carbon accounting. In addition, a suitability test of the systematic procedural approach for the GHG balancing of a real-world machining process is conducted, further application possibilities of the developed methodologies in the corporate context are presented, and limitations of the methodological approaches are discussed.

In the field of LCA, the methodology offers the potential for improving the availability of practice-related data and thus increases the credibility of the identified environmental impacts of product- and process-related LCA studies. Furthermore, the systematic approach helps companies with an efficient carbon accounting of the energy demand of their machining processes and, due to the high level of transparency, creates the necessary basis for identifying the drivers of process-related GHG emissions and reducing related emissions sustainably.

---

# Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG .....	I
ABSTRACT .....	II
INHALTSVERZEICHNIS .....	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
TABELLENVERZEICHNIS.....	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	X
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	1
1.1.1 Politische Agenda und Auswirkungen auf das verarbeitende Gewerbe .....	1
1.1.2 Carbon Accounting und Life Cycle Assessment .....	3
1.1.3 Die Bedeutung von Zerspanungsprozessen und deren Energiebedarf .....	8
1.2 Problemstellung und Forschungsfrage .....	10
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	13
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND STAND DER WISSENSCHAFT .....</b>	<b>16</b>
2.1 Lebenszyklusorientiertes Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 .....	16
2.1.1 LCA als methodische Grundlage.....	17
2.1.1.1 Die vier Phasen des LCA .....	18
2.1.1.2 Prozessorientierte Modellierung .....	21
2.1.1.3 Modularisierung und Parametrisierung.....	22
2.1.2 Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019 an das Zielvorhaben .....	24
2.2 Zusammensetzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen.....	27
2.2.1 Charakterisierung unterschiedlicher Anteile .....	28
2.2.2 Definition des Gesamtenergiebedarfs und Einflüsse .....	29
2.2.3 Kategorisierung von Modellierungsansätzen anhand der Systemgrenzen .....	31
2.3 LCA von Zerspanungsprozessen .....	34
2.3.1 Analyse von LCI-Datensätzen etablierter Datenbanken .....	34
2.3.2 Analyse themenbezogener LCA-Studien .....	37
2.4 Ableitbare technologische und methodische Anforderungen .....	42
<b>3 METHODISCHES VORGEHEN .....</b>	<b>46</b>
<b>4 ERWEITERTER ENERGIEMODELLIERUNGSANSATZ – EEMA .....</b>	<b>52</b>
4.1 Grundlagenmodelle.....	52
4.2 Modulare und parametrisierte Energiebedarfsermittlung.....	55
4.2.1 Definition von Verbrauchergruppen .....	55

---

4.2.2	Definition von Betriebszuständen .....	57
4.3	Entwicklung des EEMA auf Basis von PKV .....	59
4.4	Validierung des EEMA .....	63
4.5	Empfehlungen zur Datenerfassung der PKV .....	68
5	VERBINDUNG DES EEMA MIT DEM LCA ALS GRUNDLAGE FÜR DEN CARBON ACCOUNTING ANSATZ.....	71
5.1	Integration des EEMA in das LCI.....	71
5.2	Potenziale für die Datenlandschaft im Bereich des LCA.....	75
5.2.1	Gegenüberstellung auf Basis des EEMA erzeugter und generischer LCI-Daten .....	75
5.2.2	Möglichkeiten zur Erzeugung generischer LCI-Datensätze.....	82
5.3	Systematischer Verfahrensansatz für das Carbon Accounting in Unternehmen.....	85
5.3.1	Verfahrensbeschreibung .....	86
5.3.2	Prüfverfahren zur Bestimmung der Datenqualität.....	100
6	MODELLVERSUCH DES CARBON ACCOUNTING ANSATZES .....	104
7	WEITERE UNTERNEHMENSINTERNE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN.....	119
7.1	Benchmarking und Vergleich des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen .....	119
7.2	Ableitung von Energieeffizienzindikatoren .....	122
7.3	Integration in den PDCA-Zyklus des Umweltmanagementsystems.....	125
8	DISKUSSION .....	128
9	FAZIT UND AUSBLICK .....	133
10	LITERATURVERZEICHNIS .....	137
	ANHANG .....	149
A.1	Gegenüberstellung etablierter Standards zur THG-Bilanzierung und THG-Berichterstattung .....	149
A.2	Erkenntnisse aus dem Transferprojekt „ArePron“ .....	153
A.3	LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in ecoinvent (v3.8) und GaBi (2019) .....	156
A.4	Literaturanalyse zum Thema "LCA von Zerspanungsprozessen" .....	160
A.5	Evaluation bestehender Energiemodellierungsansätze aus dem Maschinenbau .....	166
A.6	Ableitung typischer Verbrauchergruppen aus der Literatur .....	174
A.7	Gegenüberstellung von LCI-Daten: Auswahl an LCI-Daten etablierter LCA-Datenbanken .....	176

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: THG-Emissionen in Deutschland nach Sektoren des KSG von 1990 bis 2021 (eigene Darstellung nach UBA 2021b).....	2
Abbildung 2: Energieverbrauch nach Sektoren (1990 bis 2020) (links) sowie für das verarbeitende Gewerbe nach Energieträgern (2020) (rechts) in Deutschland (eigene Darstellung nach AGEB 2021).....	3
Abbildung 3: Gegenüberstellung des Untersuchungsrahmens von THG-Bilanzierungsmethoden. Links: GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard nach WRI und WBCSD (2004); rechts: Carbon Footprint für Produkte (CFP) nach DIN EN ISO 14067:2019 (eigene Darstellung)..	7
Abbildung 4: Ausweisung eines partiellen CFP auf Prozessebene nach DIN EN ISO 14067:2019 (eigene Darstellung) .....	8
Abbildung 5: Anteil der Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie, 2019 (eigene Darstellung in Anlehnung an VDW 2021) .....	9
Abbildung 6: Fertigungsverfahren nach DIN 8580-0:2003 mit Fokus auf Zerspanungsprozesse mit geometrisch bestimmten Schneiden (eigene Darstellung in Anlehnung an DIN 8580:2003) .....	9
Abbildung 7: Vordergrund- und Hintergrundsystem für eine generische Fertigungsprozesskette (eigene Darstellung) .....	20
Abbildung 8: Darstellung der Bilanzierungsgrenzen sowie der Untersuchungsobjekte „Zerspanungsprodukt“ und „Zerspanungsprozess“ (eigene Darstellung) .....	21
Abbildung 9: Gegenüberstellung der produktorientierten Blackbox-Modellierung zur prozessorientierten Whitebox-Modellierung (eigene Darstellung).....	22
Abbildung 10: Energiebedarfsanteil des Spanabtrags ( $x_{\text{span}}$ ) am TED ( $x$ ), grafisch dargestellt anhand eines Rechenbeispiels (eigene Darstellung) .....	31
Abbildung 11: Exemplarische Variation der Maschinenauslastung ( $z$ ): Auswirkungen auf den Energiebedarfsanteil des Spanabtrags am TED ( $x_{\text{span}}$ ) (eigene Darstellung).....	31
Abbildung 12: Dreigliedriges Kategorisierungssystem existierender Modellierungsansätze zur Ermittlung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs im Bereich Zerspanung (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 13: Überblick über das methodische Vorgehen und Verortung der Arbeitspakete (AP) innerhalb der Kapitelstruktur (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 14: Modell zur Abschätzung des elektrischen Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen nach Verbrauchergruppen bzw. Energiebedarfszuständen nach Balogun und Mativenga (2013) (übersetzt und angepasst).....	54
Abbildung 15: Darstellung eines synthetischen Lastganges einer spanenden Werkzeugmaschine (eigene Darstellung) .....	59
Abbildung 16: Gesamtleistungsverlauf der Messkampagne EMAG VLC 100Y (Baujahr 2014) vom 09.06.2020 inkl. Ausweisung der unterschiedlichen Betriebszustände (eigene Darstellung).....	66
Abbildung 17: Schematische Darstellung des abstrahierten Produktsystems zur Bilanzierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses innerhalb eines definierten Betriebszyklus basierend auf dem EEMA (eigene Darstellung).....	72
Abbildung 18: Gegenüberstellung der Werte zum Inputfluss „Strom“ unterschiedlicher LCI-Datensätze für Fallbeispiel 1 (links) und Fallbeispiel 2 (rechts) (eigene Darstellung) .....	79
Abbildung 19: Fallbeispiel – Auswirkungen auf den TED bei variierender Maschinenauslastung (eigene Darstellung) .....	84



---

Abbildung 20: Theoretischer Aufbau eines systematischen Verfahrensansatzes nach DIN EN ISO 14067:2019 (eigene Darstellung) .....	86
Abbildung 21: Ablaufplan des systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen (eigene Darstellung) .....	87
Abbildung 22: links: Horizontal-Bearbeitungszentrum Deckel Maho DMC 50H am Standort Prozesslernfabrik CiP der TU Darmstadt (Bild: Sybille Scheibner, PTW); rechts: Endprodukt des untersuchten Fräsprozesses – Zylinderboden eines Pneumatik-Kompaktzylinders (Bild: Julia Zeulner) .....	104
Abbildung 23: Ergebnisse der Sensitivitätsprüfung zur Maschinenauslastung bzw. zur jährlich produzierten Stückzahl (eigene Darstellung) .....	115
Abbildung 24: Integration des systematischen Verfahrensansatzes des Carbon Accountings des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen in den PDCA-Zyklus (eigene Darstellung) .....	126
Abbildung 25: Datenerfassungsarten aller Input- und Outputströme pro Zerspanungsprozess nach Ressourcenkategorien (in Anlehnung an Metternich et al. 2021).....	154

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modellierungsunterschiede der ecoinvent-Datensätze (v3.8) „chromium steel milling“ .....	35
Tabelle 2: Klassifizierung der Verbrauchergruppen entsprechend ausgewiesener Literaturquellen....	56
Tabelle 3: Betriebszustände für Werkzeugmaschinen nach Kellens et al. (2012b) (übersetzt).....	58
Tabelle 4: Betriebszustände in Anlehnung an ISO 14955-1:2018 und Eberspächer (2017) .....	58
Tabelle 5: Zuordnung aktiver Verbrauchergruppen zu den Betriebszuständen, Verknüpfung mit den Leistungsbedarfzuständen sowie Ausweisung der PKV .....	61
Tabelle 6: Zuordnung der erfassten Aggregate der EMAG VLC 100Y zu den Verbrauchergruppen und Ausweisung der Art der Leistungsbedarfsermittlung.....	65
Tabelle 7: Übersicht zu den PKV je Verbrauchergruppe in Abhängigkeit der Betriebszustände.....	66
Tabelle 8: Fehlerausweisung in Bezug auf den berechneten Energiebedarf pro Betriebszustand bzw. Gesamtenergiebedarf: relative Messabweichung sowie NRMSE (Messkampagne EMAG VLC 100Y).....	68
Tabelle 9: Dokumentation der relevanten Informationen für den EEMA .....	70
Tabelle 10: Fallbeispiel 1: Berechnung des $TED_p$ in Abhängigkeit der Maschinenauslastung, Messreihe – Deckel Maho DCM 50H.....	76
Tabelle 11: Fallbeispiel 2: Berechnung des $TED_p$ in Abhängigkeit der Maschinenauslastung, Messreihe – EMAG VLC 100Y, Transferprojekt ArePron.....	77
Tabelle 12: Fallbeispiel 1: Gegenüberstellung des Inputflusses „Strom“ der verschiedenen Datensätze .....	78
Tabelle 13: Fallbeispiel 2: Gegenüberstellung des Inputflusses „Strom“ der verschiedenen Datensätze .....	79
Tabelle 14: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [1] Basisinformationen .....	88
Tabelle 15: Identifizierung und Klassifizierung relevanter Verbrauchergruppen .....	89
Tabelle 16: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [2] Referenzsystem .....	89
Tabelle 17: Empfohlene Messdauer in Abhängigkeit der Betriebszustände (in Anlehnung an ISO 14955-3:2019) .....	90
Tabelle 18: Verbrauchergruppen und Möglichkeit zur jeweiligen Ermittlung des Leistungsbedarfs ....	91
Tabelle 19: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [3] Messplan.....	92
Tabelle 20: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [4] Leistungsmesskampagne .....	93
Tabelle 21: Standardzeitanteile für die Betriebszustände innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraum in Anlehnung an ISO 14955-3:2019 .....	94
Tabelle 22: Umlage der Standardzeitanteile auf den definierten zeitlichen Bezugsrahmen anhand eines fiktiven Beispiels .....	94
Tabelle 23: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [5] Leistungskennwerte .....	95
Tabelle 24: Optionen zur Bestimmung geeigneter Lebenszyklusdaten bzw. eines geeigneten EF zur Abbildung des Strombezugs (eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14067:2019) .....	96
Tabelle 25: Beispielhafte EF aus anerkannten Datenbanken/-quellen für den Strombezug innerhalb Deutschlands (Strommix) .....	97
Tabelle 26: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [6] THG-Emissionen.....	98

---

Tabelle 27: Beitragsanalyse: Rangbildung der THG-Emissionen auf Betriebszustandsebene .....	99
Tabelle 28: Beitragsanalyse: Rangbildung der THG-Emissionen auf Verbrauchergruppenebene.....	99
Tabelle 29: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [7] Ergebnisauswertung .....	100
Tabelle 30: Abfrage zur qualitativen Prüfung der Datenqualität.....	102
Tabelle 31: Dokumentation der Basisinformationen des Modellversuchs.....	105
Tabelle 32: Identifizierung und Klassifizierung relevanter Verbrauchergruppen der Deckel Maho DMC 50H .....	106
Tabelle 33: Betriebszustände des Referenzsystems der Deckel Maho DMC 50H.....	106
Tabelle 34: Geplante Messdauer und Anzahl der Durchläufe pro Betriebszustand innerhalb des Modellversuchs .....	107
Tabelle 35: Ermittlung des Leistungsbedarfs nach Verbrauchergruppen innerhalb des Modellversuchs .....	107
Tabelle 36: Ermittelte PKV je Verbrauchergruppe und Betriebszustand innerhalb des Modellversuchs inkl. Ausweisung der jeweiligen Messdauer und der Anzahl valider Durchläufe.....	109
Tabelle 37: Fiktives Fallbeispiel zur Berechnung eines repräsentativen $TED_p$ basierend auf den PKV der Deckel Maho DCM 50H .....	110
Tabelle 38: Fehlerausweisung im Modellversuch mittels der relativen Messabweichung und dem NRMSE.....	111
Tabelle 39: Disaggregierte THG-Emissionen des fiktiven Fallbeispiels nach Betriebszuständen .....	112
Tabelle 40: Disaggregierte THG-Emissionen des fiktiven Fallbeispiels nach Verbrauchergruppen.....	112
Tabelle 41: Beitrags- und Einflussanalyse des fiktiven Fallbeispiels auf Betriebszustandsebene .....	113
Tabelle 42: Beitrags- und Einflussanalyse des fiktiven Fallbeispiels auf Verbrauchergruppenebene .	114
Tabelle 43: Einflussanalyse des fiktiven Fallbeispiels auf Verbrauchergruppenebene in Abhängigkeit der Betriebszustände.....	114
Tabelle 44: Abfrage zur qualitativen Prüfung der Datenqualität innerhalb des Modellversuchs .....	116
Tabelle 45: Energieeffizienzindikatoren und deren Dokumentation .....	124
Tabelle 46: Gegenüberstellung etablierter THG-Bilanzierungs-Standards .....	149
Tabelle 47: Relevante Ressourcenkategorien und Stoffströme des LCA der Zerspanungsprozesse im Transferprojekt ArePron innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“ .....	155
Tabelle 48: LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in ecoinvent (v3.8, cut-off) .....	156
Tabelle 49: LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in GaBi (2019) .....	159
Tabelle 50: Ergebnisdarstellung der Literaturanalyse zum Thema „LCA von Zerspanungsprozessen“	161
Tabelle 51: Modellierungsansätze der Kategorie 1 zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen .....	166
Tabelle 52: Modellierungsansätze der Kategorie 2 zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen .....	167
Tabelle 53: Modellierungsansätze der Kategorie 3 zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen .....	169
Tabelle 54: Bewertungskriterien für bestehende Berechnungsmodelle des Leistungs- bzw. Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen .....	170

---

---

Tabelle 55: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Modellierungsansätze der Kategorie 1 .....	171
Tabelle 56: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Modellierungsansätze der Kategorie 2 .....	172
Tabelle 57: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Modellierungsansätze der Kategorie 3 .....	173
Tabelle 58: Gegenüberstellung von studienspezifisch ausgewiesenen Aggregaten resp. Verbrauchergruppen spanender Werkzeugmaschinen.....	174
Tabelle 59: Hintergrunddaten zur Modellierung des Energiebedarfs für metallbearbeitende Fräsprozesse nach Steiner und Frischknecht (2007) .....	176
Tabelle 60: Hintergrunddaten zur Modellierung des Energiebedarfs für metallbearbeitende Drehprozesse nach Steiner und Frischknecht (2007) .....	177

---

## Abkürzungsverzeichnis

A	Betriebszustand "Bearbeitung"
AF	Additive Fertigung
ALCA	Attributional Life Cycle Assessment
AM	Arithmetisches Mittel
AP	Arbeitspaket(e)
ArePron	Agiles ressourceneffizientes Produktionsnetzwerk
B	Betriebszustand "Aufwärmen"
BBA	Black Box Approach
BUA	Bottom Up Approach
BUIS	Betriebliches Umweltinformationssystem
C	Betriebszustand "Betriebsbereit"
CFP	Carbon Footprint von Produkten
CH <sub>4</sub>	Methan
CLCA	Consequential Life Cycle Assessment
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> Äq	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
CSR	Corporate Social Responsibility
D	Betriebszustand "Erweitertes Standby"
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E	Betriebszustand "Standby"
EEMA	Extended Energy Modeling Approach (dt. Erweiterter Energiemodellierungsansatz)
EF	Treibhausgas-Emissionsfaktor
EN	Europäische Norm
EoL	End-of-Life (dt. Lebensende)
F	Betriebszustand "Aus"
FKW/PFCs	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
FL	Flood Lubrication (dt. Überflutungskühlschmierung)
FU	Funktionelle Einheit (engl. Functional Unit)
G	Betriebszustand "Sonstige"
GLO	Global
GWP	Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potenzial)
H-FKW/HFCs	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Key Performance Indicator
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MLQ	Minimum Quantity Lubrication (dt. Minimalmengenschmierung)
N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
NRMSE	Normalized Root-Mean-Square Error (dt. normierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)

---

PAS	Publicly Available Specification
PKV	Power Key Values (dt. Leistungsbedarfskennwerte)
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Darmstadt
REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.
RER	Europe
RMSE	Root-Mean-Square Error (dt. Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
ROI	Return On Invest
RoW	Rest-of-World
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
THG (GHG)	Treibhausgas (engl. Greenhouse Gas)
THGE	Treibhausgasemissionen
TU	Technische Universität
UNEP	United Nations Environment Programme
UP	Unit Process
UPLCI	Unit Process Life Cycle Inventory
v3.8	Version 3.8
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WBCSD	World Business Council on Sustainable Development
WRI	World Resources Institutes

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

### 1.1.1 Politische Agenda und Auswirkungen auf das verarbeitende Gewerbe

Die Bekämpfung des Klimawandels und der Umweltzerstörung sind zentrale Aufgaben für unsere Gesellschaft. Die Europäische Kommission verabschiedete 2021 in diesem Sinne für alle Wirtschaftszweige den europäischen Grünen Deal (engl., Green Deal). Der Aktionsplan hat die Transformation zu einem klimaneutralen Europa zum Ziel. Ein zentraler Eckpfeiler dieser europäischen „Wachstums- und Wettbewerbsstrategie“ ist die anvisierte Klimaneutralität bis 2050: Bis zum Jahr 2030 sollen die **Netto-Treibhausgasemissionen**<sup>1,2</sup> um mindestens 55 %, bis 2050 um 100 % im Vergleich zum Referenzjahr 1990 gesenkt werden (COM 2021).

Der Green Deal fokussiert im Hinblick auf den industriellen Wandel einen wettbewerbsorientierten Übergang. Der Stärkung und sektoralen Ausweitung des EU-Emissionshandelssystems werden eine wichtige Rolle im industriellen Bereich zugesprochen, denn die Einnahmen aus dem Handelssystem sollen dafür herangezogen werden, „den Übergang zu einer saubereren Produktion zu unterstützen und Innovationen zu fördern“ (COM 2021). Zudem sollen neben neuen Vorgaben zur Dekarbonisierung von emissionsintensiven Produktionsprozessen (z. B. Zement- oder Stahlherstellung), Förderinstrumente (z. B. Innovationsfond für große Unternehmen und KMU im Bereich „saubere Energie“) auf den Markt gebracht werden, die Investitionen in kohlenstoffarme oder -reduzierende Innovationen, Technologien und Projekte unterstützen.

Gesetzlich verankert wurden die Vereinbarungen zum Green Deal 2021 auf deutscher Ebene durch den Beschluss zur Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Die zentralen Aktionsbereiche gestalten sich dabei folgendermaßen:

- Ehrgeizigere Klimaziele gegenüber den EU-Vorgaben: Bis zum Jahr 2030 sollen die Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 65 % und bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 % im Vergleich zum Referenzjahr 1990 gesenkt werden;
- Bis 2045 soll die Netto-Treibhausgasneutralität – also das Gleichgewicht zwischen anthropogenen THG-Emissionen aus Quellen und deren Abbau durch Senken (§ 2 Absatz 9 KSG) – erreicht sein, danach sollen negative Treibhausgasemissionen erzielt werden;
- Eine Senkung der verbindlichen Jahresemissionshöchstmengen bis 2030 wird neu festgelegt sowie jährliche Minderungsziele von 2031 bis 2040 werden festgesetzt (Bundesregierung 2021).

Die direkten Auswirkungen der politischen Agenda auf die unterschiedlichen Wirtschaftszweige können in Abhängigkeit der branchenspezifischen Emissionsintensität beschrieben werden. Während bspw. die Energiewirtschaft oder der Verkehrssektor in den kommenden Jahren direkt von den strengeren Vorgaben auf europäischer und nationaler Ebene betroffen sein werden, existieren noch

---

<sup>1</sup> Ein Treibhausgas (THG) kann als „gasförmiger Bestandteil der Atmosphäre [definiert werden], der die Strahlung bei spezifischen Wellenlängen innerhalb des Spektrums der infraroten Strahlung, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Wolken abgegeben wird, aufnimmt und abgibt“ (DIN EN ISO 14064-1:2019). Unter Netto-THG-Emissionen werden hingegen die THG-Emissionen verstanden, die in der Umwelt nicht durch Senken aufgenommen bzw. abgebaut werden können (z. B. Kohlenstoffbindung durch Wälder) (Bundesregierung 2021).

<sup>2</sup> Nachfolgende Begriffsdefinitionen werden im Verlauf der Arbeit in gleicher Weise hervorgehoben (fettgedruckt und kursiv).

keine direkten ableitbaren Regulative für das verarbeitende Gewerbe (COM 2021), obwohl dem Sektor im Jahr 2021 entsprechend dem nationalen Treibhausgasinventar 16,3 % der THG-Emissionen zugerechnet werden konnten (UBA 2021b). Abbildung 1 zeigt die jährlichen THG-Emissionen in Deutschland nach den Sektoren des KSG von 1990 bis 2021. Hierbei sei anzumerken, dass das KSG THG-Emissionen entsprechend dem Quellenprinzip behandelt. Die THG-Emissionen werden entsprechend dem Prinzip dem Sektor zugerechnet, in welchem sie physisch in die Atmosphäre entlassen werden. Hiernach werden THG-Emissionen (genauso wie THG-Emissionseinsparungen), die bspw. in der Industrie aus der Nutzung von Strom als Endenergie resultieren, dem Energiesektor als Quelle zugeordnet.

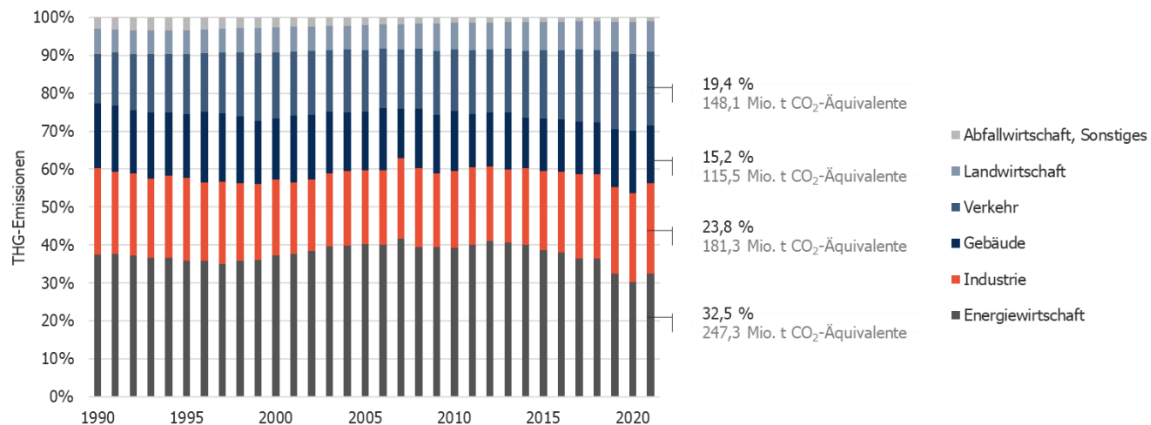


Abbildung 1: THG-Emissionen in Deutschland nach Sektoren des KSG von 1990 bis 2021 (eigene Darstellung nach UBA 2021b)

Während die bestehenden Restriktionen bspw. die Verkehrswirtschaft betreffend, Folgen für die Warenwirtschaft und die Materialversorgung des verarbeitenden Gewerbes haben könnten, lassen sich zum derzeitigen Zeitpunkt zukünftige direkte Konsequenzen für das verarbeitende Gewerbe nur schwer bemessen (Fibich 2022).

Als ein wesentlicher Haupttreiber der Netto-Treibhausgasemissionen in Deutschland kann der Energiebedarf gesehen werden (BMU 2021). Im Gegensatz zur Klimaberichterstattung, welche auf dem Quellenprinzip gründet, folgt die Energiebilanzierung dem Grundsatz des Verursacherprinzips. Als umweltpolitische Leitlinie werden innerhalb des Verursacherprinzips demjenigen die Umweltbelastungen zugerechnet, der die Umweltverschmutzung verursacht hat. Im Rahmen der Energiebilanzierung wird in diesem Sinne der Energieverbrauch (und damit verbundene THG-Emissionen) dem zugerechnet, der den Verbrauch herbeigeführt bzw. verursacht hat, bspw. einem Industrieunternehmen. Im Jahr 2020 entfielen 28,3 % des nationalen Endenergieverbrauchs auf das verarbeitende Gewerbe resp. die Industrie, wovon wiederum 30,9 % dem Energieträger Strom zugerechnet werden konnten (AGEB 2021). Abbildung 2 stellt den nationalen Endenergieverbrauch nach Sektoren für den Zeitraum 1990 bis 2020 sowie den Energieverbrauch nach Energieträgern für den Sektor verarbeitendes Gewerbe für das Jahr 2020 dar.



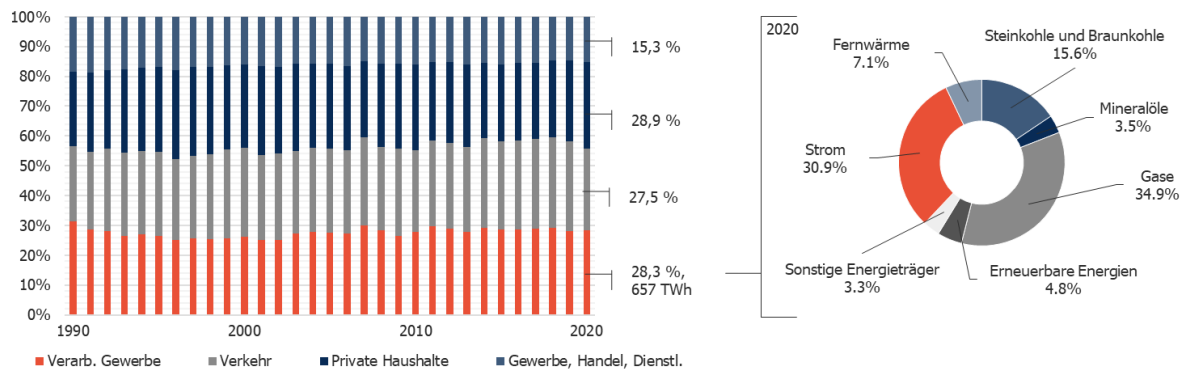


Abbildung 2: Energieverbrauch nach Sektoren (1990 bis 2020) (links) sowie für das verarbeitende Gewerbe nach Energieträgern (2020) (rechts) in Deutschland (eigene Darstellung nach AGEB 2021)

Für die Minderung der THG-Emissionen aus dem Bereich der Stromversorgung gibt es grundsätzlich zwei parallele Lösungswege: Der Strommix in Deutschland wird zugunsten erneuerbarer Energien weiter verändert oder der Gesamtenergiebedarf wird reduziert (COM 2021). Einflussmöglichkeiten von Unternehmen ihre aus dem Stromverbrauch resultierenden THG-Emissionen zu mindern, können dabei u. a. wie folgt sein:

- (1) der Einkauf von Ökostrom anstatt eines konventionellen Stromprodukts<sup>3</sup>,
- (2) die Eigenerzeugung der benötigten Strommenge (z. B. Solarstrom),
- (3) die zeitliche Anpassung des Verbrauchs an die volatile Stromproduktion aus bspw. Wind oder Photovoltaik oder
- (4) das Heben von Energiebedarfsminderungs- und -effizienzpotenzialen im eigenen Unternehmen (vgl. Panagiotopoulou et al. 2022).

Aufgrund des zu beobachtenden Strompreisanstiegs der letzten Jahre und der Spitzenposition, die Deutschland bei der Höhe der Strompreise im europäischen Vergleich seit Jahren einnimmt (eurostat 2022), ist die „einfache“ Wahl eines alternativen Stromproduktes für Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes keine abschließende Lösung. Die Umsetzung nachhaltiger Energiebedarfsminderungsansätze, so wie sie auch durch den Innovationsfond der EU subventioniert werden (COM 2021), sind für Unternehmen wettbewerbsentscheidend.

Festzuhalten ist, dass zur Einhaltung der europäischen und nationalen Klimaziele die THG-Reduktion des verarbeitenden Gewerbes ein wesentlicher Stellhebel ist. Entsprechend der nationalen Energiebilanz kann dem verarbeitenden Gewerbe zudem ein großer Teil des Endenergieverbrauchs angelastet werden. Zur Senkung der damit verbundenen THG-Emissionen müssen Energiebedarfsminderungs- und Energieeffizienzpotenziale durch die Unternehmen zügig identifiziert und gehoben werden.

### 1.1.2 Carbon Accounting and Life Cycle Assessment

Die Grundvoraussetzung für die Bewertung der Umweltperformanz eines Unternehmens und der daraus resultierenden Maßnahmenableitung stellt die Messbarkeit des Ist-Zustandes der

<sup>3</sup> Hierbei sei anzumerken, dass diese Maßnahme zwar die THG-Bilanz des Unternehmens verbessert wird (vgl. Verursacherprinzip), allerdings wird dadurch nicht zwangsläufig der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix erhöht, was zu einer gesamtheitlichen Verbesserung des nationalen THG-Inventars führen würde (vgl. Quellenprinzip).

unternehmerischen **Umweltleistung**<sup>4</sup> dar (Ahsen 2019). Die Umweltleistungsbewertung basiert zunächst auf der quantifizierten Erfassung der Stoff- und Energieströme des untersuchten Systems. Diese werden im Anschluss durch spezifische Berechnungsmodelle mit Umweltthemen (z. B. Klimawandel) in Verbindung gebracht (Baumast et al. 2019). Für Unternehmen liegt eine Herausforderung in der Genauigkeit und Ganzheitlichkeit der Datenerhebung, welche essentiell für eine belastbare und transparente Bewertungsgrundlage der Umweltwirkung ist. Eine weitere Herausforderung liegt in der zielgruppenorientierten Berichterstattung der Umweltleistung. Für eine erleichterte Darstellungsweise geht der Trend dazu über, die Umweltwirkung als einen aggregierten Indikator zu berichten, wie z. B. beim Ansatz des **Fußabdrucks (engl. Footprint)**<sup>5</sup>. Vor dem Hintergrund der politischen Agenda und dem Wissen über den globalen Klimawandel wird die Bilanzierung und Berichterstattung v. a. von THG-Emissionen im Sinne des Verursacherprinzips für Unternehmen immer wichtiger (Liu et al. 2016). Hier werden vermehrt Instrumente wie die THG-Bilanzierung (engl. Carbon Accounting) in unterschiedlichen methodischen Ausführungen (bspw. der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, engl. Carbon Footprint), als eine Variante der Umweltbilanzierung (engl. Environmental Accounting), angewendet.

Wie unterschiedlich jedoch der Begriff des **Carbon Accounting**<sup>6</sup> und seiner entsprechenden Begriffsvariationen (z. B. CO<sub>2</sub>, GHG oder Climate Change Accounting) in verschiedenen Disziplinen verstanden wird, zeigen Stechemesser und Guenther (2012). Sie unterscheiden nicht nur nach den Ebenen, auf welchen entsprechende Bilanzierungsverfahren angewendet werden können – nationale Ebene, Projektebene, Organisationsebene oder Produktebene – sondern auch zwischen den eigentlichen Bilanzierungsintentionen, welche die Ausweisung von monetären und nicht-monetären Aspekten zum Ziel haben können.

Aus Unternehmenssicht spielen vor allem die Accounting-Ebenen der Organisation und des Produktes eine wichtige Rolle. Auf Organisationsebene liegt nach Stechemesser und Guenther (2012) der Fokus auf der freiwilligen und/oder verpflichtenden Erfassung von THG-Emissionen, ihrer Bewertung in nicht-monetäre und monetäre Größen sowie ihrer Prüfung und Berichterstattung für interne (Carbon Management Accounting) und externe Zwecke (Carbon Financial Accounting). Hierbei kann es entweder als Ausgangsbasis und Steuerungsinstrument der organisationinternen Klimaschutzmaßnahmen herangezogen werden oder es wird auf strategischer Ebene als fester Bestandteil in das unternehmenseigene Umweltmanagement integriert (Peverali und Ullrich 2021). Demgegenüber ist die Absicht des Carbon Accounting auf Produktebene die Bestimmung der CO<sub>2</sub>- bzw. THG-Emissionsmenge eines Produktes entlang seines gesamten Lebenswegs. Das Ergebnis kann nicht nur an interessierte Kreise, z. B. zu Marketingzwecken an Kunden, berichtet werden, sondern kann auch der Identifikation von Optimierungspotenzialen dienen, um die Emissionsmenge des Produktes nachhaltig zu senken (Stechemesser und Guenther 2012).

---

<sup>4</sup> Als Umweltleistung werden die messbaren Ergebnisse des Managements von Umweltaspekten in einem Unternehmen bzw. in einer Organisation verstanden (DIN EN ISO 14001:2015). Zur Messung bzw. Quantifizierung dieser Ergebnisse kann bspw. die Methode der Ökobilanz herangezogen werden (Günther 2022).

<sup>5</sup> Das Bild des Fußabdrucks repräsentiert dabei die „Größe“ der Umweltwirkung. Diese Messeinheit kann dabei u. a. auf Produkte, Standorte oder Unternehmen übertragen werden. Je geringer der Fußabdruck bspw. eines Unternehmens ist, desto besser ist dessen Umweltperformanz (Weihofen 2019).

<sup>6</sup> Eine allgemeingültige Definition des Begriffs Carbon Accounting wurde durch Stechemesser und Guenther (2012) formuliert: „carbon accounting comprises the recognition, the non-monetary and monetary evaluation and the monitoring of greenhouse gas emissions on all levels of the value chain and the recognition, evaluation and monitoring of the effects of these emissions on the carbon cycle of ecosystems“ (Stechemesser und Guenther 2012).

Die eigentliche Quantifizierung der CO<sub>2</sub>- bzw. THG-Emissionen kann mittels unterschiedlicher Methoden durchgeführt werden. Je nach Intention der Untersuchung können im Hinblick auf eine nicht-monetäre Bewertungsabsicht die CO<sub>2</sub>- bzw. THG-Emissionen bspw. mittels einer einfachen faktoriellen Berechnung auf Basis von Emissionsfaktoren oder mittels komplexer prozess- und lebenszyklusorientierter Modelle bestimmt werden. Der Anspruch an die Methoden ist allerdings im Unternehmenskontext stets, dass sie ein möglichst vertrauenswürdigen Ergebnis liefern, welches gleichzeitig mit mäßigem Aufwand (z. B. hinsichtlich Kosten und Zeit) in der unternehmerischen Praxis bestimmt werden kann (Cowie et al. 2012). Im industriellen Bereich haben sich auf internationaler und nationaler Ebene dabei v. a. die nachfolgenden Standards im Hinblick auf die nicht-monetäre Quantifizierung von THG-Emissionen etabliert (Weihofen 2019; vgl. Liu et al. 2016):

- (i) der „Greenhouse Gas (GHG) Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard“ des World Resources Institutes (WRI) und das World Business Council on Sustainable Development (WBCSD) (WRI und WBCSD 2004),
- (ii) die THG-Quantifizierung und Berichterstattung nach DIN EN ISO 14064-1:2019 „Treibhausgase – Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene“,
- (iii) der Standard Publicly Available Specification (PAS) 2050 “Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services” entwickelt durch den Carbon Trust und das britische Department for Environment, Food and Rural Affairs (PAS 2050:2011),
- (iv) der „Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard“ des WRI und des WBCSD (WRI und WBCSD 2011) sowie
- (v) die Quantifizierung des Carbon Footprint von Produkten (CFP) nach DIN EN ISO 14067:2019 „Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung“.<sup>7</sup>

Der Anwendungsbereich der ersten beiden Methoden (i, ii) liegt auf Organisationsebene. Hierbei sei anzumerken, dass die beiden Standards sich vielmehr ergänzen als in Konkurrenz zueinander zu stehen (Weihofen 2019). Ausgehend von der Organisationsstruktur des Unternehmens werden in Abhängigkeit des Rechtsträgers die THG-Emissionen erfasst (entweder nach dem **Anteilsansatz**<sup>8</sup>, auf Basis der Kapitalbeteiligung, oder dem **Steuerungsansatz**<sup>9</sup>, nach finanzieller oder operativer Kontrolle) und am Ende im Rahmen der THG-Berichterstattung (engl. Carbon Reporting) veröffentlicht. Dabei sind nach beiden Standards die nach dem **Kyotoprotokoll reglementierten Treibhausgase**<sup>10</sup> entsprechend ihrem **Treibhauspotenzial**<sup>11</sup> aggregiert in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>Äq) im Rahmen der

---

<sup>7</sup> Zur Übersicht findet sich eine Gegenüberstellung der Standards (i), (ii), (iv) und (v) in Anhang A.1. Aufgrund der methodischen Nähe der Standards (iii) und (iv) – (iv) baut auf (iii) auf – wird repräsentativ für beide Standards nur Standard (iv) in die Gegenüberstellung einbezogen (GHG Protocol n. d.).

<sup>8</sup> Der Anteilsansatz beschreibt den Anteil der THG-Emissionen, welche dem Besitzanteil der Organisation entsprechen (WRI und WBCSD 2011). Besitzt das berichterstattende Unternehmen z. B. nur 60 % der Unternehmensanteile, werden auch nur 60 % der THG für den Carbon Footprint einbezogen (Weihofen 2019).

<sup>9</sup> Der Steuerungsansatz beschreibt den Anteil der THG-Emissionen, der dem operativen oder finanziellen Kontrollbereich der Organisation zugeschrieben werden kann (WRI und WBCSD 2004, Weihofen 2019).

<sup>10</sup> Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als Referenzwert, Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFCs), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFCs) und Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>).

<sup>11</sup> Auch als Klimawirksamkeit bezeichnet, beschreibt einen „Index auf der Grundlage der Strahlungseigenschaften von Treibhausgasen [...], der den Strahlungsantrieb nach einer Impulsemission einer Masseinheit eines gegebenen Treibhausgases in der aktuellen Atmosphäre im Vergleich zum Strahlungsantrieb von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zusammengefasst über einen gewählten Zeitrahmen misst“ (DIN EN ISO 14050:2020).

Berichterstattung auszuweisen (DIN EN ISO 14064-1:2019; WRI und WBCSD 2004). Eine Differenzierung der unternehmenseigenen THG-Emissionen erfolgt beim GHG Protocol Corporate Standard hinsichtlich der **direkten und indirekten Emissionen**<sup>12</sup> anhand der Grenzen des operativen Geschäfts mittels drei Reporting-Kategorien (Scope 1, Scope 2, Scope 3) (WRI und WBCSD 2004). Bei der DIN EN ISO 14064-1:2019 erfolgt lediglich eine Unterscheidung zwischen direkten und indirekten THG-Emissionen.

Der Anwendungsbereich der Standards (iii) bis (v) liegt auf Produktebene. Produktbezogene Carbon Accounting Ansätze sind, wie zuvor erwähnt, lebenszyklusorientiert. Dies bedeutet, dass alle THG-Emissionen zu berücksichtigen sind, die mit dem Produkt entlang seines Lebenswegs von der Rohstoffgewinnung, über die Konstruktion, die Produktion, den Transport und die Nutzung bis zum Lebensende (engl. End-of-Life, EoL) verbunden sind. Die eigentliche Bilanzierung der THG-Emissionen basiert auf dem methodischen Vorgehen der **Ökobilanz**, auch **Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment, LCA)** genannt. Das LCA dient der Bemessung der potenziellen Umweltwirkungen, die mit Produkten, Prozessen und Dienstleistungen im Zusammenhang stehen (DIN EN ISO 14040:2020). Für Unternehmen ist das LCA seit Jahren eine etablierte Methodik, wenn es um die fundierte Bewertung der Umweltwirkung von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen geht. Durch die Bilanzierung aller Ressourcenströme des Untersuchungsgegenstandes hilft die Methode gezielt bei der Identifizierung der wesentlichen Treiber der Umweltwirkung innerhalb des Lebenszyklus (Finkbeiner 2012). Das damit einhergehende Sichtbarmachen von Optimierungspotenzialen kann Unternehmen dabei unterstützen, nicht nur die Umweltwirkungen ihres Produktportfolios, sondern auch ihrer Prozessgestaltung zu verbessern.

Abbildung 3 zeigt die Gegenüberstellung der Untersuchungsrahmen des (i) GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard als Beispiel für eine THG-Bilanzierungsmethode auf Organisationsebene und des (v) CFP nach DIN EN ISO 14067:2019 als lebenszyklusorientierte Bilanzierungsmethode auf Produktebene. Während bei den THG-Bilanzierungsmethoden auf Organisationsebene die Umweltleistung der Organisation inkl. der durch Upstream- und Downstream-Aktivitäten verursachten THG-Emissionen, im Blickpunkt steht, zielt der CFP nach DIN EN ISO 14067:2019 auf die ganzheitliche und dennoch disaggregierte Erfassung der THG-Emissionen von Produkten und der damit in Verbindung stehenden Prozesse entlang des Produktlebensweges bzw. Produktlebenszyklus ab.

---

<sup>12</sup> Emissionen aus Quellen, die im direkten Besitz oder unter der Kontrolle einer Organisation stehen, werden als direkte Emissionen bezeichnet. Demgegenüber werden unter indirekten Emissionen solche verstanden, welche durch Betriebstätigkeiten aus Quellen stammen, die nicht im direkten Besitz oder unter der Kontrolle einer Organisation stehen (DIN EN ISO 14064-1:2019).

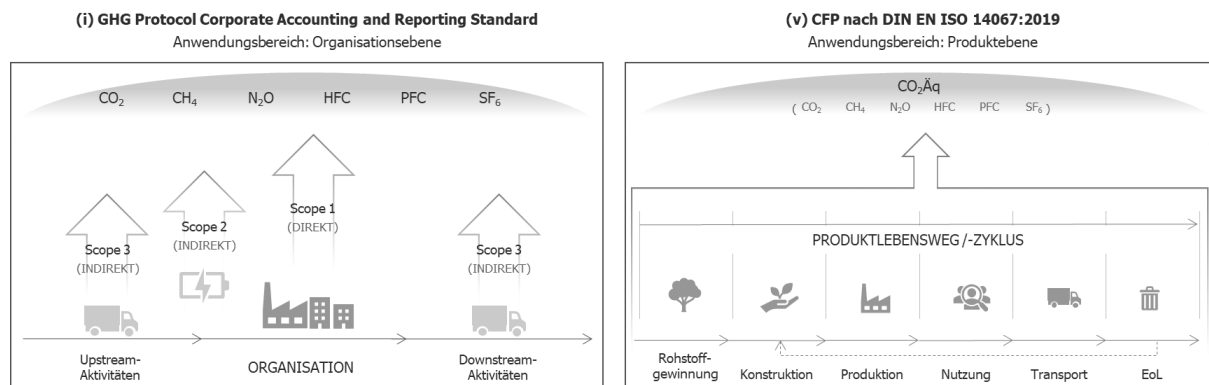


Abbildung 3: Gegenüberstellung des Untersuchungsrahmens von THG-Bilanzierungsmethoden. Links: GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard nach WRI und WBCSD (2004); rechts: Carbon Footprint für Produkte (CFP) nach DIN EN ISO 14067:2019 (eigene Darstellung)

Ein Carbon Accounting auf Prozessebene, der bedeutendsten Quelle für die THG-Emissionen im verarbeitenden Gewerbe, spielt allerdings bei den etablierten Bilanzierungsstandards bisher nur indirekt eine Rolle. Die prozessbezogenen Emissionen werden dabei in die Bilanzierung – entweder auf Organisations- oder Produktebene – lediglich als Anteil innerhalb der ermittelten THG-Emissionsmenge inkludiert, anstatt separat ausgewiesen. Eine direkte Ableitung von Optimierungspotenzialen zum Ziel einer verbesserten THG-emissionsärmeren Prozessausführung, Prozessplanung und Prozesssteuerung ist kaum bis gar nicht aus diesen aggregierten Ergebnissen ableitbar.

Eine Möglichkeit, ebendiese prozessbezogenen Emissionen standardisiert bilanzieren zu können, bietet der produktbezogene und lebenszyklusorientierte CFP-Ansatz nach DIN EN ISO 14067:2019. Als einziger etablierter Carbon Accounting Standard erlaubt dieser den Untersuchungsrahmen auf einzelne Lebenswegabschnitte zu legen. Dadurch kann ein partieller CFP bestimmt werden, der nicht zwangsläufig auf ein bestimmtes (Zwischen-)Produkt referenzieren muss, sondern der auch die THG-Emissionen eines bestimmten Prozesses, z. B. eines Produktions- bzw. Fertigungsprozesses ausweisen kann (Lewandowski et al. 2021; DIN EN ISO 14067:2019) (vgl. Anhang A.1). Abbildung 4 stellt die Möglichkeit der Ausweisung eines partiellen CFP und somit der standardisierten Bilanzierung der THG-Emissionen auf Prozessebene grafisch dar.

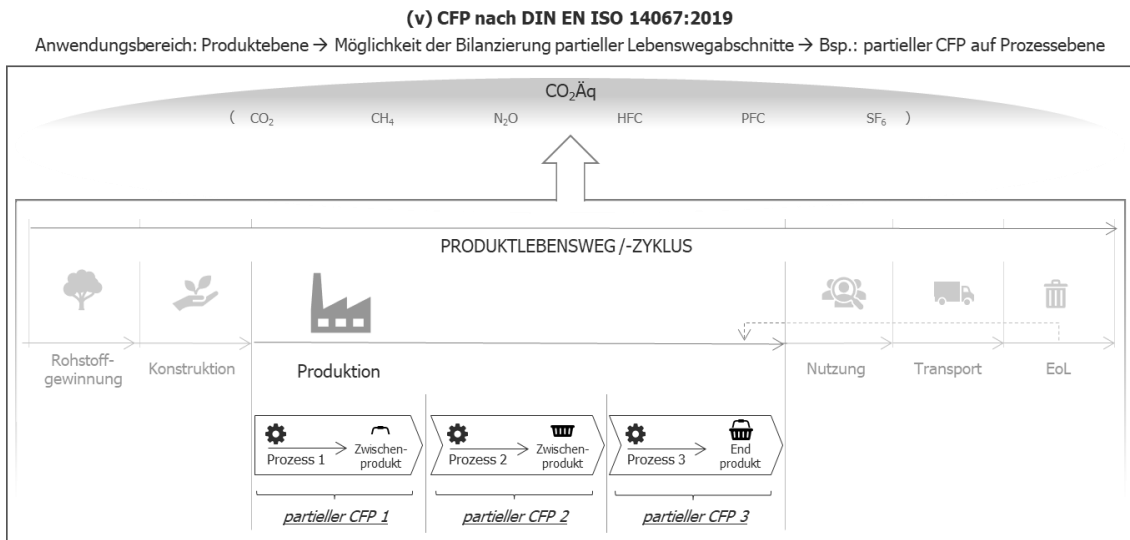


Abbildung 4: Ausweisung eines partiellen CFP auf Prozessebene nach DIN EN ISO 14067:2019 (eigene Darstellung)

Ein Unternehmen kann durch eine derart detaillierte Datenzusammenstellung im Rahmen des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting auf Prozessebene Transparenz darüber gewinnen, welche einzelnen Produktionsschritte oder **Fertigungsverfahren**<sup>13</sup> innerhalb der Organisation für die Höhe der Umweltwirkungen resp. THG-Emissionen verantwortlich sind. Das Verstehen der unternehmenseigenen Prozesse und deren Konsequenzen ist nicht nur die Grundlage für strategische Umweltmanagemententscheidungen und die Einleitung von unternehmensspezifischen Optimierungsmaßnahmen zur Senkung der THG-Emissionen, sondern ebnet den Weg zur Klimaneutralität entsprechend der politischen Agenda.

### 1.1.3 Die Bedeutung von Zerspanungsprozessen und deren Energiebedarf

In der Wertschöpfungskette zum Ausbau und zur Neuentwicklung innovativer und emissionsmindernder Technologien wird dem Einsatz von Werkzeugmaschinen in der Fertigung eine wichtige Position zugesprochen (VDW 2021). Auf nationaler Ebene war der Werkzeugmaschinenbau 2020 mit 17,1 Mrd. Euro und im Jahr 2021 mit 18,9 Mrd. Euro der umsatzstärkste Sektor der Maschinenbaubranche (statista 2022). Nach Denkena et al. (2020) sind schätzungsweise 5 bis 10 % des weltweiten Energiebedarfs des Industriesektors auf den Energiebedarf ebendieser Werkzeugmaschinen zurückzuführen, was den verbreiteten Einsatz und deren weltweite Relevanz bestätigt.

Werkzeugmaschinen finden in den unterschiedlichsten Branchen für diverse Fertigungsprozesse Anwendung und sind somit ein Grundpfeiler bei der Herstellung verschiedenster Produkte. Abbildung 5 zeigt den Anteil von Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie.

<sup>13</sup> Unter Fertigungsverfahren werden hierbei „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern [verstanden]; sie schließen die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften ein“ (DIN 8580:2003).

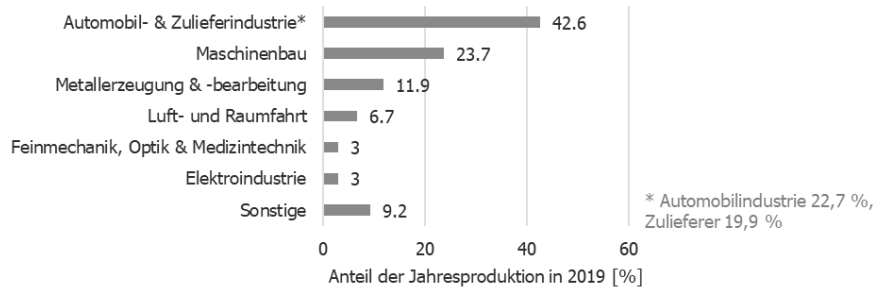


Abbildung 5: Anteil der Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie, 2019 (eigene Darstellung in Anlehnung an VDW 2021)

Vor allem spanenden Werkzeugmaschinen kommt hier eine besondere Bedeutung zu (Denkena et al. 2020). Unter Spanen ist das Trennen eines Werkstoffes zu verstehen, „bei dem durch die Schneiden eines Werkzeuges von einem Werkstück Werkstoffschichten in Form von Spänen auf mechanischem Wege abgetrennt werden“ (DIN 8580:2003). Als **Zerspanungsprozesse** werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit spanende Fertigungsverfahren verstanden (z. B. Fräsen, Drehen), die auf modernen Werkzeugmaschinen<sup>14</sup> durchgeführt werden. Sie sind der Hauptgruppe 3 „Trennen“ und der Untergruppe 3.2 „Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden“ der DIN 8580:2003 zuzuordnen, „bei dem ein Werkzeug verwendet wird, dessen Schneidanzahl, Geometrie der Schneidkeile und Lage der Schneiden zum Werkstück bestimmt sind“ (DIN 8589-0:2003-09). Der Zerspanungsprozess auf einer Werkzeugmaschine schließt hierbei neben dem eigentlichen Spanen alle maschinenbedingten (Betriebs-)Prozesse ein, die für das Durchführen des Spanens notwendig sind (z. B. Steuerungstechnik, Werkzeugrotation, Kühlschmierung). Abbildung 6 ordnet die Zerspanungsprozesse innerhalb der Fertigungsverfahren nach DIN 8580:2003 ein.

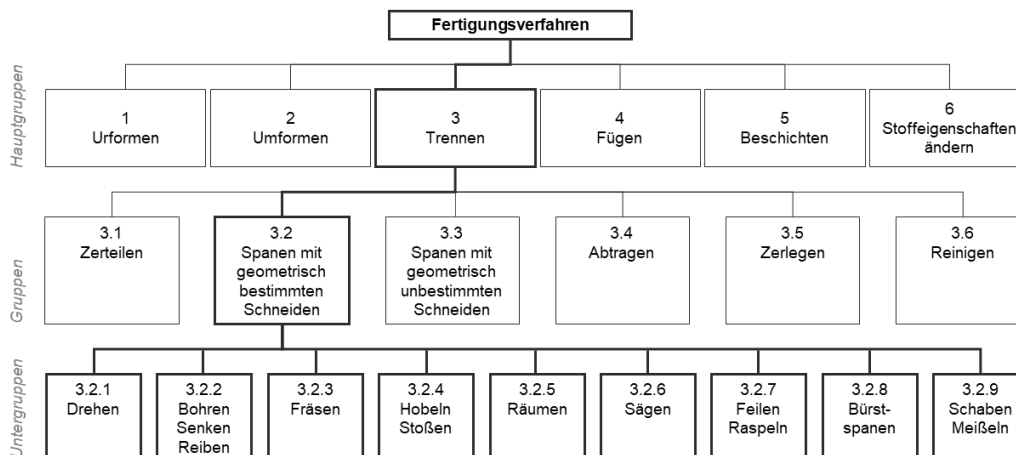


Abbildung 6: Fertigungsverfahren nach DIN 8580-0:2003 mit Fokus auf Zerspanungsprozesse mit geometrisch bestimmten Schneiden (eigene Darstellung in Anlehnung an DIN 8580:2003)

Laut Marktbericht des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V. (VDW) lag der Jahresproduktionsanteil spanender Werkzeugmaschinen im Vergleich zu umformenden Werkzeugmaschinen zwischen 2013 und 2020 im Mittel bei 74 %. Gerade Bearbeitungszentren, Drehmaschinen (-zentren) und Fräsmaschinen waren hierbei stets die volumenstärkste Produktkategorie (VDW 2021).

<sup>14</sup> Hierunter fallen v. a. Werkzeugmaschinen mit integrierter Steuerungstechnik, wie Computerized Numerical Control (CNC-) Maschinen.

Die Umweltwirkung von Zerspanungsprozessen ist im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren hoch, wie Metternich et al. (2021) zeigen. Diese Umweltwirkungen resultieren neben dem Materialabtrag zu großen Teilen aus dem Energiebedarf und bedingen maßgeblich die mit dem Zerspanungsprozess verbundene THG-Emissionsmenge (Panagiotopoulou et al. 2022; Fraunhofer ISI und Waide Strategic Efficiency 2017). Unter **Energiebedarf** wird nachfolgend eine „*Form der Ressourcennutzung [verstanden], bei der die Ressourcen so umgewandelt werden, dass sie einer erneuten Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen [...]. In diesem Sinne wird auch der Begriff Energieverbrauch verwendet*“ (UBA 2012). Für Zerspanungsprozesse wird der Energiebedarf als die Menge an elektrischer Energie verstanden, die bei der Durchführung des Zerspanungsprozesses verbraucht<sup>15</sup> wird. Entsprechend der Erkenntnisse des Transferprojektes „Agiles ressourceneffizientes Produktionsnetzwerk – ArePron“<sup>16</sup> sind unter Nichtberücksichtigung des Spanabtrages rund 61 %<sup>17</sup> der THG-Emissionen eines Zerspanungsprozesses auf den Energiebedarf zurückzuführen. Der restliche Anteil entfällt auf den Bedarf von weiteren **materiellen betrieblichen Ressourcen**<sup>18</sup>, wie Druckluft oder Hilfs- und Betriebsstoffe (Metternich et al. 2021).

Die Minderung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen und der damit verbundenen THG-Emissionen gestaltet sich somit als ein wichtiger Baustein, wenn es um die Reduzierung industriell bedingter Emissionen und des nationalen THG-Inventars geht.

## 1.2 Problemstellung und Forschungsfrage

Dem Energiebedarf von Zerspanungsprozessen, dessen Optimierung und der Erforschung von Energieeffizienzpotenzialen ist im wissenschaftlichen Bereich bereits viel Aufmerksamkeit gewidmet worden (vgl. Zhou et al. 2016). Auch in der Praxis sind Unternehmen grundsätzlich motiviert Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs ihrer Produktionslinien aufzudecken – nicht zuletzt durch den finanziellen, legislativen und kundenseitigen Druck. Hierfür ist es allerdings notwendig, eine transparente Datenlage hinsichtlich des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen im Unternehmen zu schaffen. Die Komplexität des Fertigungsprozesses selbst mit den Wechselwirkungen verschiedener

---

<sup>15</sup> Entsprechend dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist ein Verbrauch von Energie grundsätzlich physikalisch nicht möglich. Im übertragenen Sinne wird im Rahmen dieser Arbeit, angelehnt an das Verständnis nach Reinhardt (2013), unter den Begriffen Bedarf bzw. Verbrauch „*die Wandlung einer für die technische Anwendung leicht nutzbare in eine schwierig nutzbare Energieform verstanden*“ (Reinhardt 2013).

<sup>16</sup> Im Rahmen des Transferprojektes „ArePron“ (Förderkennzeichen: 933/001/2018) wurde der Einfluss der dynamischen und standortübergreifenden Vernetzung und Überwachung von Produktionssystemen auf die Ressourceneffizienz von industriellen Produktionsprozessen unter Einsatz von zentralen Technologien der Digitalisierung untersucht. Hierfür wurde ein exemplarisches Produktionsnetzwerk aus der metallverarbeitenden Industrie nachgebildet, mit welchem ein praxisnaher Produktionsablauf zur Herstellung eines spezifischen Produktes simuliert werden konnte. Dabei wurden u. a. Zerspanungsprozesse hinsichtlich ihres Ressourcenverbrauchs und ihrer THG-Emissionen auf Basis des LCA untersucht. Genauere Informationen zu den Forschungsarbeiten im Rahmen des Transferprojektes liefert Anhang A.2.

<sup>17</sup> Bezogen auf den Betriebszustand „Bearbeitung“ einer Werkzeugmaschine.

<sup>18</sup> Im betriebswirtschaftlichen Kontext werden unter **betrieblichen Ressourcen** „*alle ökonomisch notwendigen Faktoren für die Produktion, also insbesondere Betriebs- und Hilfsstoffe, Materialien und Werkstoffe, Energie, Kapital, Personal, Know-how und Zeit*“ (Schebek et al. 2017) verstanden. Materielle betriebliche Ressourcen werden dabei als die „*[...] betrieblichen Ressourcen [definiert], die [unmittelbaren] Einfluss auf den Verbrauch natürlicher Ressourcen haben. Dazu zählen Materialien (inkl. Rohstoffe und Wasser), Energie, Emissionen, Abfall und Fläche*“ (Schebek et al. 2017). Unter einer **natürlichen Ressource** wird wiederum eine „*Ressource [verstanden], die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen*“ (UBA 2012).



Einzelaggregate einer Werkzeugmaschine und den spezifischen Einstellungen der Steuerungstechnik lassen allerdings keine allgemeinen Aussagen über den Energiebedarf von Zerspanungsprozessen zu. Jede Zerspanungsmaschine hat in Abhängigkeit des durchgeführten Zerspanungsprozesses bzw. jeder Zerspanungsprozess in Abhängigkeit der Zerspanungsmaschine, auf welcher der Prozess abläuft, ihren charakteristischen Energiebedarf. Nach Einschätzung von Dietmair und Verl (2008) haben weder die Werkzeugmaschinenhersteller noch deren Kunden ein klares Bild über die Höhe des Energiebedarfs ihrer Werkzeugmaschinen und somit auch nicht unbedingt über die Höhe des Energiebedarfs ihrer Prozessketten. Diese Einschätzung hat sich in den letzten Jahren auf Anwenderseite nach den Erfahrungen, die im Transferprojekt ArePron gewonnen werden konnten (vgl. Anhang A.1), kaum geändert. Einer Identifizierung und Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen für Zerspanungsprozesse zur Reduzierung der damit verbundenen THG-Emissionen muss daher zunächst eine Quantifizierung der Energiebedarfsmenge des Ist-Zustandes vorausgehen. Die Quantifizierung kann dabei entweder mittels einer direkten Energiebedarfsmessung an der Werkzeugmaschine erfolgen (1) oder durch eine mathematische Modellierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses (2).

Die (1) direkte Messung des Energiebedarfs an der Werkzeugmaschine birgt unterschiedliche Herausforderungen in der Praxis. So besteht bei Unternehmen häufig die Angst vor einer möglichen Störung des Produktionsablaufs. Jede kleinste Änderung innerhalb einer Fertigungslinie kann Auswirkungen auf die Gesamtperformanz der Produktionsleistung mit sich bringen (z. B. Durchsatzrate, pünktliche Lieferung). So kann schon die Messung von Rohdaten zum Energieverbrauch in einer Fertigungsumgebung das Risiko bergen, Fertigungsprozesse zu unterbrechen, und erhebliche Kapazitäten binden. Gerade knappe Kapazitäten in Form von Zeit, Personal und Know-how sind oft ein großes Hemmnis bei der Durchführung von aufwändigen Messkampagnen. Durch eine enge Personalstruktur fehlt oft die Zeit und/oder die Expertise die unternehmensinternen Prozesssysteme adäquat hinsichtlich ihres Energiebedarfs aufzunehmen (Beermann und Wick 2019). Zudem kann es während der Anbringung von Messtechnik zu einer Beeinträchtigung des Prozessablaufes aufgrund von Installationsarbeiten kommen (z. B. Anschluss von Energiezählern). Entsprechende Messtechnik kann dabei entweder temporär zur Datengewinnung genutzt werden oder auch kontinuierlich. Als großer Nachteil des temporär genutzten Messequipments kann hier neben dem bereits genannten Störpotenzial der Aufwand angesehen werden, der für jede erneute Messung hinsichtlich der Installation betrieben werden muss. Demgegenüber scheint eine kontinuierliche Datenerfassung natürlich zunächst komfortabler hinsichtlich der Anwendung, allerdings ist der Betrieb und die Instandhaltung der nachgerüsteten Messmittel mit hohen Kosten verbunden (Kara et al. 2011). Die Digitalisierung bietet die Chance, nicht nur Daten zu den Energieverbräuchen direkt an der Werkzeugmaschine zu messen und zentral im Unternehmen abzuspeichern, sondern diese Daten gezielt hinsichtlich Optimierungspotenzialen im Prozessablauf auszuwerten. Dies erfordert jedoch zunächst einen systematischen Ansatz zur Aufbereitung dieser Rohdaten sowie die Bereitschaft und Fähigkeit der Unternehmen (in Bezug auf notwendige finanzielle Ressourcen, vorhandene Expertise und Infrastruktur etc.), ihr Fertigungsumfeld zu digitalisieren. Weder das eine noch das andere liegt in der Praxis flächendeckend vor. Zudem hat eine direkte Messung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses den Nachteil, dass die aufwändig gewonnenen Daten nur für diesen einen spezifischen Zerspanungsprozess auf der spezifischen Werkzeugmaschine Gültigkeit besitzen. Dieser charakteristische Energiebedarf kann nicht auf einen anderen Zerspanungsprozess auf der gleichen Werkzeugmaschine geschweige denn für einen Zerspanungsprozess auf einer anderen Werkzeugmaschine übertragen werden. In der Konsequenz muss vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Herausforderungen zur Quantifizierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses

dieser für jeden Zerspanungsprozess individuell auf der jeweiligen Werkzeugmaschine messtechnisch aufwendig ermittelt werden.

Demgegenüber ist die Quantifizierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen auch mittels eines (2) mathematischen Modellierungsansatzes möglich. Unter **Modellierung** wird hierbei die detaillierte Abbildung der wesentlichen Elemente eines realen Sachverhalts mittels mathematischer Beziehungen verstanden, um die Wirklichkeit möglichst genau darzustellen. Diese mathematischen Beziehungen gründen dabei i. d. R. auf physikalische Zusammenhänge, empirische Parameter und/oder Messdaten und gelten in ihrer theoretischen Formulierung als übertragbar auf andere Zerspanungsprozesse. Für die Berechnung des Energiebedarfs eines spezifischen Zerspanungsprozesses werden die Modelle mit Daten aus dem Fertigungsumfeld gespeist, die den jeweiligen Zerspanungsprozess charakterisieren (z. B. Prozessparameter wie Schnittgeschwindigkeit oder Materialabtragsrate). Während direkte Energiebedarfsmessungen an der Werkzeugmaschine selbst präzisere Verbrauchswerte liefern, sollen Modelle grundsätzlich den Vorteil bieten, dass ein relativ passgenauer Energiebedarfswert ohne größere Eingriffe in das Prozessumfeld berechnet werden kann. Allerdings sind die theoretische Modellierungsansätze entweder so komplex in ihrem Aufbau, dass es auch hier erst die notwendige Expertise im Unternehmen bedarf, um die Ansätze richtig anzuwenden oder sie sind auf empirische Daten des zu modellierenden Zerspanungsprozesses angewiesen, die ebenfalls mittels aufwändigen Messkampagnen an der Maschine erhoben werden müssen (vgl. Herausforderungen aus Punkt (1)). Gerade bei Modellen, die auf prozessspezifischen Messdaten gründen, werden Ergebnisse generiert, die auch nur für einen spezifischen Zerspanungsprozess auf einer spezifischen Werkzeugmaschine Gültigkeit besitzen und keine Wiederverwendung der aufwendig gewonnenen Messdaten zulassen.

Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen in Bezug auf die Quantifizierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen bedarf es daher einen praxisorientierten Modellierungsansatz für Unternehmen. Unter einem praxisorientierten Ansatz wird dabei die Anwendungsfreundlichkeit des theoretischen Ansatzes zur Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen im Unternehmenskontext bzw. im realen Fertigungsumfeld verstanden. Dabei soll der Modellierungsansatz für den Anwendenden leicht verständlich und umsetzbar sein sowie möglichst effizient in der Anwendung, was sich in der möglichen Wiederverwendung von wertvoll gewonnenen Messdaten zur Abbildung anderer Zerspanungsprozesse widerspiegeln soll. Ein solcher Ansatz existiert bisher nicht.

Der prozessbezogene Energiebedarf des Fertigungsumfeldes trägt innerhalb des verarbeitenden Gewerbes zu einem wesentlichen Teil der THG-Emissionen bei (Metternich et al. 2021). Somit ist das Wissen über die Höhe dieser Emissionen grundsätzlich sowohl für das Carbon Accounting auf Produktebene als auch auf Organisationsebene von Relevanz. Auf der einen Seite hat das Carbon Accounting das anschließende Carbon Reporting als Ziel, um die Umweltperformanz betreffender Zustände oder Verbesserungen auf Produkt- oder Organisationsebene an Dritte zu kommunizieren. So können bspw. Zulieferer von Zerspanungsprodukten angehalten sein, die THG-Emissionen ihrer Produkte an den Erstausrüster für dessen THG-Bilanz auf Organisationsebene zu berichten (Scope-3-Emissionen). Im Umkehrschluss können auch die Zulieferer selbst im Rahmen ihrer eigenen THG-Bilanz interessiert an den prozessbezogenen Emissionen durch den Energiebedarf ihrer Zerspanungsprodukte sein (Scope-1- oder Scope-2-Emissionen). Auf der anderen Seite können die Ergebnisse des Carbon Accounting auch als Steuerungsgröße im Rahmen des Umweltmanagements herangezogen werden. Dabei gilt es je nach Untersuchungsabsicht des Carbon Accounting Ansatzes entweder die direkten (Scope-1-Emissionen) und indirekten Emissionen eines Unternehmens in Form der

organisationsinternen Aktivitäten sowie der Upstream- und Downstream-Aktivitäten (Scope-2- und Scope-3-Emissionen) möglichst gering zu halten (z. B. GHG Protocol Corporate Standard, WRI und WBCSD 2004) bzw. die THG-Emissionen des gesamten Produktlebensweges entsprechend der lebenszyklusorientierten Carbon Accounting Ansätze auf Produktebene (z. B. DIN EN ISO 14067:2019) (vgl. Abbildung 3) möglichst zu mindern. Die detaillierte Kenntnis über die prozessbezogenen THG-Emissionen, wie sie auch aus dem Energiebedarf von Zerspanungsprozessen resultieren, tragen somit innerhalb aller Carbon Accounting Ansätze zu einem besseren Systemverständnis bei und bieten die Möglichkeit zur Identifizierung von THG-Emissionsminderungspotenzialen.

Das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 erlaubt, wie in Kapitel 1.1.2 erläutert, einen partiellen CFP von einzelnen Lebenszyklusabschnitten zu bestimmen. Hierdurch wird die Möglichkeit eingeräumt, die THG-Emissionen auf Prozessebene separat zu ermitteln (vgl. Abbildung 4). Dies begründet wiederum den Rahmen für einen prozessorientierten Carbon Accounting Ansatz, dessen Ergebnisse, wie oben beschrieben, sowohl einen Mehrwert für das Carbon Accounting auf Organisationsebene als auch auf Produktebene liefern können. Ein derartiger prozessbezogener Ansatz im Sinne des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019, mit welchem Unternehmen angeleitet die THG-Emissionen des Energiebedarfs Ihrer Zerspanungsprozesse bemessen können, existiert bisher nicht.

Die beschriebenen Herausforderungen sowie das Fehlen sowohl einer praxisorientierten Modellierungsmethodik des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen als auch eines lebenszyklusorientierten Carbon Accounting Ansatzes auf Prozessebene führen daher zur zentralen Forschungsfrage dieser Arbeit:

**Wie gelingt eine praxisorientierte Modellierung des Energiebedarfs von  
Zerspanungsprozessen zur Unterstützung des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting  
in Unternehmen?**

Zur Beantwortung dieser zentralen Forschungsfrage werden zur strukturierten Bearbeitung drei Unterforschungsfragen formuliert, die den Aufbau sowie den methodischen Rahmen der Arbeit begründen:

- (1) Wie sollte der Energiebedarf von Zerspanungsprozessen definiert und in welchen Systemgrenzen bemessen werden, um eine lebenszyklusorientierte Modellierung zu ermöglichen?
- (2) Wie kann eine praxisorientierte Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen gestaltet werden?
- (3) Welche methodischen Schritte sind notwendig um das entwickelte Modell in das LCA und somit in das Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 zu integrieren?

### **1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Im Anschluss an die vorliegende Einleitung werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen und der Stand der Wissenschaft in Bezug auf das Forschungsinteresse beleuchtet. Hierzu wird zunächst auf das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 eingegangen. Neben der Vorstellung des Standards, dessen Grundlagenmethodik in Form des LCA sowie von methodischen Besonderheiten, die mit der lebenszyklusorientierten Modellierung von Zerspanungs- resp. Fertigungsprozessen einhergehen, werden die normbedingten Anforderungen an das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen erläutert. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird für die Beantwortung der ersten Unterforschungsfrage (vgl. Kapitel 1.2)

nachfolgend untersucht, wie sich der Energiebedarf von Zerspanungsprozessen zusammensetzt, wie ein „Gesamtenergiebedarf“ vor dem Hintergrund der lebenszyklusorientierten Modellierungsabsicht definiert werden kann, welche Elemente einen solchen Gesamtenergiebedarf in welchem Ausmaß beeinflussen, welche Systemgrenzen bestehenden Energiemodellen von Zerspanungsprozessen zugrunde liegen und welche Systemgrenzen für das anvisierte Modellierungsziel gelten müssen. Im nächsten Schritt werden gezielt Modellierungsansätze im Bereich des LCA analysiert. Hierbei wird einerseits untersucht, wie die Modellierung von spanenden Fertigungsverfahren in etablierten LCA-Datenbanken bisher erfolgt und andererseits, wie bestehende LCA-Studien und LCA-Ansätze in der Literatur dem Thema begegnen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden als technologische und methodische Anforderungen an die lebenszyklus- und praxisorientierte Energiebedarfsmodellierung von Zerspanungsprozessen bzw. an das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen formuliert.

Die zuvor gewonnenen Erkenntnisse liefern die Grundpfeiler für die Entwicklung des in Kapitel 3 vorgestellten methodischen Vorgehens zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage. Das methodische Vorgehen basiert auf einem dreistufigen Ansatz und behandelt in der ersten Stufe die Herleitung und Entwicklung eines praxisorientierten Energiebedarfsmodellierungsansatzes für Zerspanungsprozesse. Dieser wird im Folgenden als „Extended Energy Modeling Approach (EEMA)“ (dt. erweiterter Energiemodellierungsansatz) bezeichnet. In der zweiten Stufe wird die Integration des EEMA in LCA-Datensätze als Basis für die Entwicklung eines Verfahrensansatzes für das lebenszyklus- und praxisorientierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen adressiert. Dieser Verfahrensansatz wird in der dritten Stufe in Form eines Modellversuchs auf dessen Anwendbarkeit hin validiert. In einem zusätzlichen vierten Schritt sollen darüber hinaus weitere Anwendungsmöglichkeiten der Methodiken bzw. einzelner methodischer Elemente für Unternehmen erörtert werden.

Entsprechend der vorgestellten methodischen Herangehensweise konzentriert sich Kapitel 4 auf die Entwicklung des EEMA und dient somit der Beantwortung der zweiten Unterforschungsfrage (vgl. Kapitel 1.2). Neben der Identifizierung geeigneter Grundlagenmodelle aus der Literatur, auf Basis derer der EEMA aufgebaut wird, werden für die anvisierte modulare und parametrisierte Modellkonzeption noch die Bausteine „Verbrauchergruppen“ sowie „Betriebszustände“ definiert. Aus der Verbindung dieser Komponenten folgt die mathematische Formulierung des EEMA. Durch Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des EEMA mit Realdaten eines Zerspanungsprozesses erfolgt die Validierung des entwickelten Energiebilanzierungsmodells. Zudem wird ein Vorschlag zur Erfassung der Eingangsdaten in der Praxis für den Modellierungsansatz vorgestellt.

Welche methodischen Schritte entsprechend der dritten Unterforschungsfrage (vgl. Kapitel 1.2) notwendig sind, um den EEMA in das LCA und somit in das Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 zu integrieren, wird in Kapitel 5 erläutert. Im ersten Schritt erfolgt hierfür zunächst die Beschreibung, wie der EEMA mit dem LCA verbunden werden kann. Diese Verbindung bietet v. a. auch Potenziale für die Datenlandschaft im Forschungsbereich des LCA. Daher werden nach einer Gegenüberstellung der auf Basis des EEMA erzeugten LCA-Daten und entsprechender generischer LCA-Daten aus konventionellen LCA-Datenbanken Möglichkeiten zur Ableitung verbesserter generischer LCA-Datensätze aus dem EEMA erörtert, welche in konventionelle LCA-Datenbanken integriert werden können. Hiernach erfolgt die Konzeptionierung des systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting in Unternehmen, welche in der detaillierten Verfahrensbeschreibung des Ansatzes mündet sowie die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Datenqualität beinhaltet.

In Kapitel 6 erfolgt die Anwendung und damit die Validierung des entwickelten systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting in Unternehmen im Rahmen eines Modellversuchs.

Kapitel 7 dient der Vorstellung von weiteren Anwendungsmöglichkeiten, die sich für den entwickelten EEMA bzw. den entwickelten Carbon Accounting Ansatz im organisationsinternen Unternehmenskontext ergeben.

In Kapitel 8 werden die vorgestellten Ergebnisse und damit v. a. die Grenzen der vorgestellten Methodik diskutiert.

Die Arbeit schließt in Kapitel 9 mit einem Fazit und der Beantwortung der Forschungsfrage sowie einem Ausblick ab.

## 2 Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die für das Themengebiet notwendigen theoretischen Grundlagen sowie der Stand der Wissenschaft beleuchtet. Hierfür werden zunächst das Vorgehen sowie Anforderungen des Carbon Accounting entsprechend des Standards DIN EN ISO 14067:2019 basierend auf der Methodik des LCA nach DIN EN ISO 14040:2020 sowie DIN EN ISO 14044:2020 vor dem Hintergrund des Forschungsziels erläutert. Daran anschließend erfolgt die Analyse der Zusammensetzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen, welche der Beantwortung der ersten Unterforschungsfrage dient: *Wie sollte der Energiebedarf von Zerspanungsprozessen definiert und in welchen Systemgrenzen bemessen werden, um eine lebenszyklusorientierte Modellierung zu ermöglichen?* Darauf aufbauend wird der Stand der Wissenschaft in Bezug auf themenrelevante LCA-Studien und Modellierungsvorgehen in konventionellen LCA-Datenbanken dahingehend untersucht, ob diese die zuvor festgelegte Definition des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen sowie daraus abgeleiteten notwendigen Systemgrenzen bei der jeweiligen Modellierung respektieren und ob diese praxisorientierte Modellierungsansätze bereitstellen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können dann technologische sowie methodische Anforderungen an den zu entwickelnden praxisorientierten Modellierungsansatz des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen bzw. an ein entsprechendes lebenszyklusorientiertes Carbon Accounting formuliert werden.

### 2.1 Lebenszyklusorientiertes Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019

Der Standard DIN EN ISO 14067:2019 ist Teil der Normenreihe ISO 14060. Diese adressiert die Quantifizierung, Überwachung, Berichterstattung und Validierung von wirtschaftsbedingten THG-Emissionen mit dem Ziel, den Weg für ein THG-emissionsarmes Wirtschaften zu ebnen. Unterstützung bietet sie dabei v. a. Unternehmen und Organisationen bei einer klaren und konsistenten Ermittlung, Bewertung und Berichterstattung der eigenen Emissionsintensität. Dies hilft nicht nur bei einer kontinuierlichen Leistungsmessung, sondern auch bei der Identifizierung, Planung, Umsetzung und Erfolgskontrolle von THG-Minderungsprojekten und -strategien im Rahmen des Umweltmanagements. Die Anwendung der Normenreihe ist bei Unternehmen somit bspw. dadurch motiviert,

- investitionsorientierte und rentabilitätssteigernde Unternehmensentscheidungen, bspw. hinsichtlich des Einsatzes klimaschonender Technologien zur Reduzierung der Energie- und/oder der THG-Emissionsmenge, abzuleiten,
- ein aktives Kohlenstoff-Risikomanagement (engl. Carbon Risk Management) zu betreiben,
- am Europäischen Emissionshandel (EU-ETS) teilzunehmen,
- dem Kunden ein transparentes Bild über die THG-Emissionsintensität der Organisation oder der Produkte zu liefern oder
- gesetzlichen Regulativen gerecht zu werden (DIN EN ISO 14067:2019).

Innerhalb der Norm DIN EN ISO 14067:2019 werden die Grundsätze und Anforderungen an die Quantifizierung des **Carbon Footprint von Produkten** definiert. Unter dem CFP wird hier genauer die „*Summe der [...] THG-Mengen [...] in einem Produktsystem, angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente [...] und beruhend auf einer Ökobilanz [...] unter Nutzung der einzigen Wirkungskategorie [...] Klimawandel*“ (DIN EN ISO 14067:2019) verstanden. Das hier adressierte Carbon Accounting ist somit lebenszyklusorientiert und fokussiert die Bemessung und Bewertung der THG-Emissionsmenge, die mit dem Lebensweg bzw. Lebenszyklus eines Produktes in Zusammenhang gebracht werden können.

Im Gegensatz zu anderen Standardisierungsansätzen des Carbon Accounting auf Produktebene (vgl. Kapitel 1.1.2), bei welchen der gesamte Lebenszyklus eines Produktes innerhalb der THG-Bilanzierung

bzw. des Carbon Accounting einbezogen werden muss (vgl. Lewandowski et al. 2021), ermöglicht der Standard DIN EN ISO 14067:2019 den Untersuchungsrahmen auch auf einzelne Lebenswegabschnitte zu legen und somit einen partiellen CFP zu berechnen. Ein **partieller CFP** wird nach DIN EN ISO 14067:2019 definiert als die „*Summe der [...] THG-Mengen [...] durch einen oder mehrere ausgewählte Prozesse [...] in einem Produktsystem [...], angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente [...] und beruhend auf den ausgewählten Abschnitten oder Prozessen innerhalb des Lebenswegs [...]*“ (DIN EN ISO 14067:2019) (vgl. Abbildung 4). Durch diese Reduzierung des Untersuchungsrahmens auf einen einzelnen Lebenswegabschnitt wird, wie in Kapitel 1.1.2 bzw. Kapitel 1.2 erläutert, ein Carbon Accounting auf Prozessebene möglich. Zur Bestimmung des Carbon Footprint von Zerspanungsprozessen, welcher im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich aus dem Energiebedarf resultiert, kann daher der Standard DIN EN ISO 14067:2019 als rahmengebende Norm für die Bilanzierung und Bewertung der THG-Emissionen herangezogen werden.

Da sich die Norm DIN EN ISO 14067:2019 auf das LCA stützt, bilden die LCA-Standards DIN EN ISO 14040:2020 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“ sowie DIN EN ISO 14044:2020 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“ und ihre Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien das methodische Fundament für die Ermittlung des (partiellen) CFP. Bevor daher auf die Anforderungen eingegangen werden kann, die sich durch die DIN EN ISO 14067:2019 an das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen ergeben, muss zunächst die methodische Grundlage zur Bemessung und Bewertung der Umweltwirkungen in Form des LCA erläutert werden. Dabei wird spezifisch auf methodische Besonderheiten eingegangen, die im Zusammenhang mit der lebenszyklusorientierten Modellierung von Zerspanungs- resp. Fertigungsprozessen stehen.

### 2.1.1 LCA als methodische Grundlage

Die methodische Grundlage des Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 bildet das LCA. Das LCA wird nach DIN EN ISO 14044:2020 als die „*Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs*“ verstanden. Die Methode besteht aus vier Phasen:

- Phase 1: Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (engl. Goal and Scope)
- Phase 2: Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory, LCI)
- Phase 3: Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment, LCIA)
- Phase 4: Auswertung (engl. Interpretation)

Die Phasen sind dabei nicht unabhängig voneinander zu betrachten, sondern stehen vielmehr in Wechselwirkung zueinander, was zu einer konsistenten Endbewertung führen soll. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens hat bei dessen Durchführung, neben der Ganzheitlichkeit, ein transparentes Vorgehen höchste Priorität, um den Nutzen der Ergebnisse zu gewährleisten (DIN EN ISO 14040:2020).

Es lassen sich grundsätzlich zwei LCA-Modellierungsansätze unterscheiden: der buchhalterische oder deskriptive Ansatz, engl. **Attributional Life Cycle Assessment (ALCA)**<sup>19</sup>, und der

---

<sup>19</sup> „System modelling approach in which inputs and outputs are attributed to the functional unit of a product system by linking and/or partitioning the unit processes of the system according to a normative rule“ (Sonnemann und Vigon 2011).

veränderungsorientierte Ansatz, engl. **Consequential Life Cycle Assessment (CLCA)**<sup>20</sup>. Dem ALCA und dem CLCA liegen unterschiedliche Untersuchungsziele zugrunde, die dem Adressaten der jeweiligen LCA-Studie unterschiedliche Informationen liefern. Während das ALCA Informationen darüber bereitstellt, welcher Anteil der globalen Umweltwirkungen mit einem Produkt, einem Prozess oder einer Dienstleistung und dessen Lebenszyklus in Verbindung gebracht werden können, liefert das CLCA Informationen darüber, welche Umweltwirkungen direkt oder indirekt in Folge einer getroffenen Entscheidung auftreten (Sonnemann und Vigon 2011). Da innerhalb der vorliegenden Arbeit die mit einem Zerspanungsprozess verbundenen THG-Emissionen ganzheitlich abgebildet werden sollen (ALCA), und nicht nur Emissionen, die sich bspw. aus einer Optimierungsmaßnahme an der Werkzeugmaschine bedingen (CLCA), wird in der vorliegenden Arbeit der deskriptive Ansatz in Form des ALCA verfolgt. Nachfolgend wird unter LCA, wenn nicht anders ausgewiesen, daher immer das ALCA verstanden.

Zur Erläuterung des LCA werden die vier Phasen näher beschrieben und im Kontext der Fertigungsmodellierung dargestellt. Danach wird der Unterschied zwischen der produktorientierten und der prozessorientierten Modellierung anhand des Beispiels Zerspanung aufgezeigt sowie methodische Lösungsansätze präsentiert, wie komplexe und dynamische Fertigungsprozesse mittels der Modularisierung und Parametrisierung innerhalb des LCA abgebildet werden können.

#### **2.1.1.1 Die vier Phasen des LCA**

Das LCA besteht, wie bereits erwähnt, aus vier iterativen Phasen. Neben deren nachfolgender Beschreibung erfolgt die Erläuterung zentraler Begriffe sowie ggf. die Ausweisung von methodischen Besonderheiten hinsichtlich der Modellierung von Fertigungsprozessen.

##### Phase 1: Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

In der ersten Phase erfolgt die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens der LCA-Studie. Neben der Definition des Ziels, welches die beabsichtigte Anwendung und den Grund der Studie beschreibt sowie die Zielgruppe und die Angaben zum Veröffentlichungszweck der Ergebnisse festlegt, wird der Untersuchungsrahmen anhand nachfolgender Elemente definiert: das **Produktsystem**<sup>21</sup> und die **Prozessmodule**<sup>22</sup>, der Nutzen in Form der Funktionellen Einheit (engl. Functional Unit, FU), die Systemgrenzen und Abschneidekriterien, die zu berücksichtigenden Wirkungskategorien und die anzuwendende(n) Wirkungsabschätzungsmethode(n), die Anforderungen an Daten und deren Qualität, Annahmen sowie ggf. Verfahren zur Kritischen Prüfung der Ergebnisse (DIN EN ISO 14040:2020; DIN EN ISO 14044:2020).

Da es sich beim LCA um einen relativen Ansatz handelt, ist die Festlegung des Nutzens bzw. die quantitative und qualitative Definition der FU ein zentraler Arbeitsschritt. Die **FU** kann als „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (DIN EN ISO 14044:2020) beschrieben werden. Gerade bei vergleichenden Lebenszyklusanalysen, z. B. bei dem Vergleich der Umweltwirkungen von Produkt A und B oder von Prozess X und Y, gewährleistet diese

---

<sup>20</sup> „System modelling approach in which activities in a product system are linked so that activities are included in the product system to the extent that they are expected to change as a consequence of a change in demand for the functional unit“ (Sonnemann und Vigon 2011).

<sup>21</sup> Als Produktsystem wird das Zusammenfassen von Prozessmodulen verstanden, die den Lebensweg eines Produktes abbilden (DIN EN ISO 14044:2020).

<sup>22</sup> Ein Prozessmodul (engl. Unit Process) stellt dabei den kleinsten in der LCI berücksichtigten Bestandteile dar, für welchen die Ressourcenaufwendungen in Form der quantifizierten Input- und Outputdaten innerhalb des LCI erfasst werden (DIN EN ISO 14044:2020).



Referenzeinheit die Vergleichbarkeit der zu generierenden LCA-Ergebnisse. Die FU muss nachfolgende Merkmale vorweisen:

- sie muss die Anforderungen des Ziels und des Untersuchungsrahmens des LCA erfüllen;
- sie muss klar definiert und messbar sein, da alle Inputs und Outputs des Produktsystems mit ihr in Verbindung stehen;
- als Bezugseinheit garantiert sie eine spezifizierte Vergleichsbasis (DIN EN ISO 14040:2020).

Die FU dient zudem der Festlegung eines Referenzflusses, auf welchen alle Input- und Outputströme des Prozessmoduls quantitativ bezogen werden. Der **Referenzfluss** wird definiert als *„Maß für die Inputs und Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die funktionelle Einheit, erforderlich sind“* (DIN EN ISO 14044:2020). Für alle funktionellen Flüsse, darunter allen voran der Referenzfluss des Produktsystems, gilt die nachfolgende axiomatische Grundlage: Das Ergebnis einer LCA-Studie im Sinne der Berechnungsergebnisse des LCI und des LCIA ist eine lineare Funktion der Einheit der FU (Heijungs 1998).

### Phase 2: Sachbilanz

In der zweiten Phase, der Sachbilanz resp. LCI, werden im Rahmen der Datenerhebung die relevanten Produkt-, Stoff- und Energieströme des Produktsystems (Inputs und Outputs), die zur Erbringung der FU notwendig sind, erhoben. Anschließend werden mittels Berechnungsverfahren die Daten für jedes Prozessmodul quantifiziert und so der Bezug zum Referenzfluss und der FU hergestellt. Dabei kann das Produktsystem in das Hintergrund- und in das Vordergrundsystem gegliedert werden. Das Vordergrundsystem schließt Prozesse ein, die speziell auf die Anforderung des Untersuchungsgegenstandes ausgerichtet sind (z. B. ein spezifischer Fertigungsprozess). Zur Abbildung der Vordergrundprozesse sind bevorzugt **Primärdaten**<sup>23</sup> zu verwenden, die mittels einer Datenerhebung generiert werden (Kaltschmitt und Schebek 2015). Das Hintergrundsystem umfasst hingegen Hintergrundprozesse, die keine direkten Prozessmodule des Produktsystems darstellen, welche aber für die Herstellung, Nutzung oder Entsorgung dieser notwendig sind (z. B. Strommix, Rohstoffe) (Pehnt 2006). Konventionell werden Hintergrundprozesse zumeist mittels Daten aus LCA-Datenbanken modelliert (Kaltschmitt und Schebek 2015). Abbildung 7 veranschaulicht anhand eines exemplarischen Produktsystems einer generischen Fertigungsprozesskette den Unterschied zwischen dem Vordergrund- und dem Hintergrundsystem bzw. den Vordergrund- und den Hintergrundprozessen.

---

<sup>23</sup> Unter Primärdaten wird entsprechend der Definition nach DIN EN ISO 14067:2019 ein *„quantifizierter Wert eines Prozesses [...] oder einer Tätigkeit [verstanden], der sich aus einer direkten Messung oder einer Berechnung auf der Grundlage direkter Messungen ergibt“* (DIN EN ISO 14067:2019).

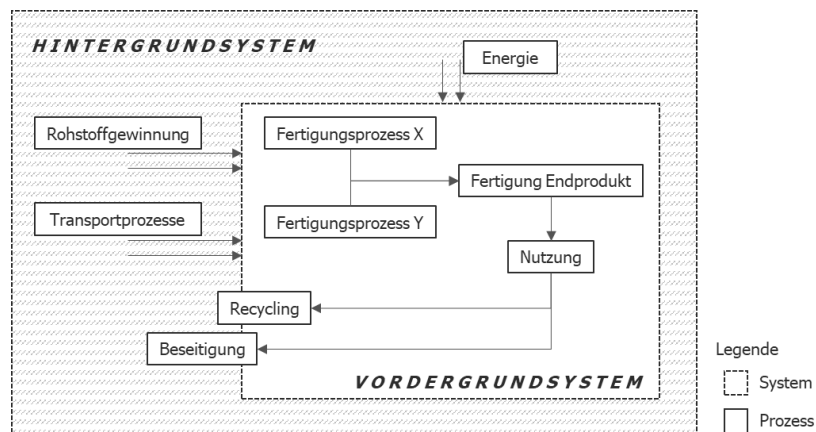


Abbildung 7: Vordergrund- und Hintergrundsystem für eine generische Fertigungsprozesskette (eigene Darstellung)

Produktsysteme können auch mehrere Produkte erzeugen oder verwerten. Hier ist unter Umständen die Anwendung einer **Allokation**<sup>24</sup> notwendig, insofern diese nicht durch andere Modellierungsalternativen vermieden werden kann (DIN EN ISO 14040:2020). Muss dennoch eine Allokation erfolgen, sollte diese vorzugsweise auf Basis der physikalischen anstatt der ökonomischen Zusammenhänge durchgeführt werden (DIN EN ISO 14044:2020).

### Phase 3: Wirkungsabschätzung

Innerhalb der Wirkungsabschätzung resp. LCIA werden die Sachbilanzergebnisse mit den Wirkungskategorien verknüpft. Dieser Vorgang wird auch als Klassifizierung bezeichnet. **Wirkungskategorien** spiegeln spezifische Umweltthemen wider (z. B. Klimawandel) und werden durch **Wirkungsindikatoren** quantifiziert. Ziel ist es, daraus die potenzielle Umweltwirkung eines untersuchten Produktes oder Prozesses abzuleiten. Dies erfolgt im Rahmen der **Charakterisierung**<sup>25</sup>, bei der aus den LCI-Ergebnissen und **Charakterisierungsfaktoren**<sup>26</sup> die Wirkungsindikatoren berechnet werden (z. B. für die Wirkungskategorie Klimawandel in der Einheit kg CO<sub>2</sub>Äq) (DIN EN ISO 14044:2020).

### Phase 4: Auswertung

In der vierten Phase werden die durch die in der LCI ermittelten Stoffströme und mittels der LCIA berechneten Umweltwirkungen ausgewertet. Es erfolgt die Identifizierung der signifikanten Parameter mit einer anschließenden Beurteilung durch ein oder mehrere geeignete Prüfverfahren (z. B. Vollständigkeits-, Sensitivitäts- oder Konsistenzprüfung), welches in der ersten Phase (Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens) festzulegen ist. Das Ziel der Auswertung ist es, unter Berücksichtigung der Beurteilung der eigenen Ergebnisse sowie von Limitationen und Schlussfolgerungen, Empfehlungen in Bezug auf das vorher definierte Ziel abzuleiten. Durch die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse können Entscheidungsprozesse innerhalb verschiedener Anwendungsbereiche unterstützt werden (DIN EN ISO 14040:2020; DIN EN ISO 14044:2020).

<sup>24</sup> „Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen“ (DIN EN ISO 14044:2020).

<sup>25</sup> „Berechnung der Wirkungsindikatorwerte“ (DIN EN ISO 14044:2020).

<sup>26</sup> Charakterisierungsfaktoren werden aus Charakterisierungsmodellen abgeleitet. Diese bilden mittels mathematischen Berechnungsmethoden das Verhalten von Substanzen in der Umwelt ab und setzen die Sachbilanzergebnisse mit dem jeweiligen Wirkungsindikator in Beziehung (Bach et al. 2016).

### 2.1.1.2 Prozessorientierte Modellierung

Das LCA verfolgt das Ziel, die Umweltwirkungen des gesamten Lebenswegs bzw. -zyklus eines Produktes, eines Prozesses oder einer Dienstleistung von der „Wiege bis zur Bahre“ (engl. cradle to grave) zu bilanzieren. Die relevanten Lebensphasen erstrecken sich dabei von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgungsphase des Untersuchungsobjekts. Abweichend davon kann die Methode auch nur auf die Untersuchung einer Teilmenge der Lebensphasen angewendet werden. So werden bspw. im „cradle-to-gate“-Ansatz lediglich die Phasen von der Rohstoffgewinnung bis zum Werkstor bzw. der fertigen Produktherstellung analysiert. Beim „gate-to-gate“-Ansatzes werden hingegen nur Prozesse betrachtet, die innerhalb des Werkgeländes stattfinden. Die stärkste Reduzierung findet sich in der Anwendung der Methode auf einzelne Lebenszyklusabschnitte (z. B. Fertigungsverfahren), die Herstellung von spezifischen Zwischenprodukten (z. B. Zerspanungsprodukt) oder ausgewählte Stufen eines spezifischen Fertigungsprozesses (z. B. Zerspanungsprozess) (DIN EN ISO 14040:2020).

In der LCA-Praxis kann im Bereich der Zerspanungssystemmodellierung grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Untersuchungsobjekten unterschieden werden: dem „Produkt“, in Form des zerspanten Endproduktes, und dem „Prozess“, in Form des Zerspanungsprozesses. Abbildung 8 stellt einen generischen Produktlebenszyklus inkl. der genannten Bilanzierungsgrenzen dar und ordnet die möglichen Untersuchungsobjekte im Bereich Zerspanung ein.

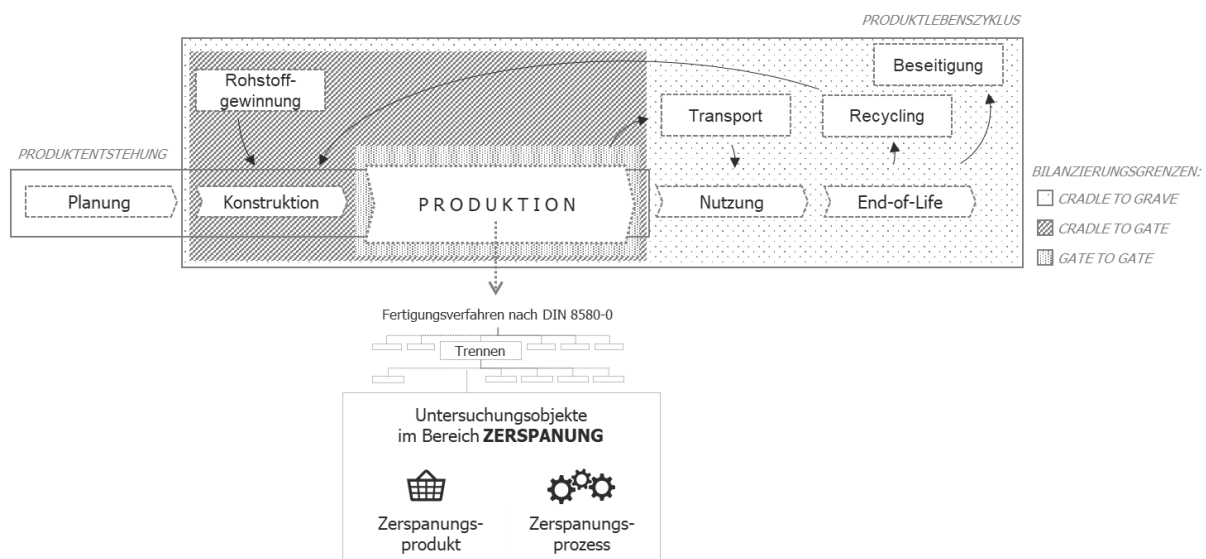


Abbildung 8: Darstellung der Bilanzierungsgrenzen sowie der Untersuchungsobjekte „Zerspanungsprodukt“ und „Zerspanungsprozess“ (eigene Darstellung)

Die anvisierten Untersuchungsobjekte bedingen die methodische Herangehensweise an die Modellierung. Hier ist demnach zwischen der produktorientierten (i) und der prozessorientierten (ii) Modellierung zu unterscheiden:

- (i) Die **produktorientierte Modellierung** legt den Fokus auf das Produkt und die Ressourcenaufwendungen, die für dessen Herstellung notwendig sind, und nicht auf den Fertigungsprozess. In solchen Studien (vgl. z. B. Lehmann 2020a, 2020b) kann es ausreichend sein, „Durchschnittsdatsätze“ aus LCA-Datenbanken für einen bestimmten Fertigungsprozess zu verwenden. Diese **Durchschnittsdatsätze** zeigen den durchschnittlichen Bedarf an materiellen betrieblichen Ressourcen des Fertigungsprozesses im Sinne eines Blackbox-Modells (vgl. Reinhardt 2013).
- (ii) Ist hingegen der Fertigungsprozess im Rahmen der **prozessorientierten Modellierung** selbst der Untersuchungsgegenstand, ist ein detaillierteres Systemverständnis entsprechend eines

Whitebox-Modells essentiell, wenn es um die Identifizierung der genauen Treiber der Umweltwirkungen geht. Die Inputs und Outputs werden dabei disaggregiert nach den einzelnen Systemelementen erhoben und bilden den Untersuchungsgegenstand detailliert ab. Die Datengrundlage für die Erstellung von prozessorientierten Lebenszyklusanalysen stammt im besten Fall direkt aus Primärdatenerhebungen (Brondi und Carpanzano 2011). Die Input- und Outputströme, die nicht mittels Messungen erhoben werden konnten, sollten auf Basis von repräsentativen Sekundärdaten (Literaturdaten), technischen und physikalischen Berechnungen oder Expertenschätzungen innerhalb des LCI ermittelt werden (vgl. Kellens et al. 2012b).

Abbildung 9 zeigt zusammenfassend die Gegenüberstellung der beiden Modellierungsvarianten im Bereich der Fertigungsmodellierung.

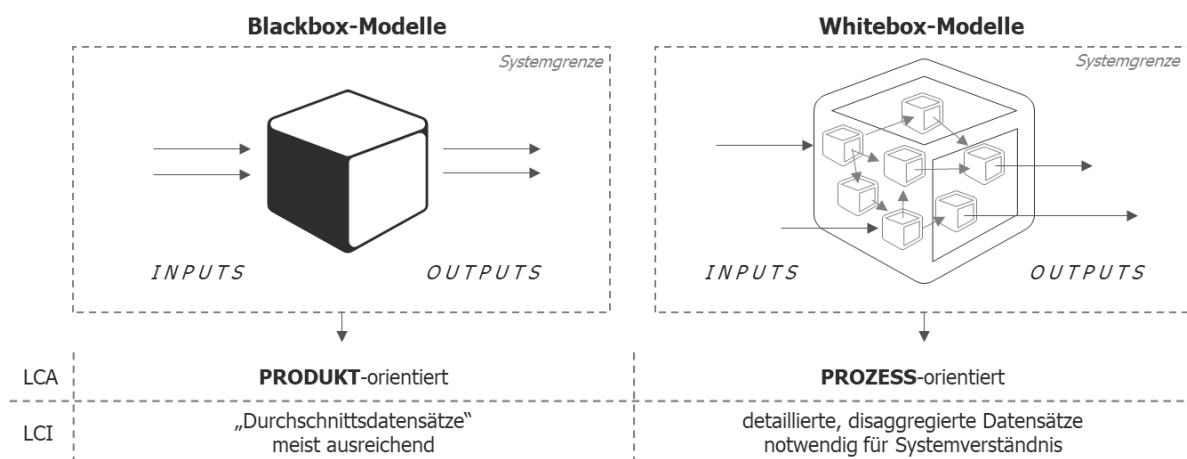


Abbildung 9: Gegenüberstellung der produktorientierten Blackbox-Modellierung zur prozessorientierten Whitebox-Modellierung (eigene Darstellung)

Der Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der transparenten Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen, was eine prozessorientierte Modellierung im Sinne eines Whitebox-Modells erforderlich macht. Infolgedessen wird unter dem Terminus „Modellierung“, wenn nicht anders ausgewiesen, im Folgenden immer die entsprechende prozessorientierte Modellierung verstanden.

### 2.1.1.3 Modularisierung und Parametrisierung

Trotz des wissenschaftlichen Reifegrades des LCA ist die Anwendung innerhalb der industriellen Praxis nicht trivial (Hauschild et al. 2005). Eine Herausforderung beim LCA von Zerspanungsprozessen liegt in der technologischen Komplexität des Untersuchungsgegenstandes. Eine lebenszyklusorientierte Bewertung von komplexen und agilen Zerspanungs- bzw. Fertigungsprozessen, die unterschiedlichste Produkte in einer zeitlichen Dynamik fertigen können und in der Konsequenz variierende Umweltwirkungen haben, birgt die Herausforderung, die methodenbedingte Ausrichtung des statischen LCA auf eine starre Zustandsmodellierung zu einem gewissen Grad zu überwinden (Mashhadi und Behdad 2017). Da auf einer Zerspanungsmaschine mehrere Produkte gefertigt werden können, die durch unterschiedliche Zerspanungsprozesse hergestellt werden, würde es Unternehmen oder LCA-Anwendende an ihre Leistungsgrenze bringen, all diese Zerspanungsalternativen innerhalb einer eigenen prozessorientierten LCA-Studie abzubilden (vgl. Millet et al. 2007). Um einem solchen Aufwand entgegenzuwirken, können methodische Ansätze, wie die Modularisierung (i) und die Parametrisierung (ii), die notwendige Dynamik in das LCA bringen.

(i) Unter **Modularisierung** wird die Aufteilung eines Produktsystems in möglichst kleine Subsysteme getrennt nach Lebenszyklusphasen bzw. Prozessschritten, die miteinander substituierbar sein können, verstanden (Lozano-Medina et al. 2018; Steubing et al. 2016).

Im Bereich der Fertigung wird die traditionelle Massenproduktion durch das Konzept der Individualisierung von Produkten entsprechend kundenspezifischer Anforderungen zunehmend abgelöst. Der damit verbundenen hohen Komplexität, die die Individualisierung in den Fertigungssystemen mit sich bringt, wird ebenfalls mit einem Modularisierungsansatz begegnet. Dabei werden Prozess- und Produktsysteme in kleinere, überschaubare Einheiten, sogenannte Module, zerlegt. Module werden nach Recchioni et al. (2007) als physische Strukturen definiert, welche eine direkte Verbindung mit funktionalen Strukturen haben. Sie können als einfache Bausteine mit spezifischen Schnittstellen begriffen werden (Ericsson und Erixon 1999). Ein Modul ist somit relativ lose mit dem Rest des Systems verbunden. Dadurch wird eine eigenständige Weiterentwicklung des Moduls unter der Voraussetzung ermöglicht, dass die Schnittstelle zu dem restlichen System stabil bleibt (Ericsson und Erixon 1999). Modularität ermöglicht eine größere Wiederverwendbarkeit und gemeinsame Nutzung von einzelnen, spezifischen Komponenten innerhalb verschiedener Prozesse und Produkte (Steubing et al. 2016; Brondi und Carpanzano 2011; Recchioni et al. 2007).

Dieses Verständnis der Modularisierung existiert auch im Bereich des LCA. Ein modularer LCA-Ansatz gründet sich dabei auf den Anspruch, die Komplexität des Gesamtsystems zu reduzieren, indem das Gesamtsystem in einzelne kleinere Subsysteme (Module) zerlegt wird (Zschieschang et al. 2012). Die einzelnen Module können separat ökobilanziell betrachtet werden und lassen sich im Nachgang wieder zu einem einheitlichen LCA für unterschiedliche Modulkombinationen zusammenfügen (Gabrisch et al. 2019). Diese Zerlegung erfordert die genaue Festlegung und Abgrenzung des modularen Untersuchungsgegenstandes, der Systemgrenzen und der FU (Zschieschang et al. 2012).

(ii) Unter **Parametrisierung** wird hingegen die Möglichkeit der Variation verschiedener Einflussgrößen innerhalb eines LCI-Datensatzes verstanden. Dabei werden anstelle von fixen Einzelwerten Rohdaten und mathematische Zusammenhänge für die Quantifizierung der Input- und Outputströme verwendet (Cooper et al. 2012). Obwohl viele Studien nicht klar zwischen den nachfolgenden Möglichkeiten der Parametrisierung trennen (Haupt et al. 2018; Cerutti et al. 2014; z. B. Zimmermann 2013), kann generell eine Parametrisierung des Hintergrund- und des Vordergrundsystems erfolgen:

- Eine Parametrisierung des Hintergrundsystems liegt vor, wenn innerhalb eines Prozessmoduls die quantitativen Mengen der Produktflüsse nicht variiert werden, jedoch die Herstellung der Vorprodukte einer Änderung unterworfen ist. Beispiele für die Parametrisierung des Hintergrundsystems sind die Variation der Anteile der zugrundeliegenden Energiequellen am Strommix oder die Nutzung verschiedener EoL-Szenarien (vgl. Pehnt 2006).
- Eine Parametrisierung des Vordergrundsystems hingegen bedeutet, dass abhängig von prozessspezifischen Einflussgrößen die Menge der Input- und Outputflüsse variabel ist. Ein Beispiel hierfür wäre die Veränderung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses durch die Änderungen der Spindelgeschwindigkeit oder der Vorschubrate einer Werkzeugmaschine.

Der Modellierung sehr individueller und komplexer Fertigungsprozesse, wie sie Zerspanungsprozesse darstellen, kann daher mittels einer Parametrisierung des Vordergrundsystems begegnet werden.

Der Vorteil der Anwendung der Modularisierung und der Parametrisierung innerhalb des LCA im Bereich der Modellierung von Fertigungsprozessen liegt somit in einer Reduzierung der Komplexität, einer erhöhten Transparenz und einer möglichen Übertragbarkeit der oft aufwendig zu bestimmenden LCI-Daten. Zudem wird nach Cooper et al. (2012) die Darstellung von Unsicherheiten erleichtert.

Resultierend kann nicht nur eine dynamischere und passgenauere Bewertung von Fertigungsprozessalternativen erfolgen, sondern es verringert darüber hinaus auch den Rechenaufwand im Rahmen des LCA (Steubing et al. 2016; Brondi und Carpanzano 2011).

### 2.1.2 Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019 an das Zielvorhaben

Die DIN EN ISO 14067:2019 stützt sich, wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, methodisch vollumfänglich auf die Anforderungen, Grundlagen und Leitlinien des LCA und somit auf die Standards DIN EN ISO 14040:2020 und DIN EN ISO 14044:2020. Zudem berücksichtigt sie darüber hinaus andere etablierte Standards, wie bspw. die Normenreihe ISO 14020:2000 „Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Allgemeine Grundsätze“. Dadurch wird eine konsistente Bilanzierung von THG-Emissionen durch die Normenreihe ISO 14060 (vgl. Kapitel 2.1) sowie die mögliche Integration in bestehende Umweltmanagementsysteme nach der Normenreihe ISO 14001 gewährleistet (vgl. Liu et al. 2016).

Mit der Anwendung der DIN EN ISO 14067:2019 gehen nachfolgende Grundsätze einher, die die Basis für weitere Anforderungen an die Erstellung eines Carbon Footprint bilden.

- (i) *Lebenswegbetrachtung*: Der gesamte Lebensweg eines Produktes ist zu berücksichtigen (Ausnahme: partieller CFP).
- (ii) *Relativer Ansatz und funktionelle Einheit*: Da es sich um einen relativen Ansatz handelt, der um eine FU aufgebaut ist, sind Ergebnisse bezogen auf diese FU zu bestimmen.
- (iii) *Iterativer Ansatz*: Der iterative Ansatz, basierend auf den vier Phasen des LCA, hat das Ziel einer konsistenten CFP-Studie und resultierender Ergebnisse.
- (iv) *Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes*: Getroffene Entscheidungen innerhalb der CFP-Studie sind möglichst naturwissenschaftlich oder basierend auf den Erkenntnissen anderer wissenschaftlicher Disziplinen zu begründen.
- (v) *Transparenz*: Alle Bestandteile inkl. Annahmen, Quellen, Berechnungen und Ergebnisse der CFP-Studie sind offenzulegen bzw. verständlich darzustellen und zu dokumentieren.
- (vi) *Relevanz*: Die Daten- und Methodenwahl ist für die Bewertung der THG-Emissionsmengen des Untersuchungssystems angemessen.
- (vii) *Vollständigkeit*: Alle relevanten THG-Emissionsmengen sind in die Untersuchung einzubeziehen, insofern sie nicht festgelegten Abschneidekriterien unterliegen.
- (viii) *Konsistenz*: Innerhalb der CFP-Studie ist mit Annahmen, Einschränkungen, Methoden und Daten entsprechend des festgelegten Ziels und Untersuchungsrahmens gleich umzugehen.
- (ix) *Genauigkeit*: Eine Bemessung des (partiellen) CFP soll genau, verifizierbar, relevant und nachvollziehbar durchgeführt werden, um Verzerrungen oder Unsicherheiten möglichst gering zu halten.
- (x) *Keine Doppelzählungen*: Notwendige Allokationen von THG-Emissionsmengen sollen nur einmal erfolgen, um dadurch Doppelzählungen derselben THG-Emissionsmengen zu vermeiden.
- (xi) *Kohärenz*: Für die Bestimmung des Carbon Footprint von Produkten einer spezifischen Produktkategorie sind entsprechend vorhandene Normen oder Anleitungen zu berücksichtigen, um die Vergleichbarkeit der CFP-Ergebnisse innerhalb einer Produktkategorie zu gewährleisten (DIN EN ISO 14067:2019).<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Die Grundsätze (i-v) sind dabei deckungsgleich mit den Anforderungen nach DIN EN ISO 14040:2020 bzw. DIN EN ISO 14044:2020.

Das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen bedingt, wie bereits erklärt, die Modellierung und Quantifizierung eines partiellen CFP nach DIN EN ISO 14067:2019. Mit der Erstellung eines solchen partiellen CFP werden an ein Unternehmen weitere Anforderungen gestellt, die durch den Standard in einer allgemeingültigen Form für unterschiedliche Anwendungsfälle dargestellt werden. Die relevanten Anforderungen für das in dieser Arbeit anvisierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen nach DIN EN ISO 14067:2019 sind nachfolgend aufgeführt:

### (1) Bilanzierung von Elektrizität

Die THG-Emissionsmengen aus der Nutzung von Elektrizität (Strom) im Unternehmen sind über den gesamten Lebensweg einzubeziehen. D. h., dass nutzungsbedingte THG-Emissionen genauso wie vorgelagerte (z. B. Strom-Erzeugung, Übertragungsverluste) und nachgelagerte THG-Emissionen (z. B. Entsorgung von Stromerzeugungsanlagen an ihrem Lebensende) mitbilanziert werden müssen. Dies kann je nach unternehmenseigenen Rahmenbedingungen wie folgt aussehen:

- bei der Nutzung unternehmensintern erzeugten Stroms (ohne einen (Teil-)Verkauf an Dritte) müssen die diesbezüglichen Lebenszyklusdaten der Bilanzierung zugrunde gelegt werden;
- wird Strom von einem direkt angeschlossenen Erzeuger genutzt (exklusive Übertragungsleitung zwischen Unternehmen und Erzeuger), kann der vom Erzeuger bereitgestellte THG-Emissionsfaktor (EF) für die Bilanzierung herangezogen werden;
- bei der Nutzung eines Stromprodukts aus dem Netz müssen die diesbezüglichen lieferantenspezifischen Lebenszyklusdaten für die Bilanzierung verwendet werden, insofern u. a. die bezogenen Strommengen und diesbezügliche Eigenschaften des Generators mit berichtet werden, eine Inanspruchnahme des Stromprodukts gewährleistet werden kann und das Stromprodukt im gleichen Land bzw. innerhalb der gleichen Marktgrenzen erzeugt wird, in dem es auch verbraucht wird (Verbundstromnetz);
- werden keine Lebenszyklusdaten zum Stromprodukt durch den Erzeuger bereitgestellt, sind die THG-Emissionsmengen in Zusammenhang mit dem Stromnetz, aus dem der Strom bezogen wurde, der THG-Bilanzierung zugrunde zu legen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Stromnetzdaten den Stromverbrauch der jeweiligen Region repräsentieren;
- stehen keine repräsentativen oder nur vereinzelt (für einzelne Lebenswegabschnitte oder Prozesse) Lebenszyklusdaten für den eigentlichen Stromverbrauch zur Verfügung, kann auf LCI-Daten aus anerkannten Datenbanken (z. B. UNEP) zurückgegriffen werden.

### (2) Besonderheiten für das LCIA

Im Rahmen des LCIA werden die LCIA-Ergebnisse nur für die Wirkungskategorie „Klimawandel“ ausgegeben. Hierzu erfolgt die Berechnung durch die Multiplikation der auf Basis des LCI ermittelten THG-Emissionsmengen<sup>28</sup> mit dem aktuellen vom IPCC veröffentlichten Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential, GWP), dem GWP 100a (Einheit kg CO<sub>2</sub>Äq pro kg **Elementarfluss**<sup>29</sup>). Die Höhe des Ergebnisses spiegelt den partiellen CFP wider und wird, u. a. im Bericht zur CFP-Studie, als Masse der CO<sub>2</sub>Äq je FU ausgewiesen und dokumentiert. Zusätzlich zum GWP 100a können die THG-Emissionen in Bezug auf andere Zeitrahmen und GWP, die durch den Weltklimarat IPCC veröffentlicht werden (z. B.

---

<sup>28</sup> Nach DIN EN ISO 14067:2019 sind alle THG-Emissionsmengen zu berücksichtigen, die potenziell Auswirkungen auf die Wirkungskategorie Klimawandel haben können (vgl. Anhang A.1).

<sup>29</sup> „Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde, oder Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird“ (DIN EN ISO 14044:2020).

IPCC GWP 20a), berechnet und angegeben werden. Diese sind allerdings separat zu den auf dem GWP 100a basierenden Ergebnissen auszuweisen.

Die Lebenszyklusdaten müssen dabei den gesamten Lebensweg berücksichtigen inkl. vorgelagerter THG-Emissionen (z. B. durch Rohstoffgewinnung, Transport), THG-Emissionen während der Stromerzeugung, einschließlich Stromverluste während der Übertragung oder der Verteilung sowie nachgelagerter THG-Emissionen (z. B. durch das EoL). Um die daraus resultierenden THG-Emissionen zu bestimmen, müssen im Rahmen der Wirkungsabschätzung alle vom Produktsystem abgegebenen und entzogenen THG, die potenziell Auswirkungen auf den Klimawandel haben, dann aggregiert in der Einheit kg CO<sub>2</sub>Äq pro kg Elementarfluss (resp. THG-Emissionen) angerechnet werden (vgl. DIN EN ISO 14067:2019).

### (3) Umgang mit CO<sub>2</sub>-Verrechnungen bzw. THG-Minderungsprojekten (engl. Offsetting)

Während bspw. der GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard bei Nichterreichung unternehmenseigener THG-Emissionsminderungsziele ausdrücklich zum Offsetting rät (WRI und WBCSD 2004), ist eine Verrechnung von THG-Reduktionen unter der DIN EN ISO 14067:2019 im Sinne des Offsettings (z. B. durch Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen oder Aufforstung) hingegen weder für den CFP noch für einen partiellen CFP erlaubt (insofern die THG-Minderungsmaßnahmen nicht Teil des untersuchten Produktsystem sind).<sup>30</sup>

### (4) Auswertung des partiellen CFP

Für die Auswertung des partiellen CFP wird durch die DIN EN ISO 14067:2019 empfohlen, eine Sensitivitätsprüfung der signifikanten Parameter durchzuführen. Dadurch sollen Unsicherheiten und Sensitivitäten transparent gemacht und alternative Anwendungsprofile sowie deren Einfluss auf das Endergebnis dargestellt werden.

### (5) Kritische Prüfung der Ergebnisse

Wie bei LCA-Studien wird auch bei der Ermittlung des partiellen CFP die Durchführung einer Kritischen Prüfung notwendig, wenn die Ergebnisse Teil von Vergleichsstudien bzw. für eine Veröffentlichung vorgesehen sind (DIN EN ISO 14040:2020). Unter einer **Kritischen Prüfung** wird hierbei ein Verfahren verstanden, welches „*dazu dient, die Konsistenz einer Ökobilanz mit den Grundsätzen und Anforderungen der Internationalen Normen zu Ökobilanzen sicherzustellen*“ (DIN EN ISO 14040:2020). Diese kann durch interne oder externe, von der LCA-Studie unabhängige Sachverständige durchgeführt werden (DIN EN ISO 14044:2021). Die DIN EN ISO 14067:2019 verweist hier auf die Grundsätze und Leitlinien der DIN CEN ISO/TS 14071:2016.

### (6) Kommunikation von Footprint-Ergebnissen

Für Anforderungen, die die Kommunikation des (partiellen) CFP an Dritte betreffen, verweist die DIN EN ISO 14067:2019 auf die Grundsätze und Leitlinien der Norm ISO 14026:2017. Geht es im speziellen Fall um die Kommunikation der Ergebnisse der Kritischen Prüfung, wird auf die ISO 14044 bzw. DIN CEN ISO/TS 14071:2016 verwiesen. Sollen die Ergebnisse nur zur internen Weiterverwendung, z. B. für

---

<sup>30</sup> Die nachträgliche Überarbeitung der DIN EN ISO 14067:2019 hinsichtlich dieses Grundsatzes unterstützt nach Lewandowski et al. (2021) die Unterbindung von Greenwashing-Aktivitäten seitens einzelner Unternehmen. Durch die klare Abgrenzung zur CO<sub>2</sub>-Verrechnung sollen Unternehmen an einer Veröffentlichung von falschen oder geschönten Angaben zur Umweltperformanz eines spezifischen Produktes gehindert werden (Liu et al. 2016).



Entscheidungshilfen, herangezogen werden, muss kein standardisiertes Verfahren angewendet werden.

## 2.2 Zusammensetzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen

Zerspanungsprozesse setzen sich aus einer Vielzahl von Subprozessen zusammen, die im Zuge von z. B. CNC-Programmen weitestgehend automatisiert ablaufen (Aramcharoen und Mativenga 2014). Diese Subprozesse, wie z. B. Schmier- und Kühlprozesse, Spanabtransport, Werkzeugwechsel, Belüftung und Absaugung, werden neben der eigentlichen Aufgabe, der Zerspanung eines Werkstückes, ausgeführt. So setzt sich auch der elektrische Energiebedarf von Zerspanungsprozessen aus den Energiebedarfsanteilen der Subprozesse zusammen. Der Energiebedarf von Zerspanungsprozessen ist zudem von der Maschinenkonstruktion, den verwendeten Technologieparametern (z. B. Vorschubgeschwindigkeit) und werkstückspezifischen Parametern (z. B. Material) sowie von **Leistungsverlusten**<sup>31</sup> abhängig (Zhou et al. 2016; Heidenhain 2010). Während die Wahl der Technologieparameter sowie die werkstückeigenen Parameter den spezifischen Energiebedarfsanteil des eigentlichen Zerspanungsvorgangs resp. Materialabtrags bedingen, ist für den Gesamtenergiebedarf insbesondere der Energiebedarf der Werkzeugmaschine maßgebend (Aramcharoen und Mativenga 2014). Spanende Werkzeugmaschinen<sup>32</sup> sind komplexe Systeme, welche oft nach individuellen Kundenanforderungen konzipiert sind (Heidenhain 2010). Typische Bauformen von Werkzeugmaschinen wurden z. B. durch Brecher und Weck (2019) kategorisiert. Im Bereich der Bohr- und Fräsmaschinen kann hierbei bspw. zwischen horizontalen und vertikalen Bohr- und Fräsmaschinen unterschieden werden, die wiederum in jeweils sieben bis neun grundsätzliche Konstruktionsausführungen aufgeteilt werden können (Brecher und Weck 2019). Weitet man diesen generischen Gruppierungsansatz auf weitere Fertigungsverfahren aus, ergibt sich letztendlich eine große Anzahl an verschiedenen Werkzeugmaschinentypen, die sich nach dem Bearbeitungszweck (z. B. Fräsen, Drehen) und v. a. den Konstruktionsmerkmalen (Zusammensetzung und Dimensionierung der Aggregate) clustern lassen und die alle einen spezifischen Energiebedarf aufweisen.

Hinzu kommt, dass die Werkzeugmaschinen für einen geregelten Betrieb unterschiedliche Betriebszustände entsprechend der maschineninternen Programmierung durchlaufen. So muss eine Werkzeugmaschine zunächst anfahren und betriebsbereit sein, bevor der eigentliche Zerspanungsprozess ablaufen kann. Diese unproduktiven Betriebszustände einer Werkzeugmaschine weisen innerhalb ihres Ablaufs ebenso einen Energiebedarf auf (Zhou et al. 2016) und gehen mit einer erfolgreichen Durchführung des Zerspanungsprozesses einher.

Um die erste Unterforschungsfrage zu beantworten, *wie der Energiebedarf von Zerspanungsprozessen definiert und in welchen Systemgrenzen dieser bemessen werden sollte, um eine lebenszyklusorientierte Modellierung zu ermöglichen*, werden nachfolgend zunächst die Zusammensetzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen analysiert und die identifizierten Anteile charakterisiert. Darauf aufbauend wird eine Definition für den Gesamtenergiebedarf von Zerspanungsprozessen abgeleitet. Zudem werden mögliche Einflüsse auf diesen Gesamtenergiebedarf untersucht, bestehende Modellierungsansätze hinsichtlich ihrer zugrunde liegenden Systemgrenzen kategorisiert sowie die

---

<sup>31</sup> Unter Leistungsverlusten sind hier Stromwärme- sowie Reibungsverluste der Antriebskomponenten zu verstehen, welche bei der Umwandlung von elektrischer Energie zu mechanischer Energie auftreten. Aufgrund des geringen Anteiles am Gesamtenergiebedarf (Heidenhain 2010), werden sie im Verlauf der Arbeit nur implizit berücksichtigt.

<sup>32</sup> Nachfolgend werden unter Werkzeugmaschinen, wenn nicht anders ausgewiesen, immer spanende Werkzeugmaschinen verstanden.

Systemgrenzen, die für die Modellierung des zuvor definierten Gesamtenergiebedarfs die Basis bilden, festgelegt.

### 2.2.1 Charakterisierung unterschiedlicher Anteile

Der Gesamtenergiebedarf einer Werkzeugmaschine bedingt sich durch ihre konstruktionstechnischen Merkmale, also durch die Auswahl, Zusammenstellung und Dimensionierung der verbauten Aggregate in Form von Verbrauchergruppen (i) sowie durch steuerungstechnische Merkmale, in Form der programmbedingten Betriebszustände (ii) (vgl. Triebe et al. 2018). Diese Anteile werden im Folgenden weiter charakterisiert:

#### (i) Verbrauchergruppen

Die Konstruktionsmerkmale von Werkzeugmaschinen lassen sich durch die unterschiedlichen Aggregate, die in einer Werkzeugmaschine verbaut sind, charakterisieren. Diese lassen sich hinsichtlich ihres Nutzens für die Fertigungsaufgabe (z. B. Kühlung, Materialabtrag) entsprechend der oben beschriebenen Subprozesse unterscheiden und verbrauchen alle zur Erfüllung des jeweiligen Nutzens Energie in Form von Strom. In Anlehnung an Eberspächer (2017) werden diese Aggregate daher im Verlauf der vorliegenden Arbeit als „Verbrauchergruppen“ einer Werkzeugmaschine bezeichnet.

Neben der Kategorisierung der Verbrauchergruppen hinsichtlich ihres Nutzens, können diese des Weiteren hinsichtlich der Art des Energiebedarfs charakterisiert werden. Während Balogun und Mativenga (2013) die Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Laststufen während des Betriebszustands „Bearbeitung“ clustern, ordnen Triebe et al. (2018) und Denkena et al. (2020) die einzelnen Aggregate den Hauptkategorien „Hauptkomponente“ und „Nebenkomponekte“ zu. Hingegen unterscheiden u. a. Gutowski et al. (2006), He et al. (2012), Aramcharoen und Mativenga (2014), Pavanaskar und McMains (2015) sowie Zhou et al. (2016) zwischen konstanten und variablen Verbrauchergruppen innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“. Die konstanten und variablen Verbrauchergruppen können wie folgt definiert werden:

- **Konstante Verbrauchergruppen** weisen zeitunabhängig einen konstanten Leistungsbedarf auf. Dieser wird nicht durch Prozess- oder Bearbeitungsparameter (z. B. Geometrie, Schnitttiefe) beeinflusst. Beispiele hierfür sind die Steuerungseinheit, in Form des Computers, oder die Beleuchtung (vgl. Zhou et al. 2022);
- **Variable Verbrauchergruppen** haben einen variablen Leistungsbedarf in Abhängigkeit der spezifischen Zerspanungsaufgabe. Beispiele hierfür sind die Spindel oder der Materialabtrag innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“ (vgl. Pavanaskar und McMains 2015).

Im Verlauf dieser Arbeit wird an dieser Unterscheidung hinsichtlich konstanter und variabler Verbrauchergruppen einer Werkzeugmaschine festgehalten.

#### (ii) Betriebszustände

Ein **Betriebszyklus**<sup>33</sup> einer Werkzeugmaschine setzt sich aus verschiedenen Betriebszuständen mit spezifischen Zeitintervallen zusammen (Zhou et al. 2016). Entsprechend der Definition nach ISO 14955-1:2017 wird unter einem **Betriebszustand** die Kombination unterschiedlicher Einstellungen (Ein, Aus, Warten, Bearbeitung, keine Bearbeitung, in Bewegung, Stillstand) vom Hauptschalter, der Maschinensteuerung, der Peripherie, der Zerspanungseinheit, der Bewegungseinheit und der

---

<sup>33</sup> Ein Betriebszyklus wird dabei als eine abgegrenzte Zeitreihe definiert, welche vom Anschalten über das Durchlaufen der Betriebszustände bis hin zum Abschalten der Werkzeugmaschine reicht. Betriebszyklen können hinsichtlich der Dauer und der Zusammensetzung variieren.

Antriebe, einschließlich relevanter Werkzeugaktivitäten, verstanden. Dementsprechend weist jeder Betriebszustand einen charakteristischen Leistungsbedarf, bzw. unter Berücksichtigung der jeweiligen **Betriebszeit**<sup>34</sup>, einen charakteristischen Leistungsverlauf auf.

In jedem Betriebszustand sind unterschiedliche Verbrauchergruppen aktiv, je nach den Befehlen, die vom jeweiligen Betriebsprogramm zugewiesen werden (Guo et al. 2015). Sind in unproduktiven Betriebszuständen variable Verbrauchergruppen aktiv, kann deren Leistungsbedarf in diesen Zuständen durch die programmbedingte Steuerung der Werkzeugmaschine als konstant angenommen werden. Daher existieren variable Verbrauchergruppen nur im Betriebszustand "Bearbeitung" (Zhou et al. 2016).

Betriebszustände sind teilweise voneinander abhängig (Eberspächer 2017). So kann der eigentliche Zerspanungsprozess erst ausgeführt werden, wenn die Werkzeugmaschine angeschaltet wurde, einen maschinenspezifischen Aufwärmprozess durchlaufen hat und betriebsbereit ist. Für eine ganzheitliche Bilanzierung des Energieaufwandes von Zerspanungsprozessen ist es daher nur konsequent, diese Energieaufwendungen für unproduktive Betriebsphasen anteilig zu berücksichtigen.

### 2.2.2 Definition des Gesamtenergiebedarfs und Einflüsse

Aus der vorherigen Charakterisierung der unterschiedlichen Energiebedarfsanteile von Zerspanungsprozessen können die zwei wesentlichen Erkenntnisse abgeleitet werden:

- (i) Der Energiebedarf einer Werkzeugmaschine wird durch konstante und variable Verbrauchergruppen beeinflusst. Bei der Energiebedarfsmodellierung von Zerspanungsprozessen müssen daher die Beiträge der jeweiligen Verbrauchergruppen berücksichtigt werden;
- (ii) Um die Aufgabe eines Zerspanungsprozesses zu erfüllen, müssen auch unproduktive Betriebszustände durchlaufen werden, die ebenso einen Energiebedarf aufweisen. Für eine ganzheitliche Energiebedarfsmodellierung müssen neben dem Energiebedarf für den Betriebszustand „Bearbeitung“ auch die Energiebedarfsanteile für die unproduktiven Betriebszustände (z. B. Aufwärmen, Betriebsbereit) anteilig berücksichtigt werden.

Aus diesen Erkenntnissen kann gefolgert werden, dass für die **Ganzheitlichkeit**<sup>35</sup> der Modellierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses ein „Gesamtenergiebedarf“ bestimmt werden muss. Dieser **Gesamtenergiebedarf (engl. Total Energy Demand, TED)** wird definiert als der vollständige Energieaufwand einer Werkzeugmaschine, welcher zur Durchführung eines Zerspanungsprozesses notwendig ist, einschließlich aller Aufwendungen der konstanten und variablen Verbrauchergruppen innerhalb des Betriebszustands „Bearbeitung“ sowie der anteiligen Aufwände der unproduktiven Betriebsphasen innerhalb eines definierten Betriebszyklus.

Der Einfluss der (i) konstanten und variablen Verbrauchergruppen und der (ii) Betriebszustände auf den Energiebedarf eines Zerspanungsprozesses wird in der Literatur wie folgt eingeschätzt:

- (i) Nach Aramcharoen und Mativenga (2014) hat die Zusammensetzung der Werkzeugmaschine hinsichtlich der Auswahl und Dimensionierung der konstanten und variablen

---

<sup>34</sup> Unter Betriebszeit wird hier, entgegen der REFA-Methode (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V., REFA) für Betriebsmittel entsprechend den Ausführungen nach Geitner (1987), die spezifische Dauer eines Betriebszustandes verstanden.

<sup>35</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird unter Ganzheitlichkeit die vollständige Berücksichtigung aller Energieaufwendungen (Energiebedarf), die unmittelbar mit dem eigentlichen Zerspanungsprozess in Verbindung gebracht werden können, verstanden.

Verbrauchergruppen einen direkten Einfluss auf die Höhe des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses. Hierbei ist hervorzuheben, dass der Energiebedarf von Zerspanungsprozessen vor allem durch die konstanten Verbrauchergruppen dominiert ist (Zhou et al. 2022). Gutowski et al. (2006) gehen davon aus, dass sich der Energiebedarf für die eigentliche Zerspanungsaufgabe linear mit der Anzahl an gefertigten Produkten bzw. der Materialabtragsrate verhält. Das heißt, je geringer die Produktionsrate und damit die Materialabtragsrate auf einer Werkzeugmaschine ist, desto höher ist der Energiebedarfsanteil der konstanten Verbrauchergruppen. Den konstanten Verbrauchergruppen wird im Betriebszustand „Bearbeitung“ ein Energiebedarfsanteil von bis zu 85 % zugesprochen (Zhou et al. 2022; Triebe et al. 2018; Aramcharoen und Mativenga 2014; Gutowski et al. 2006). Nach Zhou et al. (2016) ist der Anteil der variablen Verbrauchergruppen abhängig von den Materialeigenschaften des Werkstücks, Bearbeitungsparametern (z. B. Vorschubgeschwindigkeit), den spezifischen Bearbeitungsbedingungen und den Werkzeugeigenschaften. Zudem konstatieren die Autoren, dass je höher der Automatisierungsgrad der Werkzeugmaschine ist, desto höher ist der Energiebedarfsanteil der konstanten Verbrauchergruppen (Zhou et al. 2022; Zhou et al. 2016).

- (ii) Wie im vorherigen Kapitel angemerkt, sind nach Guo et al. (2015) abhängig vom jeweiligen Betriebszustand und dem damit zugrunde liegenden Steuerungsprogramm unterschiedliche Verbrauchergruppen aktiv. Dies bedingt die Höhe des Energie- bzw. Leistungsbedarfs innerhalb der unterschiedlichen Betriebszustände einer Werkzeugmaschine. Nach Gutowski et al. (2006) entfällt ein großer Anteil des Energiebedarfs auf den Anfahrzyklus einer Maschine sowie auf den betriebsbereiten Zustand. Gerade bei hoher **Maschinenauslastung**<sup>36</sup> ( $\geq 80\%$ ), die aus Gründen der Kosten-, Zeit- und Energieeffizienz in der unternehmerischen Praxis angestrebt wird, ist der Energiebedarf des Betriebszustandes „Bearbeitung“ dominierend (Balogun und Mativenga 2013). Sobald die Maschine betriebsbereit ist, wird für die eigentliche Bearbeitung des Werkstücks, also den eigentlichen Spanabtrag, nur noch ein kleiner zusätzlicher Energiebedarf fällig (Zhou et al. 2022), welcher sich proportional zur Produktions- bzw. Materialabtragsrate verhält (Gutowski et al. 2006). Während Aramcharoen und Mativenga (2014) den Energiebedarf für den eigentlichen Spanabtrag innerhalb des Betriebszustands „Bearbeitung“ auf 6,6 %, bezogen auf die untersuchte Fallstudie<sup>37</sup>, beziffern, ermitteln Yoon et al. (2014) in ihrer Studie den Anteil auf 7,6 %<sup>38</sup>.

Theoretisch kann der Anteil des eigentlichen Spanabtrags am TED wie in Abbildung 10 dargestellt werden. Hier wird neben der anteiligen Zusammensetzung des TED ( $x$ ), der Anteil des Spanabtrags am TED ( $x_{\text{span}}$ ) abgebildet und deren Größenordnung anhand eines Rechenbeispiels basierend auf den zuvor genannten Literaturwerten praktisch dargelegt. Unter der Annahme, dass sich innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“ der Energiebedarfsanteil für den Zerspanungsvorgang ( $z_{\text{span}}$ ) auf 7 % beläuft und der Energiebedarfsanteil für den Betriebszustand „Bearbeitung“ am TED ( $z$ ), welcher

---

<sup>36</sup> Als Maschinenauslastung, Kapazitätsauslastung oder auch Auslastungsgrad einer Werkzeugmaschine wird das Verhältnis der produktiven Phasen zur Gesamtbetriebsdauer innerhalb eines definierten Betriebszyklus verstanden. Bei einer Maschinenauslastung von bspw. 80 % durchläuft die Werkzeugmaschine in 80 % des Betriebszyklus den Betriebszustand „Bearbeitung“ – und fertigt dabei Produkte. In den übrigen 20 % ist die Werkzeugmaschine nicht produktiv.

<sup>37</sup> Werkzeugmaschine: Hitachi Seiki VG45 Fräszentrum; Werkzeug: unbeschichtetes Hartmetallwerkzeug mit einem Durchmesser von 50 mm; Werkstück: rostfreier Stahl T316L – L = B = 150 mm, H = 20 mm) (Aramcharoen und Mativenga 2014).

<sup>38</sup> Werkzeugmaschine: Dreiachsiges Bearbeitungszentrum (F400, Hyundai WIA Corp. Ltd., Korea); Werkzeug: Schaftfräser mit einem Durchmesser von 3 mm; Werkstück: C45-Stahl (Yoon et al. 2014).

hierbei mit der Maschinenauslastung der Werkzeugmaschine gleichgesetzt werden kann, bei 80 % liegt, kann ein Energiebedarfsanteil des Spanabtrags ( $x_{span}$ ) am TED ( $x$ ) von lediglich 5,6 % ermittelt werden.

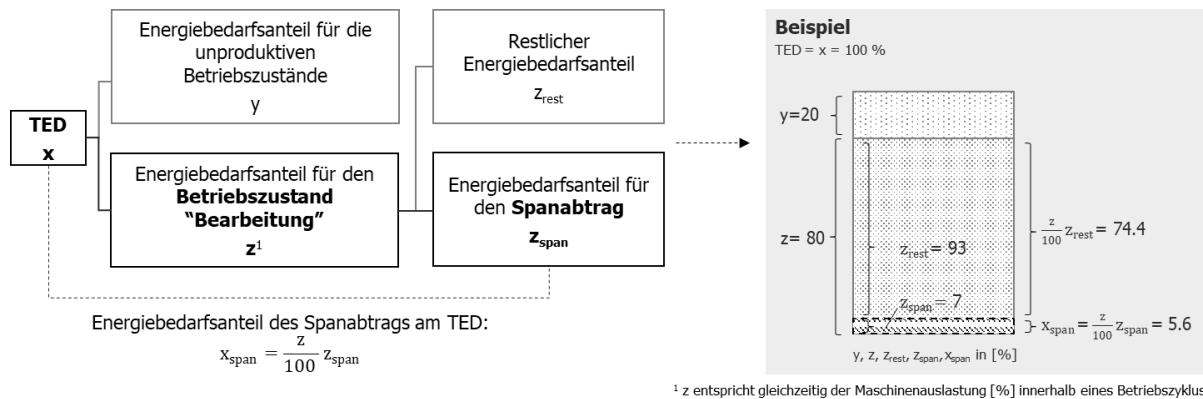


Abbildung 10: Energiebedarfsanteil des Spanabtrags ( $x_{span}$ ) am TED ( $x$ ), grafisch dargestellt anhand eines Rechenbeispiels (eigene Darstellung)

Um nun zu prüfen, wie sich der Energiebedarfsanteil des Spanabtrags ( $x_{span}$ ) bei variierendem Energiebedarfsanteil des Betriebszustands „Bearbeitung“ am TED bzw. variierender Maschinenauslastung ( $z$ ) zum TED ( $x$ ) verhält, wird ein weiteres Rechenbeispiel in Abbildung 11 vorgestellt. Es wird angenommen, dass der Energiebedarfsanteil des Spanabtrags am Energiebedarf des Betriebszustands „Bearbeitung“ 7 % ( $z_{span}$ ) hält (vgl. Abbildung 10). Der Energiebedarfsanteil des Betriebszustands „Bearbeitung“ am TED bzw. die Maschinenauslastung ( $z$ ) wird von 50 % um jeweils fünf Prozentpunkte erhöht. Die grafische Darstellung in Abbildung 11 verdeutlicht, dass sich zwar mit steigendem Energiebedarfsanteil des Betriebszustands „Bearbeitung“ am TED bzw. bei steigender Maschinenauslastung ( $z$ ) auch der Energiebedarfsanteil des Spanabtrags am TED ( $x_{span}$ ) erhöht, dies aber nicht proportional zur Erhöhung des Energiebedarfsanteils des Betriebszustands „Bearbeitung“ am TED bzw. der Maschinenauslastung erfolgt.

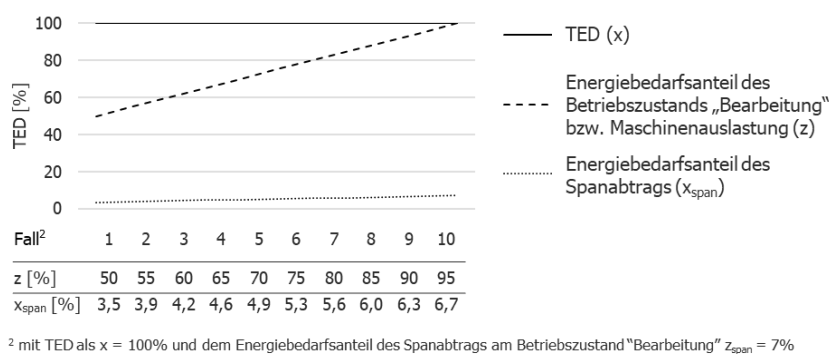


Abbildung 11: Exemplarische Variation der Maschinenauslastung ( $z$ ): Auswirkungen auf den Energiebedarfsanteil des Spanabtrags am TED ( $x_{span}$ ) (eigene Darstellung)

Daraus kann wiederum die Erkenntnis abgeleitet werden, dass bei Erhöhung der Maschinenauslastung der TED nicht linear mit dem Span- bzw. Materialabtrag steigt.

### 2.2.3 Kategorisierung von Modellierungsansätzen anhand der Systemgrenzen

Gerade im Forschungsgebiet „Energieeffizienz von Fertigungssystemen“ im Forschungsbereich Maschinenbau existieren viele Ansätze, die die mathematische Bestimmung bzw. Prognose des Leistungs- bzw. Energiebedarfs von Fertigungsprozessen zum Ziel haben. Dies belegen nicht zuletzt die

zahlreichen Review-Artikel aus diesem Themenbereich (Sihag und Sangwan 2020; Ingarao 2017; May et al. 2017; Moradnazard und Unver 2017; Zhong et al. 2016; Zhou et al. 2016; Yoon et al. 2015; Zhang 2015).

Als Ergebnis weisen die entsprechenden Modellierungsansätze des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen häufig den Gesamtleistungs- bzw. Gesamtenergiebedarf aus. Je nach Untersuchungsschwerpunkt der jeweiligen Forschungsarbeit schließt dieser Gesamtleistungs- bzw. Gesamtenergiebedarf allerdings oft unterschiedliche Systemgrenzen ein (vgl. Guo et al. 2015). Dies erfordert eine Einordnung bestehender Modellierungsansätze in definierte Kategorien. In der Literatur existieren unterschiedliche Kategorisierungsversuche, die bestehenden Modelle zu ordnen.

Zhou et al. (2016) teilen bspw. bestehende Ansätze in nachfolgende drei Kategorien ein: (I) In der ersten Gruppe finden sich Modelle, die einen linearen Zusammenhang zwischen dem spezifischen Energiebedarf des Zerspanens und der Materialabtragsrate herstellen (Lineare Energieverbrauchsmodelle). Die hier verwendeten, oft empirisch bestimmten, Koeffizienten sind i. d. R. nicht genau definiert oder eindeutig beschrieben. (II) Die zweite Gruppe fasst Modelle zusammen, die den Zusammenhang zwischen dem Energiebedarf des Zerspanens und den verwendeten Technologieparametern analysieren (Korrelationsmodelle). Diese werden durch die Autoren wiederum in vier Untergruppen aufgeteilt, in welchen entweder die Materialverformung, der Werkzeugverschleiß, die Schneidkraft oder Schneidparameter im Zentrum der Untersuchung stehen. (III) Modelle der dritten Gruppe beziehen sich auf die Modellierung des gesamten Bearbeitungsprozesses, mit dem Ziel, den Energiebedarf für die Teilebearbeitung abzuschätzen (Prozessorientierte Energieverbrauchsmodelle).

Pavanaskar und McMains (2015) beschreiben einen Typ von Modellen, bei welchem der Energiebedarf nur durch den Leistungsbedarf der Maschine abgeleitet wird. Dabei wird innerhalb der Ansätze häufig nach dem konstanten sowie dem variablen Leistungsanteil differenziert. Die Differenzierung leitet sich dabei maßgeblich von den maschinenspezifischen Betriebszuständen bzw. den zu unterschiedlichen Zeitpunkten aktiven Verbrauchergruppen der Werkzeugmaschine ab.

Guo et al. (2015) schlagen vor, die bestehenden Modellierungsmethoden zur Bestimmung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen auf Maschinenebene zwei Kategorien zuzuweisen: Dem „Black Box Approach, BBA“ (I) und dem „Bottom Up Approach, BUA“ (II). Bei (I) BBA-Modellen wird der Energiebedarf des reinen Zerspanens modelliert, indem ein empirischer Zusammenhang zwischen der Einstellung einzelner Maschinenparameter und der hierbei benötigten Energiemenge erstellt wird. Die Energiebedarfsermittlung erfolgt hier nur für die eigentliche Zerspanung. Bei (II) BUA-Modellen wird der gesamte Energiebedarf einer Werkzeugmaschine für die Durchführung eines Zerspanungsprozesses im Betriebszustand „Bearbeitung“ ermittelt. Hinsichtlich der Übertragbarkeit sind nach Guo et al. (2015) klare Vor- und Nachteile in Bezug auf die beiden Modellierungsvarianten zu sehen. Werden in den BUA-Modellen häufig maschinenspezifische Koeffizienten eingebunden, welche für jede Werkzeugmaschine einzeln durch empirische Untersuchungen aufwendig ermittelt werden müssen, können die einzelnen BBA-Modelle durch die Fokussierung auf den reinen Zerspanungsprozess als übertragbarer eingestuft werden. Allerdings weisen die BUA-Modelle ein klares Verständnis in Bezug auf die zugrunde liegenden Systemgrenzen auf, bei welchem der Energiebedarf im Betriebszustand „Bearbeitung“ ganzheitlich berücksichtigt wird (Guo et al. 2015).

Während die Kategorisierungsansätze nach Guo et al. (2015) oder Pavanaskar und McMains (2015) nur Modellierungsansätze berücksichtigen, die den Energiebedarf des reinen Zerspanens oder des

Betriebszustandes „Bearbeitung“ abbilden, gehen Zhou et al. (2016) in ihrem Clusteransatz nicht explizit darauf ein, welche Energieanteile entsprechend der Betriebszustände bei den Modellen berücksichtigt werden. Somit sind durch die vorgeschlagenen Clusteralternativen die zugrunde liegenden Systemgrenzen, auf Basis welcher die Berechnung des Energiebedarfs durchgeführt wird, oft nicht klar erkennbar. Aus diesem Grund wird ein dreigliedriges Kategorisierungssystem bestehender Literaturansätze zur Berechnung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen vorgeschlagen, welches die zugrunde liegenden Systemgrenzen der Energiebedarfsmodellierungsansätze charakterisiert. Die drei Kategorien<sup>39</sup>, in welche sich bestehende Ansätze durch deren zugrunde liegenden Systemgrenzen einordnen lassen, werden dabei wie folgt definiert:

- Kategorie 1: Berücksichtigung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs des eigentlichen Zerspanungsvorgangs als Anteil am Betriebszustand "Bearbeitung". Während in einigen Fällen nur der Energiebedarf des eigentlichen Zerspanungsvorgangs betrachtet wird, wird in anderen Fällen der Energiebedarf der gesamten Werkzeugmaschine während des eigentlichen Zerspanungsvorgangs einbezogen;
- Kategorie 2: Berücksichtigung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs des Zerspanungsprozesses, einschließlich des gesamten Energiebedarfs der Werkzeugmaschine im Betriebszustand „Bearbeitung“;
- Kategorie 3: Berücksichtigung des Energiebedarfs des Zerspanungsprozesses, einschließlich des gesamten Energiebedarfs der Werkzeugmaschine im Betriebszustand "Bearbeitung" zuzüglich des anteiligen Energiebedarfs aller unproduktiven Betriebszustände innerhalb eines definierten Betriebszyklus.

Grafisch kann das vorgeschlagene Kategorisierungssystem existierender Modellierungsansätze zur Ermittlung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs im Bereich Zerspanung, wie in Abbildung 12 gezeigt, dargestellt werden.

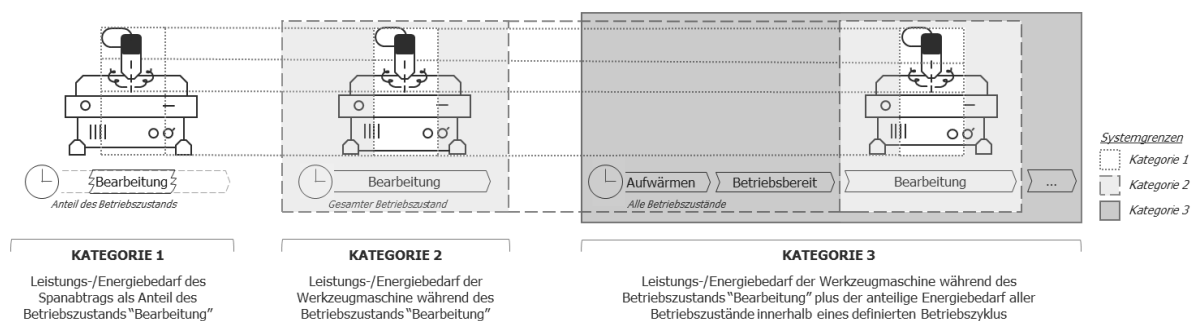


Abbildung 12: Dreigliedriges Kategorisierungssystem existierender Modellierungsansätze zur Ermittlung des Leistungs- bzw. Energiebedarfs im Bereich Zerspanung (eigene Darstellung)

Hieraus ist ableitbar, dass nur Modellierungsansätze der Kategorie 3 den TED, wie er in Kapitel 2.2.2 definiert wurde, abbilden können.

Vor dem methodischen Hintergrund des LCA erfolgt die Definition von Systemgrenzen in der ersten Phase, der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, in Verbindung mit klar definierten **Abschneidekriterien**. Diese Kriterien beschreiben die Systemelemente, die im Rahmen der jeweiligen LCA-Studie zwingend zu berücksichtigen sind bzw. nicht berücksichtigt werden (DIN EN ISO

<sup>39</sup> Hierbei sei anzumerken, dass eine noch detailliertere Unterscheidung bestehender Ansätze möglich ist. Das nachfolgend vorgestellte dreigliedrige Kategorisierungssystem ist für die vorliegende Arbeit ausreichend.

14044:2020). Während die oben vorgestellte Kategorie 1 nur den Zerspanungsprozess betrachtet und den Leistungs- bzw. Energiebedarf für unproduktive Prozesse oder Betriebszustände nicht berücksichtigt, konzentriert sich Kategorie 2 auf den Betriebszustand "Bearbeitung" und die damit verbundenen Energieaufwendungen. Alle weiteren Aufwendungen werden nicht berücksichtigt. Lediglich Kategorie 3 legt den Untersuchungsfokus auf den Gesamtenergiebedarf des Zerspanungsprozesses, gemäß der Definition der TED, da die zugrunde liegende Intention der Modellierung die ganzheitliche Erfassung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses ist. Da die Kategorien 1 und 2, wie oben gezeigt, aufgrund ihrer zugrunde liegenden Abschneidekriterien erhebliche Leistungs- bzw. Energiebedarfsanteile vernachlässigen, wird für das LCA des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen empfohlen, standardisiert die Systemgrenzen entsprechend der Definition aus Kategorie 3 zu verwenden.

### **2.3 LCA von Zerspanungsprozessen**

Aufgrund der Bedeutung von Zerspanungsprozessen in der unternehmerischen Praxis wurden auch im Bereich des LCA viele Untersuchungen zu deren Umweltwirkungen durchgeführt (z. B. Khanna et al. 2022; DeBoer et al. 2021; Khanna et al. 2021; Shah et al. 2021a; Furberg et al. 2020; Gupta et al. 2020; Vukelic et al. 2020; Campitelli et al. 2019; Eisenträger und Schiefer 2019; Grünebaum et al. 2019; Mia et al. 2019; Lu et al. 2018; Filletti et al. 2017; Kafara et al. 2017; Pereira et al. 2016; Faludi et al. 2015; Ginting et al. 2015; Reinhardt 2013; Kellens et al. 2012a; Serres et al. 2011; Duflou et al. 2011; Fratila 2010; Narita et al. 2008). Dabei sind lebenszyklusorientierte Untersuchungen von Zerspanungsprozessen nicht nur in Form von LCA-Studien in der Literatur veröffentlicht, sondern auch konventionelle LCA-Datenbanken beinhalten entsprechende LCI-Datensätze, die v. a. zur Modellierung des Hintergrundsystems verwendet werden. Um die Modellierungsweisen vorhandener LCA-Studien sowie generischer LCI-Datensätze aus LCA-Datenbanken, deren Ziel und Qualität sowie deren Umfang besser zu verstehen sowie Rückschlüsse für das eigene Forschungsinteresse abzuleiten, werden nachfolgend einerseits LCI-Datensätze etablierter Datenbanken sowie andererseits vorhandene Literatur in Form von LCA-Studien strukturiert analysiert.

#### **2.3.1 Analyse von LCI-Datensätzen etablierter Datenbanken**

Adäquate LCI-Datensätze sind grundlegend, um die tatsächlichen Umweltwirkungen von Zerspanungsprozessen oder -produkten abschätzen zu können. Häufig wird bei der Bilanzierung von Zerspanungsprozessen auf LCI-Datensätze aus konventionellen LCA-Datenbanken zurückgegriffen, gerade wenn es um die Modellierung von Hintergrundprozessen geht. Eine Untersuchung der LCA-Datenbanken ecoinvent (v3.8, cut-off; ecoinvent) und GaBi (2019; Sphera, ehemals thinkstep AG) soll Erkenntnisse hinsichtlich des Aufbaus, der Qualität und der Anwendungsmöglichkeit vorhandener generischer LCI-Datensätze für Zerspanungsprozesse für die unternehmerische Praxis bringen.

Nachfolgend wird zunächst die LCA-Datenbank ecoinvent (v3.8, cut-off) als Untersuchungsgegenstand herangezogen. Mit dem Fokus auf metallbearbeitende Fertigungsverfahren finden sich in der Datenbank 168 Datensätze zu Zerspanungsprozessen in unterschiedlichen technologischen Ausführungen (u. a. Bohren, Fräsen, Drehen) und Spezifizierungen (CNC-Bearbeitung, konventionelle Bearbeitung). Die aufgeführten Datensätze lassen sich zudem nach der Art des LCA-Prozesses (Aktivität vs. Marktaktivität), nach dem bearbeiteten Material (u. a. Aluminium, Gusseisen, Stahl), nach dem geografischen Bezug des Datensatzes (Europe – RER, dt. Europa; Rest-of-World – RoW, dt. Rest der Welt; Goba – GLO, dt. weltweit) sowie nach der Verarbeitungsart unterscheiden. Die Modellierung der Datensätze erfolgte entsprechend der Angaben aus Steiner und Frischknecht (2007) und die Gültigkeit



der Datensätze wird vom Herausgeber bis 2021 angegeben. Die ecoinvent-Datensätze sind im Anhang A.3, Tabelle 48 gelistet.

Die in Tabelle 48 gelisteten Datensätze verwenden die Menge an abgetragenen Material [1 kg] als Referenzfluss. Weiterhin wird der Inputfluss „Strom“ (engl. electricity) als Energiebedarf in kWh berücksichtigt (ecoinvent 2021a). Ob nur der eigentliche Zerspannungsvorgang, der Energiebedarf des Betriebszustandes "Bearbeitung" oder auch die Energieaufwendungen der unproduktiven Betriebszustände einbezogen werden, ist durch Steiner und Frischknecht (2007) nicht explizit definiert. Aufgrund der Wahl des Referenzflusses und der Abbildung der Werkzeugmaschine als eigenen Inputfluss innerhalb der Datensätze (vgl. Tabelle 1) wird allerdings davon ausgegangen, dass nur der Energiebedarf des eigentlichen Zerspannungsvorgangs entsprechend der zuvor definierten Modellkategorie 1 (vgl. Kapitel 2.2.3) modelliert ist.

Um die Frage zu beantworten, wie passgenau die vorhandenen, generischen Datensätze heutige Fertigungsprozesse abbilden, werden exemplarisch die Datensätze des Fertigungsverfahrens Fräsen (engl. milling) innerhalb von ecoinvent (v3.8) näher untersucht. Innerhalb der Datenbank wird das Fräsen von Metallen durch 48 Prozessvarianten dargestellt. Betrachtet man hier detaillierter den Bearbeitungsprozess eines spezifischen Materials, wie bspw. Edelstahl (engl. chromium steel), wird der Prozess weiter unterschieden nach unterschiedlichen Verarbeitungsarten (teilweise repräsentiert durch die abgetragene Spangröße) (average: dt. Durchschnitt; dressing: dt. Abrichten; large parts: dt. große Teile; small parts: dt. kleine Teile) sowie dem geographischen Bezugsrahmen (RER: Europe, dt. Europa, RoW: Rest-of-World, dt. Rest der Welt). Die quantitative Darstellung der einzelnen Ressourcenverbräuche der ecoinvent-Datensätze für das Fräsen von Edelstahl findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Modellierungsunterschiede der ecoinvent-Datensätze (v3.8) „chromium steel milling“

<b>ecoinvent-Prozess (v3.8): chromium steel milling<sup>1</sup>, average/dressing/large parts/small parts – RER/RoW</b>				
Referenzfluss: durch Fräsen abgetragenes Material = 1 kg				
	average	dressing	large parts	small parts
Inputs aus der Technosphäre				
Strom	0,67 kWh	11,50 kWh	0,30 kWh	3,19 kWh
Druckluft, 700 kPa			1,28 m <sup>3</sup>	
Energie- und Hilfsstoffe			4,41 kg	
Schmieröl			3,82e-03 kg	
Metallbearbeitungsfabrik			2,02e-09 Stück	
Metallbearbeitungsmaschine, nicht spezifiziert			1,74e-04 kg	
Edelstahl 18/8, warmgewalzt			1,00 kg	
Inputs aus der Technosphäre, Abfälle				
Alt-Mineralöl			-3,82e-03 kg	
Inputs aus der Umwelt				
Wasser, Kühlung, nicht spezifizierter natürlicher Ursprung			1,48e-02 m <sup>3</sup>	
Wasser, nicht spezifizierter natürlicher Ursprung			1,91e-03 m <sup>3</sup>	
Emissionen in die Luft				
Wasser			0,0063 m <sup>3</sup>	
Emissionen ins Wasser				
Wasser			1,04e-02 m <sup>3</sup>	

<sup>1</sup> LCI-Daten beziehen sich auf Steiner und Frischknecht (2007)

Die Erstellung der Datensätze aus Tabelle 1 fand in den Jahren 2006 bis 2007 statt. Die Datensätze berücksichtigen den direkten Energiebedarf der Werkzeugmaschine, den Verbrauch an Druckluft und das verbrauchte Kühlschmiermittel, die Menge an abgetragenen Material sowie die Werkzeugmaschine und die für deren Betrieb notwendige Infrastruktur. Die Entsorgung des Kühlschmiermittels geht ebenso in den Datensatz ein. Es wird angenommen, dass das abgetragene Material recycelt wird (Steiner und Frischknecht 2007). Bei der Gegenüberstellung der dargestellten

Prozessvarianten fällt allerdings auf, dass sich diese nur in der Variation des Inputflusses „Strom“ unterscheiden. Die sonstigen Inputs und Outputs werden als gleich innerhalb der unterschiedlichen Datensätze angenommen. Der quantifizierte Stromverbrauch des Fräsprozesses geht dabei auf zwei Literaturquellen aus den Jahren 1976 bzw. 1990 zurück (Degner und Wolfram 1990; Barnes 1976). Bei Degner und Wolfram (1990) wurden Primärdaten im Rahmen einer Dissertation erstellt, bei Barnes (1976) geht aus den Aufzeichnungen nicht klar hervor, ob die Daten auf Schätzungen beruhen oder ob diese gemessen wurden (Steiner und Frischknecht 2007). Trotz der zeitlichen Lücke zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Daten aus beiden Publikationen liegt die absolute Abweichung bei 5 %. Daraus leiten Steiner und Frischknecht (2007) ab, dass es sich um verlässliche Daten handelt. Aufgrund des Alters des Datensatzes sowie der zugrunde liegenden Referenzdaten ist allerdings zweifelhaft, ob moderne Zerspanungsprozesse nach aktuellem Stand der Technik adäquat mit den betrachteten ecoinvent-Datensätzen bzw. mit den zugrunde liegenden Energiebedarfsangaben abgebildet werden können.<sup>40</sup> Zudem wird bei der Quantifizierung des Energiebedarfs nicht auf die Verbrauchergruppen der Werkzeugmaschinen eingegangen und somit auch nicht zwischen den konstanten und variablen Anteilen unterschieden, was auf die Blackbox-Modellierung der generischen Zerspanungsprozesse zurückzuführen ist.

Neben ecoinvent ist GaBi (2019) eine weitere LCA-Datenbank, die v. a. in der unternehmerischen Praxis häufig als Modellierungsgrundlage für das LCA verwendet wird. Innerhalb von GaBi (2019) wurden 10 Datensätze zu metallverarbeitenden Zerspanungsprozessen identifiziert, die in Anhang A.3, Tabelle 49, aufgelistet sind. Anders als bei ecoinvent (v3.8) werden in GaBi (2019) nicht die spezifischen Zerspanungsprozesse, wie bspw. ein Fräsprozess, modelliert, sondern lediglich ein allgemeiner Zerspanungsprozess (engl. machining). Dieser allgemeine Zerspanungsprozess wird als generalistischer Prozess für unterschiedliche Zerspanungsverfahren, wie z. B. Drehen, Fräsen, Bohren, verstanden. Eine Spezifizierung dieses Bearbeitungsprozesses wird nur durch die Wahl eines Sets an unterschiedlichen Materialien (Bearbeitung von Aluminium-Gussteilen, Aluminium, Titan, Gusseisen, hochlegierter Stahl) möglich sowie durch die Menge an abgetragenem Material. Einzig der Datensatz „steel turning (dt. Drehen von Stahl)“ weist eine Spezifikation hinsichtlich des Zerspanungsverfahrens auf. Die Datensätze sind als **Unit-Prozesse (UP)**<sup>41</sup> „gate-to-gate“ modelliert, deren LCI-Daten maßgeblich auf Industriedaten und in erforderlichen Fällen auf Sekundärdaten beruhen. Ein weiterer Unterschied zu den ecoinvent-Datensätzen liegt in der Berücksichtigung der Werkzeugmaschine und der Infrastruktur. Diese finden in GaBi keine Berücksichtigung, sondern der Prozess wird nur durch ein Set an Verbrauchsmaterialien (z. B. Druckluft, Energie, Schmieröl, bearbeitetes Material, Späne) charakterisiert. Die Gültigkeit der Datensätze wird in GaBi bis zum 01. Januar 2022 ausgewiesen (GaBi 2019). Der Referenzfluss der Datensätze aus GaBi (2019) wird als Masse des bearbeiteten Endproduktes, zumeist 1 kg, ausgewiesen. Der Inputfluss „Strom“ repräsentiert nur den eigentlichen Spanabtrag (ohne Berücksichtigung der Aufwendungen durch den Betrieb der Werkzeugmaschine). Dieser wird als Leistungsgröße in [MJ] modelliert (GaBi 2019). Es erfolgt keine Unterscheidung hinsichtlich konstanter und variabler

---

<sup>40</sup> Als weitere Einschränkung hinsichtlich der Nutzung zur Abbildung realer Zerspanungsprozesse werden durch Steiner und Frischknecht die Datenlücken hinsichtlich der Ressourcen Druckluft und Kühlmittel benannt. Da diese Hilfsmaterialien bei automatisierten Maschinen eine relevante Stellung einnehmen, werden die diesbezüglichen Daten lediglich mit den Angaben aus dem Datensatz „average machine operation“ angenähert (Steiner und Frischknecht 2007).

<sup>41</sup> Der Begriff Unit-Prozesse kann äquivalent zum Begriff „Prozessmodul“ verwendet werden und beschreibt das kleinste Prozesssystem, für welches im Rahmen des LCI Input- und Outputdaten erhoben werden (DIN EN ISO 14040:2006).

Energiebedarfsanteile. Die generischen Zerspanungsprozesse werden ebenfalls als Black-Box modelliert.

Die analysierten konventionellen LCA-Datenbanken, ecoinvent (v3.8) und GaBi (2019), stellen somit durchschnittliche LCI-Datensätze für Zerspanungsprozesse zur Verfügung, die nicht den TED entsprechend der Definition aus Kapitel 2.2.2 abbilden. Als Referenzfluss wird entweder eine definierte Menge an abgespanntem Material (vgl. ecoinvent v3.8) gewählt oder die Masse des bearbeiteten Endproduktes (vgl. GaBi 2019). Eine solche Wahl des Referenzflusses, wie in Kapitel 2.1.1.1 und in Kapitel 2.2.2 erläutert, kann allerdings keinen linearen Zusammenhang zum Energiebedarf im Sinne des TED transportieren.

Durch das der Arbeit zugrunde liegende Forschungsziel, den Energiebedarf von Zerspanungsprozessen ganzheitlich entsprechend den Anforderungen des LCA zu modellieren, ist eine Verwendung der generischen LCI-Datensätze aus ecoinvent (v3.8) und GaBi (2019) oder eine Anlehnung an deren Modellierungsweise aufgrund der aufgeführten Schwächen nicht zielführend und kann auch nicht für die unternehmerische Praxis, z. B. als Grundlage für das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting, empfohlen werden. Daher besteht die Notwendigkeit, eine methodische Herangehensweise – abgestimmt auf den Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit – zu entwickeln, welche nicht nur die Abbildung des TED zum Ziel hat, sondern auch die Herstellung eines linearen Zusammenhangs zwischen der gewählten FU und dem TED auf Basis eines geeigneten Referenzflusses garantiert sowie die konstanten und variablen Energiebedarfsanteile explizit berücksichtigt.

### **2.3.2 Analyse themenbezogener LCA-Studien**

Durch die Erweiterung der europäischen Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Ökodesign-Richtlinie), gewann das Thema der Energieoptimierung und -effizienz von Werkzeugmaschinen erheblich an Relevanz (Reinhardt 2013). Mittels einer Literaturrecherche wurden gezielt Veröffentlichungen zum Thema „LCA von Zerspanungsprozessen“ zusammengetragen und hinsichtlich ihrer Relevanz anhand der vorhandenen Informationen aus dem Abstract extrahiert. Weitere Informationen zur Literaturrecherche sowie die Synthese der Analyseergebnisse finden sich in Anhang A.4.

Bei der Literaturanalyse wurden die Studien zunächst hinsichtlich ihrer Zielabsicht der Forschungsfrage unterschieden in vergleichende und nichtvergleichende LCA-Studien und LCA-Studien, die methodische Ansätze entwickeln. Dabei konnte gezeigt werden, dass es sich bei den untersuchten Studien vorwiegend um vergleichende LCA-Studien handelt: Während Khanna et al. (2021), Furberg et al. (2020) und Vukelic et al. (2020) die Auswirkung auf die untersuchten Umweltwirkungen durch die Variation von Bearbeitungsparametern (z. B. Schnittgeschwindigkeit) und Werkzeugen vergleichen, adressieren DeBoer et al. (2021), Kafara et al. (2017), Faludi et al. (2015), Shah et al. (2021a) und Serres et al. (2011) den Vergleich unterschiedlicher Fertigungstechnologien. Khanna et al. (2021), Gupta et al. (2020), Campitelli et al. (2019), Mia et al. (2019), Lu et al. (2018), Pereira et al. (2016), Ginting et al. (2015) und Fratila (2010) behandeln den Vergleich verschiedener Kühlschmierstoff-Strategien. Demgegenüber wurden nachfolgende nichtvergleichende LCA-Studien identifiziert: Grünebaum et al. (2019) betrachten die lebenszyklusübergreifenden Phaseneinflüsse bei der Werkzeugherstellung, Narita et al. (2008) entwickeln einen Umweltbelastungsanalysator für den Betrieb von Werkzeugmaschinen unter verschiedenen Bedingungen der Kühlschmierstoffversorgung und Filletti et al. (2017) stellen ein kombiniertes LCA-Hybridmodell und Echtzeit-Überwachungssystem vor. Unter den LCA-Studien, die eine Methodenentwicklung fokussieren, präsentieren Eisenträger und Schiefer (2019)

eine Methodik zur parametrisierten Kurzbilanzierung spanend zu fertiger Bauteile, Reinhardt (2013) schlägt ein Bilanzierungs- und Bewertungsvorgehen des Ressourcenbedarfs von Fertigungssystemen vor und Kellens et al. (2012b) präsentieren eine Methodik zur generischen Erstellung von UPLCI-Datensätzen für Fertigungsprozesse im Rahmen der CO<sub>2</sub>PE!-Initiative<sup>42</sup>. Filleti et al. (2017) und Duflou et al. (2011) integrieren den bzw. gründen auf dem von Kellens et al. (2012a) vorgestellten methodischen Ansatz.

Die Wahl der FU und des zugrunde liegenden Referenzflusses ist entscheidend für die Nutzungsmöglichkeiten bzw. die Wiederverwendbarkeit eines LCI-Datensatzes. In den analysierten LCA-Studien ist die FU entweder produktbasiert (ein gefertigtes Produkt) (z. B. DeBoer et al. 2021; Grünebaum et al. 2019) oder basiert auf technischen Parametern (z. B. abgespannte Materialmenge oder Fläche) (z. B. Khanna et al. 2022; Shah et al. 2021a). Zwei der Studien (Khanna et al. 2021; Vukelic et al. 2020) wählen eine zeitbezogene FU (1 Minute bzw. 1 Stunde Spanen). Eine solche FU könnte als linear zum TED angesehen werden, sofern sichergestellt wird, dass der durchschnittliche Energiebedarf pro Zeiteinheit, der alle Energiebedarfsanteile berücksichtigt, abgebildet werden kann. Da die Autoren diese FU nur aus Gründen der Praktikabilität wählen und nicht den TED entsprechend der Definition aus Kapitel 2.2.2 berücksichtigen, wird in den genannten Studien kein linearer Zusammenhang zwischen der FU und dem TED hergestellt. Bis auf Campitelli et al. (2019), Filleti et al. (2017), Kellens et al. (2012b) und Duflou et al. (2011) unterscheiden die identifizierten Studien zudem nicht explizit zwischen der FU und dem zugrunde liegenden Referenzfluss. Während Campitelli et al. (2019) die eigentliche Prozessdurchführung als Referenzfluss wählen, wählen Filleti et al. (2017) die Menge an abgespanntem Material, ähnlich zu der jeweils gewählten FU. Sowohl Kellens et al. (2012b) als auch Duflou et al. (2011) unterscheiden explizit zwischen der FU, also dem hergestellten Produkt, und dem Referenzfluss. Als Referenzfluss schlagen sie einen zeitbasierten *“reference flow of 1 s of processing time for a specified load level [...] for a specified material”* (Kellens et al. 2012b) sowie die damit implizierte anteilige Berücksichtigung aller unproduktiven Betriebszustände vor. Der durchschnittliche Energiebedarf pro Sekunde wird für jeden Betriebszustand durch die durchschnittliche Leistung in Verbindung mit den betriebszustandsspezifischen mittleren Zeitanteilen ermittelt. Die Leistungsdaten werden dabei mittels einer Primärdatenmessung auf Maschinenebene erhoben (Kellens et al. 2012b). Die Formel sowie weitere Informationen zur Berechnung der Referenzsekunde sind im Anhang A.5, Tabelle 53 dargestellt.

Während alle identifizierten Studien den Energiebedarf (bzw. Strombedarf) als Inputfluss innerhalb der LCA-Modellierung berücksichtigen, liegt der Fokus der meisten Studien auf der Untersuchung des eigentlichen Zerspanungsvorgangs oder dem Betriebszustand „Bearbeitung“ (Khanna et al. 2022; DeBoer et al. 2021; Khanna et al. 2021; Shah et al. 2021a; Furberg et al. 2020; Gupta et al. 2020; Vukelic et al. 2020; Campitelli et al. 2019; Eisenträger und Schiefer 2019; Mia et al. 2019; Grünebaum et al. 2019; Filleti et al. 2017; Kafara et al. 2017; Pereira et al. 2016; Ginting et al. 2015; Reinhardt 2013; Serres et al. 2011; Fratila 2010; Narita et al. 2008). Bei den Studien, die den Systemrahmen auf alle Betriebszustände ausweiten (Lu et al. 2018; Faludi et al. 2015; Kellens et al. 2012a; Duflou et al. 2011) wird die Werkzeugmaschine nur als Blackbox berücksichtigt. Es findet somit keine Unterscheidung zwischen den Energiebedarfsanteilen der konstanten und der variablen Verbrauchergruppen statt.

---

<sup>42</sup> Die CO<sub>2</sub>PE!-Initiative – ein Konsortium aus internationalen Universitäten und Forschungseinrichtungen – hat die Dokumentation und Analyse der Umweltwirkungen eines möglichst breiten Spektrums an Fertigungsprozessen zum Ziel. Darauf aufbauend sollen potenzielle Handlungsmöglichkeiten zur Reduzierung dieser Umweltwirkungen abgeleitet werden (Kellens et al. 2010).

Drei Studien entwickeln eine Methodik zur Bilanzierung von Fertigungs- bzw. Zerspanungsprozessen:

- (i) die parametrisierte Kurzbilanzierung spanend zu fertigender Bauteile im Rahmen des EcoDesign (Eisenträger und Schiefer 2019; Schiefer et al. 2017; Schiefer 2001),
- (ii) die Ressourcenbedarfsbilanzierung und -bewertung von Fertigungssystemen (Reinhardt 2013) sowie
- (iii) der systematische Ansatz zur Erstellung von UPLCI-Datensätzen für Fertigungsprozesse entsprechend der Methode der CO<sub>2</sub>PE!-Initiative (Kellens et al. 2012b, 2012a; Dufloy et al. 2011).

Diese werden im Folgenden jeweils kurz vorgestellt sowie im Hinblick auf das eigene Forschungsinteresse kritisch gewürdigt.

(i) Im Forschungsprojekt „Kurzbilanzierung von Fertigung und Abfallbehandlung beim EcoDesign (EcoScreen)“ wurde ein parametrisierter Ansatz für das LCI entwickelt, mit welchem der Ressourcenbedarf eines Zerspanungsproduktes bereits im Stadium der Produktplanung quantifiziert werden kann (Eisenträger und Schiefer 2019; Schiefer et al. 2017). Das resultierende EcoDesign-Werkzeug ist ein in die LCA-Software openLCA integrierbares Sachbilanzmodell, durch welches parametrisiert spanend zu fertigende Bauteile bilanziert werden können. Da jede konstruktionstechnische Änderung eines Produktes einen direkten Einfluss auf die Umweltwirkung hat, soll das Kurzbilanzierungs-Tool als solides Abschätzungsmodell der Umweltwirkung innerhalb der Produktentwicklung dienen. Dieses soll Entwickler dazu befähigen, hinreichend genaue Umweltkriterien in Entscheidungsprozesse innerhalb der Produktentwicklung zu integrieren. Dabei werden vollständige und parametrisierte Sachbilanzdatensätze der LCI zugrunde gelegt, welche nicht nur alle Teilprozesse, wie z. B. Transportprozesse oder die KSS-Aufbereitung, einschließen, sondern auch relevante vor- und nachgelagerte Prozesse des Hintergrundsystems berücksichtigen. Der Anwendende kann den LCI-Datensatz mittels **Gestaltparametern**<sup>43</sup> des Bauteils so anpassen, dass durch die spezifischen Bauteileigenschaften des eigenen Produktes die resultierenden Umweltwirkungen innerhalb der LCIA in Form von Eco-Indicator-Werten schnell abgeschätzt werden können (Eisenträger und Schiefer 2019; Schiefer et al. 2017). Die Grundlagen hierzu lieferten v. a. die Vorarbeiten durch Schiefer (2001): Hierbei wurde ein detailliertes Vorgehen zur standardisierten Bilanzierung der unterschiedlichen materiellen betrieblichen Ressourcen von Zerspanungsprozessen vorgestellt, welches es ermöglicht, Sachbilanzdaten von spanend herzustellenden Produkten betriebsübergreifend vergleichbar zu erheben bzw. abzuschätzen. Die Methode ist auf alle Fertigungsprozesse entsprechend dem Verständnis nach DIN 8580:2003 übertragbar und bildet den Ressourcenbedarf auf Produktebene ab.

#### *Kritische Würdigung von (i)*

Die Stärke des Ansatzes (Eisenträger und Schiefer 2019; Schiefer et al. 2017; Schiefer 2001) liegt in der ganzheitlichen und übertragbaren Modellierung aller relevanten materiellen betrieblichen Ressourcen von Fertigungsprozessen als Basis für die Sachbilanzierung von Zerspanungsprodukten. Durch die klare Beschreibung der mathematischen Bemessung bzw. Abschätzung der einzelnen Ressourcenverbräuche in Schiefer (2001) ist der strukturierte Ansatz als transparent und praxisorientiert zu bewerten. Auch das zugrunde liegende Modell zur Bemessung der Emissionen in den Arbeitsraum und in die Umwelt, die durch die Fertigungsprozesse verursacht werden (gasförmige und flüssige Emissionen sowie Lärm), zur Abschätzung des Humantoxizitätspotenzials (Wirkungskategorie) stellt ein Alleinstellungsmerkmal

---

<sup>43</sup> Gestaltparameter des Bauteils sind nach Schiefer et al. (2017) z. B. der Werkstoff und das Fertigteilegewicht in kg, die Fertigteileoberfläche in dm<sup>2</sup>, oder das Gewicht des abgetragenen Spanvolumens in kg.

der Arbeit dar (Schiefer 2001). Durch die Ausrichtung auf die Zerspanungsprodukte wird der Ressourcenbedarf der zugrunde liegenden Prozesse nur auf Werkzeugmaschinenebene benötigt und demnach auf dieser Aggregationsebene bilanziert. So wird bspw. bei der Bilanzierung des Energiebedarfs berücksichtigt, dass sich dieser in Abhängigkeit von Haupt- und Nebenzeiten der einzelnen Werkzeugmaschine neben der eigentlichen Zerspanungsenergie auch durch unterschiedliche Leistungsphasen (u. a. Grundleistung, Leerlaufleistung) bedingt. Eine detailliertere Analyse des Energie- und Leistungsbedarfs des Zerspanungsprozesses bzw. der Werkzeugmaschine auf Ebene von Verbrauchergruppen oder in Bezug auf die unterschiedlichen Betriebszustände einer Werkzeugmaschine findet nicht statt. Der Fertigungsprozess kann so hinsichtlich der genannten Leistungsphasen charakterisiert werden, ein transparentes Systemverständnis des Prozesses auf Basis des Leistungsbedarfs der einzelnen Verbrauchergruppen (auch hinsichtlich der variablen und konstanten Anteile) und in Bezug auf die nichtwertschöpfenden Betriebsphasen ist aus dem resultierenden LCI-Datensatz allerdings nicht ableitbar.

(ii) Ziel des LCA von Fertigungssystemen ist laut Reinhardt (2013) der Vergleich unterschiedlicher Systemalternativen und die Entscheidungsunterstützung auf Mikro-Ebene<sup>44</sup>. Vor diesem Hintergrund entwickelte die Autorin eine Methode zur Bilanzierung und Bewertung des Bedarfs aller materiellen betrieblichen Ressourcen ganzer Fertigungssysteme. Die Arbeit adressiert dabei die Transparenzschaffung der Effizienz des Ressourcenverbrauchs von Fertigungssystemen, um damit die Grundlage für „eine effektive Optimierung“ (Reinhardt 2013) zu schaffen. Im Rahmen des LCIA wird eine Erweiterung der herkömmlichen Methode durch die Autorin entwickelt, die es dem Unternehmen ermöglicht, individualisierte Schwerpunkte innerhalb der Umweltbewertung zu setzen. Dies erfolgt auf Basis von wählbaren Ressourceneffizienz-Kriterien und der daraus resultierenden Entwicklung von betriebsrelevanten „Ressourcenfaktoren“, vergleichbar mit Umweltwirkungsfaktoren. Die theoretischen Ergebnisse wurden durch Reinhardt in ein Softwaretool integriert, welches Unternehmen zur Bewertung der Ressourceneffizienz des eigenen Fertigungssystems nutzen können. Aus dem Modellierungsansatz wurde zudem eine Kennzahl abgeleitet, welche das Maß der Ressourceneffizienz eines Fertigungsprozesses bzw. eines Fertigungssystems widerspiegelt. Die Ressourceneffizienzkennzahl setzt sich aus zwei eigenständigen Effizienzkennzahlen zusammen: der Energieeffizienz und der Materialeffizienz. Die Ressourceneffizienz-Kennzahl soll der Entscheidungsunterstützung innerhalb der Planungsphase sowie Status-Quo- bzw. Ist-Analysen von bestehenden Fertigungssystemen dienen. Die generische Methode ist auf alle Fertigungstechnologien entsprechend dem Verständnis nach DIN 8580:2003 übertragbar. Der Bedarf aller materiellen betrieblichen Ressourcen wird bei Reinhardt (2013) dabei entsprechend dem Verständnis nach DIN EN ISO 14040:2020 bzw. DIN EN ISO 14044:2020 gate-to-gate für das Vordergrundsystem mathematisch mit Hilfe der Matrizenrechnung modelliert.

#### *Kritische Würdigung von (ii)*

Das generische Vorgehen zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungssystemen zeichnet sich vor allem durch die transparente Modellierung der Ressourcenverbräuche mit Hilfe von Matrizen aus. Mittels der systemtheoretischen Beschreibung der Systemelemente kann die Methode auf sämtliche Fertigungsketten entsprechend dem Verständnis nach DIN 8580:2003 angewendet werden. Der Modellierungsschwerpunkt liegt auf Maschinen- bzw. Produktebene. Hintergrundinformationen bzgl. der Prozessabläufe, wie sich bspw. der Energieinput eines Fertigungsprozesses zusammensetzt, sind

---

<sup>44</sup> Entsprechend dem Verständnis der Europäischen Kommission, des Joint Research Centers und dem Institute for Environment and Sustainability über die drei archetypischen Zielsituationen der Entscheidungsunterstützung (European Commission et al. 2010).

aus den generierten Datensätzen nicht ableitbar. Reinhardt betont, dass es durch die entwickelte Systematisierung bei der Auswahl des Nutzens des Fertigungssystems und der damit verbundenen Definition der FU möglich ist, unterschiedliche Produktionsketten (gleichen Nutzens) miteinander zu vergleichen. Allerdings ist dieser Vergleich nur haltbar, wenn der Nutzen bzw. die FU gleichzusetzen sind mit der Fertigung eines spezifischen Produktes. Auf die genaue Definition des Referenzflusses sowie dessen Abgrenzung zur FU wird in der Arbeit nicht eingegangen. Die Berücksichtigung der Adressatenanforderungen innerhalb des LCIA erschwert bzw. erlaubt keine nachgelagerten, außerbetrieblichen Vergleiche der ermittelten Umweltwirkungen. Zudem fehlt es dem Ansatz an weiteren Unterscheidungsmerkmalen (z. B. kategorisierte Ausweisung des Ressourcenbedarfs nach Verbrauchergruppen), die den Prozessablauf auf Aggregatsebene einer Werkzeugmaschine charakterisieren. Unproduktive Phasen der Fertigungssysteme in Form von unproduktiven Betriebszuständen der Werkzeugmaschinen finden im Ansatz keine Berücksichtigung – somit findet keine Modellierung des TED statt – genauso wenig wie die Berücksichtigung bzw. explizite Ausweisung der konstanten und variablen Anteile des Energiebedarfs im Sinne einer Whitebox-Modellierung.

(iii) Eine systematische Methodik zur Erstellung von LCI-Datensätzen für Fertigungsprozesse wurde durch Kellens et al. (2012b) im Rahmen des Verbundforschungsprojektes CO<sub>2</sub>PE! entwickelt (Kellens et al. 2012a, 2012b). Die Bemühungen des internationalen Konsortiums zielen darauf ab, Umweltwirkungen, die aus der Nutzungsphase von Werkzeugmaschinen resultieren, strukturiert und systematisch zu analysieren und zu dokumentieren. Der entwickelte LCI-Ansatz dient dabei sowohl der Generierung von LCI-Datensätzen von Produkten als auch der Anwendung durch Werkzeugmaschinenentwickler, Umweltauswirkungen spezifischer Fertigungsprozesse zu bemessen. Die Anleitung zur generischen Datensatzgenerierung verfolgt das Ziel, Prozesse als UP strukturiert zu modellieren. Diese können in bestehende LCA-Datenbanken integriert werden und sollen dazu beitragen, die große Landschaft an unterschiedlichen Fertigungsprozessalternativen und deren Umweltwirkungen mittels des LCA abbilden zu können. Je nach vorhandener Datenverfügbarkeit können zwei generische Ansätze zur Modellierung der UP im Rahmen des LCI herangezogen werden: der (I) „Screening Approach“ sowie der (II) „In Depth Approach“. Während der (I) Screening Approach die Idee verfolgt, approximierte LCI-Datensätze basierend auf repräsentativen Sekundärdaten bzw. technischen Berechnungen mit einem relativ geringen Aufwand und niedrigem Detaillierungsgrad zu erstellen, wird beim (II) In-Depth Approach eine Anleitung zur detaillierten LCI-Datensatzgenerierung von einzelnen Fertigungsprozessen gegeben. Dabei wird bei Letzterem die Gesamtuntersuchung mittels nachfolgenden vier Detailanalyseschritten durchgeführt: Zeitstudie, Stromverbrauchsstudie, Verbrauchsmaterialstudie sowie Emissionsstudie (Kellens et al. 2012a, 2012b).

#### *Kritische Würdigung von (iii)*

Die Stärke der Methode, v. a. vom In-Depth-Approach, liegt eindeutig in der strukturierten und ganzheitlichen Betrachtung des Verbrauchs aller materiellen betrieblichen Ressourcen. Während der Energiebedarf für alle Betriebszustände anteilig berücksichtigt wird, werden die übrigen materiellen betrieblichen Ressourcen nach ihrem Gesamtbedarf analysiert. Primärdaten, die direkt durch Messungen an der Werkzeugmaschine gewonnen werden, sollen die Genauigkeit der LCI-Datensätze erhöhen. Kellens et al. (2012a, 2012b) beziehen den Referenzfluss zudem auf eine zeitliche Dimension: Im Rahmen der Stromverbrauchsstudie wird für jeden einzelnen Betriebszustand der Werkzeugmaschine messtechnisch ein durchschnittlicher Leistungsbedarf pro Sekunde bestimmt, welcher mit den entsprechenden Zeitanteilen der unterschiedlichen Betriebszustände zum eigentlichen Energiebedarf verrechnet werden kann. Der Energiebedarf für die Erbringung der FU bestimmt sich nachfolgend aus den Aufwendungen während des eigentlichen Bearbeitungsvorgangs

zuzüglich der anteiligen Aufwendungen der anderen Betriebszustände. Was den Autoren durch diese Definition des Referenzflusses und der FU im Vergleich zu allen anderen analysierten Studien gelingt, ist die gleichzeitige Berücksichtigung aller Energieaufwendungen in Form des TED und die Herstellung eines linearen Zusammenhangs zwischen dem TED und der FU (vgl. Kapitel 2.1.1.1 und 2.2.2). Ein Nachteil der parametrisierten Methode ist jedoch in dem Umstand begründet, dass die empfohlene Analyseebene des Energiebedarfs auf Maschinenebene liegt. Für jeden Zerspanungsprozess resp. für jedes Produkt muss somit gesondert der durchschnittliche Leistungsbedarf des Betriebszustandes „Bearbeitung“ messtechnisch erfasst werden. Der Ansatz fordert ebendiese messtechnische Erfassung nur auf Maschinenebene als Einzelwert ein. Obwohl durch die Autoren eine detaillierte Dokumentation der Fertigungsbedingungen (z. B. Art und Dauer der Betriebszustände) gefordert ist, kann dadurch kein eindeutiges Systemverständnis des Fertigungsprozesses aufgebaut werden. Da bspw. keine Konstruktionsmerkmale der Werkzeugmaschine oder relevanter Subprozesse auf Aggregatsebene in Form von Verbrauchergruppen berücksichtigt werden, ist aus den LCI-Datensätzen nicht ersichtlich, wie sich die Verbräuche zusammensetzen und wo deren Ursachen liegen. Auch eine Unterscheidung zwischen konstanten und variablen Verbrauchsanteilen ist somit nicht ableitbar, wodurch die gewonnenen Primärdaten für Nachfolgeuntersuchungen nicht wiederverwendet werden können (Blackbox-Modellierung).

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass derzeit kein lebenszyklus- und praxisorientierter Modellierungsansatz existiert, welcher die Anforderungen vereint, den TED abzubilden, einen linearen Zusammenhang zwischen der FU und dem TED auf Basis der Wahl eines adäquaten Referenzflusses herzustellen sowie die konstanten und variablen Energiebedarfsanteile der Werkzeugmaschine zu berücksichtigen. Bestehende Ansätze lassen somit keine Wiederverwendung von aufwendig erhobenen Primärdaten mit dem Ziel einer praxisorientierten Anwendung zu.

## **2.4 Ableitbare technologische und methodische Anforderungen**

Das LCA ist eine verbreitete Methode zur Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten, Dienstleistungen oder Technologien, auch im Bereich der Fertigung. Durch

- die Betrachtung der Vorgehensweise des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 auf Basis der Grundlagenmethode LCA und der in der Norm definierten Anforderungen, v. a. in Bezug auf die Bilanzierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen (vgl. Kapitel 2.1),
- die Untersuchung der Zusammensetzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen (vgl. Kapitel 2.2) sowie
- durch die Analyse von LCI-Datensätzen aus konventionellen LCA-Datenbanken und themenbezogener LCA-Studien (Kapitel 2.3)

können nachfolgende methodische und technologische Anforderungen an den anvisierten lebenszyklus- und praxisorientierten Energiemodellierungsansatz formuliert werden.

### 1. Anforderung: Ganzheitliche Energiebedarfsermittlung – Bilanzierung des TED

Das LCA verfolgt das Ziel, die Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus eines Produktes, eines Prozesses oder einer Dienstleistung ganzheitlich zu bewerten (DIN EN ISO 14040:2020). Daher ist die Folgerung in Bezug auf die Bilanzierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen naheliegend, alle Aufwendungen innerhalb der Modellierung miteinzubeziehen, die im Zusammenhang mit der Fertigungsaufgabe stehen (vgl. Kellens et al. 2012b). So soll nicht nur der Energiebedarf der eigentlichen Zerspanung berücksichtigt werden, sondern auch der Aufwendungen zum Betrieb der



Werkzeugmaschine und der anteiligen Aufwendungen der unproduktiven Betriebszustände, die die Werkzeugmaschine während eines definierten Betriebszyklus durchläuft. Denn die Bearbeitung eines Werkstücks kann auf einer Werkzeugmaschine nur durchgeführt werden, wenn die Werkzeugmaschine u. a. angefahren bzw. aufgewärmt und betriebsbereit ist. Die Bilanzierung des TED – mit den Systemgrenzen entsprechend der in Kapitel 2.2.3 definierten Kategorie 3 – wird somit zur ersten Anforderung, die der zu entwickelnde Modellierungsansatz erfüllen muss.

## 2. Anforderung: Herstellung eines transparenten und linearen Zusammenhangs zwischen FU und TED

Aus der Analyse des Gesamtenergiebedarfs von Zerspanungsprozessen in Kapitel 2.2.2 und unter Berücksichtigung der axiomatischen Bedingung, dass alle Ergebnisse einer LCA-Studie eine lineare Funktion der Einheit der FU darstellen müssen (Heijungs 1998) (vgl. Kapitel 2.1.1.1) kann abgeleitet werden, dass bei einer lebenszyklusorientierten Modellierung des TED eines Zerspanungsprozesses sich dieser mittels einer linearen Beziehung zur FU darstellen lassen muss. Dies stellt die zweite Anforderung für den zu entwickelnden Modellierungsansatz dar.

Die untersuchten LCA-Studien für Zerspanungsprozesse und die analysierten LCI-Datensätze aus konventionellen LCA-Datenbanken referenzieren häufig auf eine abgespannte Materialmenge in variierender Form (Masse, Oberfläche, Volumen) oder auf das bearbeitete Endprodukt. Dabei wird häufig diese Wahl der FU mit der Wahl desselben Referenzflusses gleichgesetzt, ohne eine dezidierte Definition oder die Unterscheidung zwischen der FU und dem Referenzfluss auszuweisen. Zudem wird meist nicht der TED in Form des Inputflusses „Strom“ berücksichtigt, sondern ein Energiebedarfsanteil entsprechend der Kategorie 1 oder der Kategorie 2 (vgl. Kapitel 2.2.3). Der Energiebedarf des eigentlichen Materialabtrags oder des Betriebszustands „Bearbeitung“ stellt nur einen Anteil des TED dar. Denkbar wäre, dass für solche Modellierungsansätze der jeweilige prozessspezifische TED anstelle der bisherigen Energiebedarfsanteile berücksichtigt werden könnte, um die Modellierungsgenauigkeit zu erhöhen. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass der TED als integrierter Einzelwert nicht die Hintergrundinformationen transportiert, die für ein prozessbezogenes Systemverständnis notwendig sind (Whitebox-Modellierung). Zudem wurde in Kapitel 2.2.2 gezeigt, dass es in Abhängigkeit der Maschinenauslastung keinen linearen Zusammenhang zwischen der abgespannten Materialmenge und dem TED eines Zerspanungsprozesses gibt. Bei der lebenszyklusorientierten Modellierung des TED von Zerspanungsprozessen kann somit nur eine prozessbezogene oder produktbezogene FU gewählt werden, insofern sich diese mittels eines geeigneten Referenzflusses abbilden lässt. Dieser muss dabei alle Energieaufwendungen, die mit dem Zerspanungsprozess bzw. der Fertigung des Produktes in Zusammenhang stehen, disaggregiert berücksichtigen und kann nur dadurch das nötige Systemverständnis des Zerspanungsprozesses transportieren.

Die Darstellung des Referenzflusses mittels einer zeitlichen Bezugseinheit, wie im Rahmen der CO<sub>2</sub>PEI-Methodik nach Kellens et al. (2012b) vorgeschlagen, bietet hier eine geeignete Möglichkeit (vgl. Kapitel 2.3.2). Die „Referenzsekunde“ [kWh/s]<sup>45</sup> berücksichtigt dabei den Energiebedarf des Betriebszustands „Bearbeitung“ inkl. der anteiligen Energieaufwände aller durchlaufenen unproduktiven Betriebszustände einer Werkzeugmaschine innerhalb eines definierten Betriebszyklus. Der Vorteil eines solchen Referenzflusses ist dabei weniger in dem Endergebnis, als in der disaggregierten Darstellungsweise der Berechnung zu sehen: Diese berücksichtigt sowohl die einzelnen charakteristischen mittleren Leistungsbedarfe der unterschiedlichen Betriebszustände als auch die jeweiligen Zeitanteile der durchlaufenen Betriebszustände separat, wodurch diese wertvollen

---

<sup>45</sup> Die Formel zur Berechnung des durchschnittlichen Energiebedarfs des Referenzflusses in Form einer Referenzsekunde nach Kellens et al. (2012b) ist in Tabelle 53 gelistet.

Hintergrundinformationen den Untersuchungsgegenstand betreffend transportiert werden können. Nachteil der durch Kellens et al. (2012b) vorgeschlagenen Modellierungsform des Referenzflusses ist die Nichtberücksichtigung der (konstanten und variablen) Verbrauchergruppen innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“. Die Leistungsbedarfe der Verbrauchergruppen müssen zur Schaffung eines detaillierten Systemverständnisses noch disaggregiert in die mathematische Formulierung des Referenzflusses eingegliedert werden. Als FU kann dann z. B. ein Fertigungsschritt (z. B. Fräsen von  $X \text{ m}^3$  Material) oder die Fertigung eines spezifischen Produktes gewählt werden, welche durch die entsprechende Skalierung der „Referenzsekunde“ abgebildet werden kann.

### 3. Anforderung: Wiederverwendbarkeit der LCI-Daten durch Modularisierung und Parametrisierung – Abbildung der konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände

Bei den untersuchten LCA-Studien findet fast ausschließlich eine Modellierung auf Maschinen-, Prozess- bzw. Produktebene statt (Kapitel 2.3.2).<sup>46</sup> Hierdurch werden LCI-Datensätze generiert, die nur für einen spezifischen Untersuchungsgegenstand (Fertigungsprozess, Produkt) Gültigkeit besitzen. Vor allem im Bereich der Energiebedarfsmodellierung ist festzustellen, dass der Energiebedarf häufig nur aggregiert für den Untersuchungsgegenstand ausgewiesen und somit als Blackbox modelliert wird. Vereinzelt gehen bestehende Methoden auf die unterschiedlichen Betriebszustände der Werkzeugmaschinen ein (z. B. Kellens et al. 2012b). Die Leistungsmessung erfolgt dabei i. d. R. nur am Hauptschalter der Werkzeugmaschine (vgl. Kellens et al. 2012b). Eine Berücksichtigung der konstanten und variablen Verbrauchergruppen auf Aggregatsebene der Werkzeugmaschine findet nicht statt.

Aus dieser generellen Spezifität der Modellierung eines bestimmten Zerspanungsprozesses und dessen Energiebedarf leitet sich der Mangel an Übertragungsmöglichkeiten bestehender LCI-Datensätze auf ähnliche Anwendungsfälle ab. Teils durch Aggregation von Ressourcenströmen, teils durch eine unzulängliche Dokumentation, ist kein eingehendes Systemverständnis der komplexen Fertigungsprozesse aus solchen Blackbox-Modellen ableitbar. Durch die Intransparenz können somit weder die Datensätze noch Einzelinformationen/Daten für die Abbildung weiterer ähnlicher Fertigungsprozesse wiederverwendet werden. Diese „Verschwendung“ wird dem Wert der zugrunde liegenden wertvollen Primärdaten nicht gerecht, da diese i. d. R. durch zeit- und kostenintensiven Messkampagnen im Fertigungsumfeld erhoben werden (Beermann und Wick 2019).

Mittels eines modularen und parametrisierten Ansatzes soll daher der Energiebedarf im Rahmen des LCI disaggregiert erfasst werden. Wie bereits in Kapitel 2.2 gezeigt, hat der Betriebszustand „Bearbeitung“ insbesondere bei hoher Maschinenauslastung den bestimmenden Anteil am TED. Dieser Anteil bedingt sich durch die Einflüsse der konstanten und der variablen Verbrauchergruppen. Daher ergibt sich die Notwendigkeit, dass die konstanten und variablen Anteile innerhalb der Erfassung nicht nur unterschieden werden, sondern auch explizit voneinander ausgewiesen werden. Aus dieser disaggregierten, modularen und parametrisierten Bilanzierung des TED, bei welcher zwischen dem Energiebedarf der konstanten und variablen Verbrauchergruppen sowie dem Energiebedarf der unterschiedlichen Betriebszustände einer Werkzeugmaschine entsprechend einer Whitebox-Modellierung unterschieden wird, sollen aus Primärdatenerhebungen wiederverwendbare LCI-Datensätze generiert werden, die aufwendige Messkampagnen für Nachfolgeuntersuchungen an der jeweiligen Werkzeugmaschine überflüssig machen. Die Berücksichtigung der konstanten und variablen

---

<sup>46</sup> Von den untersuchten LCA-Studien (vgl. Anhang A.4) gehen lediglich Filletti et al. (2017) in ihrem methodischen Ansatz auf die Aggregatsebene ein. Allerdings wird hierbei lediglich der Betriebszustand „Bearbeitung“ berücksichtigt und es findet somit keine Modellierung des TED statt.

Energiebedarfsanteile stellt somit die dritte Anforderung an das zu entwickelnde Energiebedarfsmodell von Zerspanungsprozessen dar.

Die beschriebenen Anforderungen gelten ebenso für das anvisierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen und ergänzen bzw. konkretisieren die in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019. Neben den Überschneidungen der hier abgeleiteten und der normbedingten Anforderungen wird nachfolgend auch eine normbedingte Anforderung relativiert, die aufgrund der zuvor gewonnenen Erkenntnisse für das vorliegende Forschungsinteresse nur eine bedingte Relevanz besitzt:

- Die in der DIN EN ISO 14067:2019 angeführten Anforderungen „Relevanz“ und „Vollständigkeit“ (vgl. Kapitel 2.4, Anforderungen vi, vii) werden durch die oben beschriebene erste Anforderung „Ganzheitliche Energiebedarfsermittlung – Bilanzierung des TED“ methodisch vervollständigt und konkretisiert.
- Die in der DIN EN ISO 14067:2019 angeführte Anforderung „relativer Ansatz und funktionelle Einheit“ (vgl. Kapitel 2.4, Anforderung ii) wird durch die zweite Anforderung „Herstellung eines transparenten und linearen Zusammenhangs zwischen FU und TED“ erweitert.
- Die in der DIN EN ISO 14067:2019 angeführten Anforderungen „Konsistenz“ und „Genauigkeit“ (vgl. Kapitel 2.4, Anforderungen viii, ix) werden durch oben beschriebene dritte Anforderung „Wiederverwendbarkeit der LCI-Daten durch Modularisierung und Parametrisierung – Abbildung der konstante und variable Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände“ ergänzt. Dadurch wird die methodisch geforderte Detailtiefe und Systematik der normbedingten Anforderungen für den Untersuchungsgegenstand komplettiert.
- Die in der DIN EN ISO 14067:2019 angeführte Anforderung „Kohärenz“ (vgl. Kapitel 2.4, Anforderung xi), unter welchem die Einhaltung von an anderen Stellen standardisierten **Produktkategorieregeln (PKR)**<sup>47</sup> im Rahmen der Umweltkennzeichnung und -deklaration verstanden wird, besitzt im Rahmen des hier adressierten Forschungsschwerpunktes eine untergeordnete Bedeutung. Die Einhaltung der bereits anerkannten Normen und Anleitungen soll die Vergleichbarkeit der THG-Emissionen zwischen Produktkategorien fördern. Somit zielt der Grundsatz nur auf die Erstellung eines CFP ab, bei welchem das adressierte Produkt den PKR zugeordnet werden kann. Die Anforderung hat somit keinen Einfluss auf das Bilanzierungsvorgehen eines partiellen CFP im Sinne der Bilanzierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen.

Schlussfolgernd kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass kein Energiebedarfsmodellierungsansatz für Zerspanungsprozesse im Forschungsbereich des LCA existiert, welcher allen ermittelten technologischen und methodischen Anforderungen gerecht wird. Daher wird im Anschluss an dieses Kapitel das methodische Vorgehen vorgestellt, welche die Entwicklung eines solchen Modellierungsansatzes zum Ziel hat. Dieser soll sowohl den oben erläuterten Anforderungen entsprechen, als auch die Grundlage für das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen bilden.

---

<sup>47</sup> Unter einer Produktkategorie wird eine „Gruppe von Produkten mit gleichwertiger Funktion“ (DIN CEN ISO/TS 14027:2018) verstanden. Für die Entwicklung von Produktkategorieregeln (PKR) referenziert die DIN EN ISO 14067:2019 auf die Norm DIN CEN ISO/TS 14027:2018.

### 3 Methodisches Vorgehen

Die in Kapitel 2.4 abgeleiteten technologischen und methodischen Anforderungen an den zu entwickelnden lebenszyklus- und praxisorientierten Modellierungsansatzes des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen lauten wie folgt:

- (1) Ganzheitliche Energiebedarfsermittlung – Bilanzierung des TED,
- (2) Herstellung eines transparenten und linearen Zusammenhangs zwischen FU und TED sowie
- (3) Wiederverwendbarkeit der LCI-Daten durch Modularisierung und Parametrisierung – Abbildung der konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände.

In Zusammenhang mit den vorgestellten Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019 bzw. DIN EN ISO 14040:2020 und DIN EN ISO 14044:2020 bilden diese die Grundpfeiler der Methodenkonzeption zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage: *Wie gelingt eine praxisorientierte Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zur Unterstützung des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting in Unternehmen?*

Es soll ein ganzheitlicher, praxisorientierter, transparenter und übertragbarer Modellierungsansatz entwickelt werden, der durch die disaggregierte Darstellung der unterschiedlichen konstanten und variablen Energiebedarfsanteile ein eingehendes Systemverständnis des Zerspanungsprozesses und der Zerspanungsmaschine ermöglicht und eine Wiederverwendung von aufwendig zu erhebenden Primärdaten zulässt. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird dabei unter einem **transparenten**<sup>48</sup> Modellierungsansatz des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen verstanden, dass daraus klar ersichtlich und nachvollziehbar ist, wie sich dieser Energiebedarf zusammensetzt. Die **Nachvollziehbarkeit** setzt entsprechend des Verständnisses von Maucher (2011) eine eindeutige und präzise Darstellung voraus, welche auch für Nichtexperten verständlich ist. Dies soll wiederum die Anwendungsfreundlichkeit (Praxisorientierung) des theoretischen Ansatzes gewährleisten. Unter **Übertragbarkeit** wird darüber hinaus verstanden, dass der Modellierungsansatz für verschiedene Zerspanungsprozesse entsprechend der Definition nach DIN 8580:2003 auf unterschiedlichen Zerspanungsmaschinen anwendbar sein soll. Dies bedarf einer möglichst generischen, aber zugleich spezifischen Abbildung des Energiebedarfs des Zerspanungsprozesses und der damit verbundenen Hintergrundprozesse der Werkzeugmaschine. Dieses Ziel soll mit einem Modellierungsansatz erreicht werden, der den TED disaggregiert nach konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betriebszustände für einen definierten Betriebszyklus abbildet und welcher mit den methodischen Vorgaben des LCA und somit des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 vereinbar ist.

Das daraus resultierende methodische Vorgehen zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage basiert auf einem dreistufigen Vorgehen, welches die nachfolgenden drei Arbeitspakete (AP) umfasst:

- AP 1: Erweiterter Energiemodellierungsansatz – EEMA;
- AP 2: Integration des EEMA in LCI-Datensätze als Basis für das Carbon Accounting;
- AP 3: Modellversuch des systematischen Carbon Accounting Ansatzes;

---

<sup>48</sup> Transparenz steht bildungssprachlich für die Durchsichtigkeit, die Deutlichkeit einer Sache (Brockhaus 1999), im übertragenen Sinne für die Nachvollziehbarkeit eines Sachverhalts (DWDS 2021a).

Zudem soll in einem weiteren AP der Nutzen der entwickelten Methoden in Form des praxisorientierten EEMA und des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting Ansatzes für weitere unternehmensinterne Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden:

- AP 4: Weitere Anwendungsmöglichkeiten im Unternehmen.

Im Folgenden werden die AP jeweils näher beschrieben.

#### AP 1: Erweiterter Energiemodellierungsansatz – EEMA

Als methodische Basis für die Entwicklung des lebenszyklus- und praxisorientierten Energiemodellierungsansatzes soll die CO<sub>2</sub>PEI-Methodik nach Kellens et al. (2012b) herangezogen werden. Diese erfüllt zu großen Teilen die in Kapitel 2.4 erarbeiteten Anforderungen (1) und (2). Allerdings basiert der Ansatz auf einer Blackbox-Modellierung des Zerspanungsprozesses und lässt somit erstens kein detailliertes Systemverständnis sowie zweitens keine Wiederverwendung von aufwendig zu erhebenden Primärdaten zu (vgl. Kapitel 2.3.2 und Kapitel 2.4). Um diesen Nachteil auszugleichen, soll daher die CO<sub>2</sub>PEI-Methodik um ein detailliertes Energiebedarfsmodell für den Betriebszustand "Bearbeitung" erweitert werden, welches disaggregiert die konstanten und variablen Verbrauchergruppen einer Werkzeugmaschine berücksichtigt und im Folgenden als Inputmodell bezeichnet wird. Aufgrund des Mangels eines geeigneten Inputmodells im Bereich des LCA soll im ersten Schritt die Identifizierung eines passenden Ansatzes basierend auf einer strukturierten Evaluation bestehender Energiemodellierungsansätze von Zerspanungsprozessen aus dem Forschungsbereich Maschinenbau im Hinblick auf das vorliegende Forschungsinteresse erfolgen. Die CO<sub>2</sub>PEI-Methodik in Verbindung mit dem identifizierten Inputmodell bilden die Grundlagenmodelle des anvisierten Energiemodellierungsansatzes.

Zur modularen und parametrisierten Energiebedarfsermittlung im Sinne eines Whitebox-Modells bedarf es im zweiten Schritt zum einen der Definition sowie der Klassifizierung von konstanten und variablen Verbrauchergruppen sowie zum anderen der Definition möglicher Betriebszustände einer Werkzeugmaschine. Die jeweiligen Definitionen bzw. die Klassifikation der Verbrauchergruppen hinsichtlich ihrer konstanten bzw. variablen Charakteristik sollen dabei aus den Erkenntnissen bestehender Forschungsanstrengungen im Rahmen von spezifischen Literaturanalysen abgeleitet werden.

Aus diesen Eingangsgrößen in Form der Grundlagenmodelle, der definierten konstanten und variablen Verbrauchergruppen sowie der definierten Betriebszustände wird im dritten Schritt der Energiemodellierungsansatz EEMA entwickelt. Dieser ermöglicht die Berechnung des TED einer Zerspanungsmaschine in einem definierten Betriebszyklus (TED<sub>M</sub>) und die Ableitung des TED eines Zerspanungsprozesses (TED<sub>P</sub>) auf Basis von mittleren Leistungskennwerten. Diese mittleren Leistungskennwerte, die im Folgenden als **Power Key Values (PKV)** bezeichnet werden, sollen für die zuvor definierten konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betriebszustände ausgewiesen werden. Die PKV sollen dabei erstens leicht aus Primärdaten mathematisch abgeleitet werden können, sollen zweitens eine schnelle Berechnung des TED auf Maschinenebene und Prozessebene (TED<sub>M</sub> und TED<sub>P</sub>) ermöglichen und sollen drittens für Nachfolgeuntersuchungen wiederverwendet werden können (z. B. für weitere Zerspanungsprozesse auf der jeweiligen Werkzeugmaschine).

Der EEMA soll im vierten Schritt validiert werden. Dafür wird der entsprechend des EEMA berechnete TED auf Maschinenebene (TED<sub>M</sub>) – basierend auf den PKV – mit dem durch eine Primärdatenmessung ermittelten TED auf Maschinenebene verglichen und deren Abweichung mathematisch bestimmt.

Des Weiteren soll im fünften Schritt eine Empfehlung zur Datenerfassung der PKV im unternehmerischen Umfeld gegeben werden.

Die Ausführungen zum AP 1 finden sich in Kapitel 4 und dienen der Beantwortung der zweiten Unterforschungsfrage (vgl. Kapitel 1.2).

#### AP 2: Integration des EEMA in LCI-Datensätze als Basis für das Carbon Accounting

Der EEMA kann darüber hinaus zur Erzeugung parametrisierter LCI-Datensätze verwendet werden. Dazu werden die auf den PKV basierenden Energiebedarfsdaten in das LCI aufgenommen und zur Ableitung des Inputflusses "Strom" verwendet, um – je nach Umfang der jeweiligen LCA-Studie – den Energiebedarf eines Bearbeitungsprozesses oder einer Werkzeugmaschine darzustellen. In AP 2 erfolgt daher zunächst die Verbindung des EEMA mit dem LCA durch die Integration des Modells in das LCI. Dabei soll dezidiert auf die adäquate Festlegung der FU und des Referenzflusses entsprechend der Anforderungen aus Kapitel 2.4 eingegangen werden. Entsprechend der Anforderungen nach Sonnemann und Vigon (2011) soll zudem eine transparente Darstellungs- und Dokumentationsweise von entsprechenden LCI-Datensätzen erarbeitet werden, aus welchen ein transparentes Systemverständnis abgeleitet werden kann. Des Weiteren soll erörtert werden, welche Implikationen sich aus der Verbindung des EEMA mit dem LCA für resultierende LCI-Datensätze ergeben.

Diese Implikationen werden zum Anlass genommen, um generelle Potenziale für die Datenlandschaft im Forschungsbereich des LCA durch die Verbindung des EEMA mit dem LCI zu identifizieren. Hierfür sollen anhand zweier Fallbeispiele die auf Basis des EEMA erzeugten LCI-Daten und entsprechender generischer LCI-Daten aus konventionellen LCA-Datenbanken für den Inputfluss „Strom“ gegenübergestellt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen Aufschluss über mögliche Schwächen bestehender generischer LCI-Datensätze aus konventionellen LCA-Datenbanken liefern und die Vorschläge zur Herleitung generischer LCI-Datensätze aus dem EEMA rechtfertigen.

Neben dem Mehrwert, den die Verbindung des EEMA mit dem LCI für die Datenlandschaft des LCA haben kann, begründet diese den anvisierten lebenszyklusorientierten Carbon Accounting Ansatz für Unternehmen.

Die DIN EN ISO 14067:2019 bietet einem Unternehmen die Möglichkeit, die Erstellung eines CFP zu vereinfachen, indem das Unternehmen einen systematischen Verfahrensansatz zur THG-Bilanzierung eines spezifischen Produktes entwickelt. Dieser systematische Verfahrensansatz beinhaltet für jedes Produkt wiederholende Schritte und ist unter der Bedingung anwendbar, dass für gleichartige Produkte die gleichen Datensätze und dieselben Allokationsverfahren für die Bilanzierung zugrunde gelegt werden. Innerhalb der Beschreibung des systematischen CFP-Ansatzes müssen dabei die folgenden Themen adressiert werden: Daten- und Informationserfassung, Validierung des systematischen CFP-Ansatzes sowie Anwendung des systematischen Ansatzes zur Ermittlung des CFP für ein beliebiges Produkt (Modellversuch). Die Bedingungen zur Erstellung eines solchen systematischen CFP-Ansatzes werden allerdings durch die Norm nur für den CFP ausgewiesen, aber nicht explizit für einen partiellen CFP. Um Unternehmen dennoch eine erleichterte Bilanzierung der THG-Emissionen des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zu ermöglichen, soll ein derartiger systematischer Verfahrensansatz für die Bestimmung eines partiellen CFP auf Prozessebene im Rahmen des anvisierten lebenszyklus- und praxisorientierten Carbon Accounting entwickelt werden. Dabei werden die Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019 für die Erstellung eines partiellen CFP entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1.2 berücksichtigt.

Die methodische Basis für den in AP 2 zu entwickelnden, lebenszyklusorientierten Carbon Accounting Ansatz des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen im Sinne eines systematischen Verfahrensansatzes stellen AP 1 mit der Entwicklung des EEMA sowie die Vorarbeiten in AP 2 mit der Integration des EEMA in das LCI dar. Die zentralen Bedingungen an den zu entwickelnden systematischen Verfahrensansatz, die teils durch diese methodische Grundlage abgedeckt werden sollen, lassen sich durch die Schlagworte Ganzheitlichkeit (1), Transparenz (2), Praxisnähe (3) sowie Übertragbarkeit (4) zusammenfassen und können wie folgt erklärt werden:

- (1) *Ganzheitlichkeit*: Die Bedingung eines ganzheitlichen Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen soll durch die methodische Basis des EEMA garantiert werden. Der EEMA soll entsprechend AP 1 alle Energieaufwendungen berücksichtigen, die in Form des TED in Verbindung mit dem Zerspanungsprozess stehen (vgl. Kapitel 2.2.2).
- (2) *Transparenz*: Die Transparenz des anvisierten systematischen Verfahrensansatzes soll die Modellierung des Energiebedarfs auf Verbrauchergruppenebene in Abhängigkeit der Betriebszustände im Rahmen des EEMA garantieren. Durch diese sehr detaillierte Abbildung der einzelnen Leistungsbedarfe auf Basis der PKV können nicht nur die Treiber des Energiebedarfs direkt kenntlich gemacht, sondern der TED des Zerspanungsprozesses, als wesentliches Element einer faktoriellen Berechnung zur Bestimmung der THG-Emissionen, kann transparent dargestellt werden. Eine solche transparente Darstellung der resultierenden Ergebnisse soll die zu erarbeitende Empfehlung zur Ausweisung und Dokumentation von LCI-Datensätzen aus AP 2 begründen bzw. rechtfertigen.
- (3) *Praxisnähe*: Die Praxisnähe soll geschaffen werden, indem der grundsätzliche Verfahrensaufbau so beschrieben wird, dass verständlich daraus hervorgeht, was, wann und wie gemessen sowie berechnet werden soll. Die zugrunde liegende Leistungsmessung soll von Maschinenexperten durchführbar sein, ohne vorher konstruktionstechnische Veränderungen an der Werkzeugmaschine durchführen zu müssen. Zudem soll der Zeit- und Kapazitätsaufwand der Messung für das Unternehmen zumutbar bleiben.  
Des Weiteren soll durch die Integration des EEMA und die damit verbundene Ausweisung der konstanten und variablen PKV nachfolgende Erleichterung im Rahmen des unternehmens-internen Carbon Accounting erzielt werden: Sind die Leistungskennwerte für die konstanten Verbrauchergruppen auf einer Werkzeugmaschine einmal bestimmt worden, können diese – insofern zwischenzeitlich keine programmbedingten Änderungen an der Maschinensteuerung durchgeführt wurden – für Nachfolgeuntersuchungen auf dieser Werkzeugmaschine wieder verwendet werden. Die aufwendige Primärmessung entfällt und nur die Leistungskennwerte für die variablen Verbrauchergruppen müssen je spezifischen Zerspanungsprozess neu abgeleitet werden. Dies soll nicht nur zu einer enormen Zeitersparnis bei der THG-Bilanzierung auf Prozessebene führen, sondern auch etwaige Störungen im Prozessablauf vermeiden.
- (4) *Übertragbarkeit*: Der Verfahrensansatz soll durch seine Systematik auf unterschiedliche Zerspanungsprozesse und Zerspanungsmaschinen übertragbar sein. Dies schafft somit innerhalb eines Unternehmens ein konsistentes Bilanzierungs- und Bewertungsvorgehen.

Auf Grundlage der oben aufgeführten Bedingungen soll der systematische Verfahrensansatz basierend auf einem strukturierten Ablaufplan konzeptioniert und detailliert beschrieben werden. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Schwerpunkt des Verfahrensansatz weniger auf der Bestimmung der THG-Emissionen im Rahmen des LCIA liegt, sondern vielmehr auf der systematischen Verfahrensbeschreibung als angeleitete Hilfestellung für Unternehmen. Die Bestimmung der THG-Emissionen im Rahmen des LCIA soll daher vereinfacht auf Basis einer faktoriellen Berechnung mittels eines geeigneten Emissionsfaktors erfolgen. Zur Sicherung der Modellierungsgenauigkeit innerhalb der

THG-Bilanzierung und der Qualitätssteigerung der Eingangsdaten soll zudem ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Datenqualität entwickelt werden.

Die Ausführungen zum AP 2 finden sich in Kapitel 5 und dienen der Beantwortung der dritten Unterforschungsfrage (vgl. Kapitel 1.2).

#### AP 3: Modellversuch des systematischen Carbon Accounting Ansatzes

Zur Validierung des systematischen Verfahrensansatzes für das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen sowie zur Demonstration dessen Anwendbarkeit soll dieser darauffolgend mittels eines Modellversuchs getestet werden.

Die Ausführungen zum AP 3 finden sich in Kapitel 6.

#### AP 4: Weitere Anwendungsmöglichkeiten im Unternehmen

Um die Bedeutung des entwickelten EEMA bzw. des systematischen Verfahrensansatzes für das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen für Unternehmen zu unterstreichen, sollen weitere Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Methoden sowie deren Mehrwert in der unternehmerischen Praxis dargestellt werden. Potenzielle Anwendungsmöglichkeiten liegen dabei bspw. in den Bereichen der Prozesssteuerung und der Prozessoptimierung sowie dem Energie- bzw. Umweltmanagement. Der EEMA kann auf der einen Seite im Bereich der Prozesssteuerung und -optimierung bspw. für das Benchmarking und den Vergleich des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen und der Ableitung von Verbesserungspotenzialen verwendet oder als Grundlage für die Ableitung von Energieeffizienzindikatoren herangezogen werden. Auf der anderen Seite kann der systematische Verfahrensansatz für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen in den Plan-Do-Check-Act- (PDCA-) Zyklus (dt. Planen, Durchführen, Prüfen, Handeln) des unternehmensinternen Umweltmanagementsystems als Bilanzierungsgrundlage für die Ist- und Soll-Analysen eingebunden werden. Durch diese potenziellen Anwendungsmöglichkeiten können nicht nur grundlegende Informationen für eine energieeffiziente Prozessgestaltung generiert werden, sondern auch eine systematische Minderung der mit den Zerspanungsprozessen verbundenen THG-Emissionen im Rahmen eines strategischen und offensiven Umweltmanagements angestoßen werden.

Die Ausführungen zum AP 4 finden sich in Kapitel 7.

Abbildung 13 fasst das vorgestellte methodische Vorgehen basierend auf den beschriebenen vier AP zusammen und verortet diese in die Kapitelstruktur der vorliegenden Arbeit.



## Methodisches Vorgehen

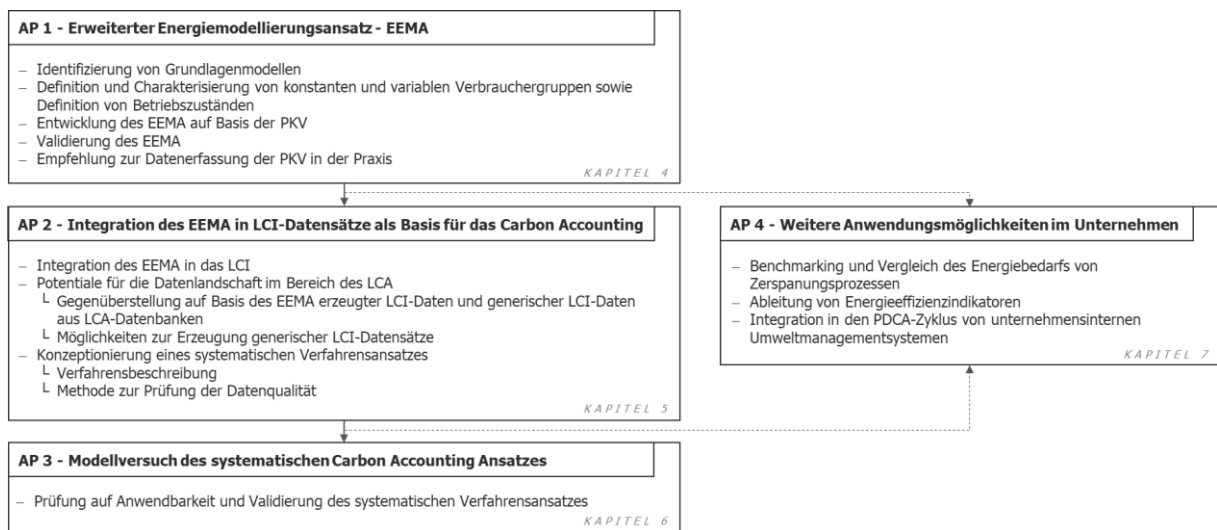


Abbildung 13: Überblick über das methodische Vorgehen und Verortung der Arbeitspakete (AP) innerhalb der Kapitelstruktur (eigene Darstellung)

## 4 Erweiterter Energiemodellierungsansatz – EEMA

Die Produktvielfalt, die durch Zerspanungsprozesse auf Werkzeugmaschinen in der Praxis gefertigt werden kann, ist mannigfaltig, ebenso wie die jeweilige Höhe des damit verbundenen spezifischen Energiebedarfs zur Fertigung jedes Produkts. Zur Ermittlung dieses Energiebedarfs könnte nun für jeden Zerspanungsprozess eines Produkts der Energiebedarf an der Werkzeugmaschine durch eine Primärdatenmessung erhoben werden. Dieses Vorgehen ist allerdings durch die damit implizierten Aufwände in der Praxis kaum realisierbar (vgl. Kapitel 1.2). Um die Modellierung des Energiebedarfs der zugrunde liegenden Zerspanungsprozesse daher möglichst effizient und damit praxisorientiert zu gestalten, bedarf es eines Modellierungsansatzes, welcher sich erstens von dieser Produktabhängigkeit weitestgehend löst und zweitens die Wiederverwendung von wertvoll erhobenen Primärdaten an einer Werkzeugmaschine zulässt. Der EEMA soll diese Anforderungen erfüllen.

Für die Entwicklung des EEMA zur praxisorientierten Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen wird im ersten Schritt nach einem weiteren Grundlagenmodell gesucht, welches in den Ansatz von Kellens et al. (2012b) integriert werden kann und welches die Verbrauchergruppen disaggregiert zum Zweck einer Whitebox-Modellierung abbildet. Die hier anvisierte Unterscheidung der konstanten und variablen Energieverbrauchsanteile der Zerspanungsprozesse zielt darauf ab, die Primärdaten, die in das Modell einfließen werden, wiederverwendbar zu machen. Für diese disaggregierte Modellierung entsprechend eines modularisierten und parametrisierten Ansatzes werden in einem weiteren Schritt neben den Verbrauchergruppen die möglichen Betriebszustände auf einer Werkzeugmaschine für das Modell definiert und klassifiziert. Aus diesen Eingangsgrößen erfolgt die Entwicklung des EEMA auf Basis der PKV der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände. Neben der Validierung des entwickelten mathematischen Modells werden in einem weiteren Schritt Empfehlungen für die Datenerfassung der PKV in der Praxis vorgestellt.

Die nachfolgenden Unterkapitel dienen somit der Beantwortung der zweiten Unterforschungsfrage: *Wie kann eine praxisorientierte Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen gestaltet werden?*

### 4.1 Grundlagenmodelle

Die Analyse bestehender LCA-Ansätze in Kapitel 2.3.2 zeigt, dass das CO<sub>2</sub>PEI-Modell nach Kellens et al. (2012b) den TED unter der anteiligen Berücksichtigung aller Energieaufwendungen der unterschiedlichen Betriebszustände modelliert und auch eine lineare Relation zwischen der FU und dem TED durch die Definition eines adäquaten Referenzflusses zulässt. Die CO<sub>2</sub>PEI-Methodik liefert somit eine solide Grundlage zur lebenszyklusorientierten Modellierung von Zerspanungsprozessen. Da allerdings die Methodik auf einer Blackbox-Modellierung des Zerspanungsprozesses gründet und keine dezidierte Berücksichtigung der konstanten und variablen Verbrauchergruppen stattfindet, kann kein eingehendes Systemverständnis, v. a. der Zerspanungsmaschine als Hauptenergieverbraucher, aufgebaut werden. Die ableitbaren LCI-Datensätze sind nur für den spezifischen Zerspanungsprozess gültig. Eine Übertragbarkeit oder Wiederverwendung der wertvollen Primärdaten für Nachfolgeprozess auf der jeweiligen Werkzeugmaschine ist nicht möglich.

Um der Anforderung an eine mögliche Wiederverwendung von aufwendig zu gewinnenden Primärdaten gerecht zu werden, soll dieses Defizit der CO<sub>2</sub>PEI-Methodik – welches für den EEMA als erstes Grundlagenmodell herangezogen wird – mit der Integration eines geeigneten disaggregierten Modells, im Folgenden bezeichnet als Inputmodell, behoben werden. Das Inputmodell soll dabei die unterschiedlichen konstanten und variablen Verbrauchergruppen innerhalb des Betriebszustandes

„Bearbeitung“ explizit berücksichtigen, wodurch das geforderte Systemverständnis in Bezug auf die Werkzeugmaschine ableitbar sein soll. Zudem sollen die modellspezifischen Parameter alle so gewählt und deren Erhebung so beschrieben sein, dass ein Unternehmen den Ansatz ohne Probleme für die eigene Bilanzierung der jeweiligen Zerspanungsprozesse in der Praxis anwenden kann.

Aufgrund des Mangels eines passenden Modellierungsansatzes im Bereich des LCA, welcher sich als Inputmodell eignen würde, wurde im Forschungsbereich Maschinenbau nach einem adäquaten Inputmodell recherchiert. Hierfür wurden Studien zur Leistungs- bzw. Energiebedarfsmodellierung von Zerspanungsprozessen mittels einer Literaturrecherche zusammengetragen und entsprechend ihres zugrunde liegenden Systemrahmens entsprechend dem in Kapitel 2.2.3 vorgestellten dreigliedrigen Kategorisierungssystem geclustert. Mittels einer Stärken-Schwächen-Analyse wurden diese im nächsten Schritt in Bezug auf deren Nutzen für das vorliegende Forschungsinteresse evaluiert um dadurch ein passendes Inputmodell zur Integration in den CO<sub>2</sub>PE!-Ansatz identifizieren zu können. Nähere Informationen hinsichtlich der zugrunde liegenden Literaturrecherche sowie die Ausführung zur Evaluation der untersuchten Ansätze sind in Anhang A.5 dargestellt.

Durch das beschriebene Vorgehen konnte als geeignetes Inputmodell, welches für den Betriebszustand „Bearbeitung“ in das CO<sub>2</sub>PE!-Modell integriert werden kann, der Energiemodellierungsansatz nach Balogun und Mativenga (2013) aus Kategorie 2 identifiziert werden.

Ziel der Arbeit von Balogun und Mativenga (2013) ist die Erstellung eines mathematischen Modells, welches den Energiebedarf von Werkzeugmaschinen anhand des jeweiligen Bearbeitungspfades prognostiziert. Auf Basis eines Reviews von bereits existierenden Ansätzen zur Vorhersage des gesamten Energiebedarfs einer Werkzeugmaschine und deren methodischen Grenzen stellen die Autoren eine Berechnungsmethodik vor, welche durch die Gegenüberstellung mit gemessenen Primärdaten zweier Fräsmaschinen validiert wurde (Balogun und Mativenga 2013). Der Berechnungsansatz berücksichtigt dabei sowohl den Ansatz nach Gutowski et al. (2006) als auch den Ansatz nach Diaz et al. (2011). Balogun und Mativenga (2013) definieren für den Betrieb einer Werkzeugmaschine drei Energiebedarfzustände:

- Grundbedarf an Energie auf Nebenaggregatsebene ( $E_{\text{Basic}}$ ),
- Energiebedarf im betriebsbereiten Zustand auf Nebenaggregatsebene ( $E_{\text{Ready}}$ ) und
- Energiebedarf der Zerspanungseinheit ( $E_{\text{Cutting}}$ ).

Die Energiebedarfzustände beziehen sich nur auf den Betrieb der Werkzeugmaschine während des Betriebszustandes „Bearbeitung“. Abbildung 14 zeigt das Modell zur Abschätzung des elektrischen Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen schematisch nach den in der Arbeit berücksichtigten Werkzeugaggregaten bzw. Energiebedarfzuständen.

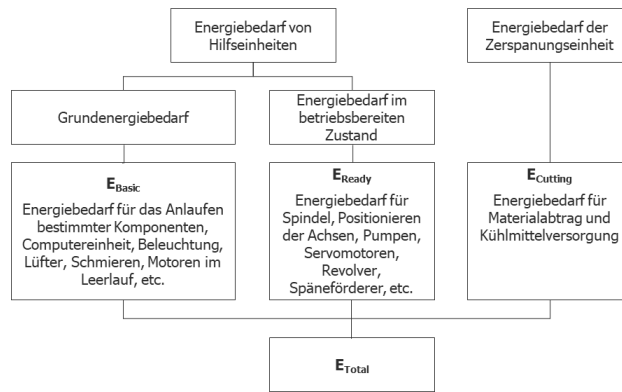
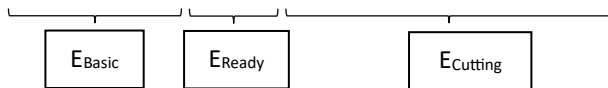


Abbildung 14: Modell zur Abschätzung des elektrischen Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen nach Verbrauchergruppen bzw. Energiebedarfszuständen nach Balogun und Mativenga (2013) (übersetzt und angepasst)

Mathematisch wird der Gesamtenergiebedarf der Werkzeugmaschine  $E_t$  durch die Autoren wie folgt ausgedrückt:

$$E_t = P_b(t_b + t_r + t_c) + P_r t_r + P_{air} t_{air} + (P_r + P_{cool} + k\dot{v})t_c \quad (1)$$



Eine zusammenfassende Erklärung der einzelnen Parameter sowie die Ausweisung der Einheiten der Formel (1) nach Balogun und Mativenga (2013) erfolgt untenstehend.

$E_t$	Gesamtenergiebedarf der Werkzeugmaschine	[J]
$P_b$	Leistungsbedarf bei Grundlast auf Nebenaggregatsebene	[W]
$P_r$	Leistungsbedarf bei betriebsbereitem Zustand auf Nebenaggregatsebene	[W]
$P_{cool}$	Leistungsbedarf des Kühlmittelpumpenmotors	[W]
$t_b$	Dauer im Energiebedarfszustand $E_{Basic}$	[s]
$t_r$	Dauer im Energiebedarfszustand $E_{Ready}$	[s]
$k$	Spezifische Schnittkraft <sup>49</sup>	[kJ/cm <sup>3</sup> ]
$\dot{v}$	Menge an abgespanntem Material bzw. Materialabtragsrate	[cm <sup>3</sup> /s]
$t_c$	Zeitdauer des eigentlichen Zerspangungsvorganges	[s]

Der Berechnungsansatz berücksichtigt dabei somit die unterschiedlichen Aggregate (resp. Verbrauchergruppen) entsprechend des spezifischen Lastganges der Werkzeugmaschine sowie den konstanten und variablen Leistungsbedarf. Durch die Einbeziehung der Schneidkraft ist die eigentliche Schneidleistung in Abhängigkeit vom Material und der Schnitttiefe bzw. Spanungsdicke parametrisiert berechenbar (Degner et al. 2019). Dadurch können die Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks bemessen werden (vgl. Gutowski et al. 2006). Auf Basis der Vorarbeiten von Diaz et al. (2011) wird bei Balogun und Mativenga (2013) ebenso berücksichtigt, dass die Bearbeitungszeit nicht nur durch den eigentlichen Spanabtrag definiert ist. In dieser Phase müssen vielmehr auch Zeitperioden berücksichtigt werden, in denen das Werkzeug zwar rotiert, es aber nicht in das Material eindringt. D. h. es findet hier kein Zerspanen statt. Diese Prozessphase wird im Folgenden als Luftschnitt bezeichnet. Die Einbeziehung des Zeitintervalls des Luftschnitts sorgt für eine genauere Modellierung

<sup>49</sup> Die spezifische Schnittkraft geht eng mit der Bearbeitbarkeit des Werkstückes und den spezifischen Technologieparametern des Zerspansens einher (Balogun und Mativenga 2013).

des eigentlichen Leistungsbedarfs für die Bearbeitungsphase und vermindert Unsicherheiten bei der Berechnung des Energiebedarfs des Zerspanungsprozesses.

Anhand eines Praxisversuchs mittels zweier Fräsmaschinen, der MHP CNC lathe, MAC-V2 des Herstellers Takisawa sowie dem Fräszentrum HSM 400 von Mikron, wurde die Validität des entwickelten mathematischen Modells überprüft. Die mittlere Abweichung der durch das Prognosemodell errechneten Werte für den Energiebedarf  $E_{\text{Total}}$  und der gemessenen Realwerte an den Werkzeugmaschinen innerhalb des Betriebszustands „Bearbeitung“ lagen bei +2 % (MHP CNC lathe, MAC-V2; Takisawa) bzw. +3 % (HSM 400; Mikron) (Balogun und Mativenga 2013).

Die Modellierungsansätze der CO<sub>2</sub>PE!-Initiative nach Kellens et al. (2012b) (Kategorie 3) und Balogun und Mativenga (2013) (Kategorie 2) bilden aufgrund der zuvor dargelegten Vorteile die Basis für die Entwicklung des EEMA und werden im Folgenden als Grundlagenmodelle bezeichnet. Sie sind so zu kombinieren, dass aus dem resultierenden EEMA der TED für den Zerspanungsprozess unter Berücksichtigung der Leistungs- bzw. Energiebedarfsanteile für die konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betriebszustände abgeleitet werden kann. Für eine derartige modulare und parametrisierte Bilanzierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen ist zunächst noch die Definition und Klassifizierung der unterschiedlichen Verbrauchergruppen sowie die Definition möglicher Betriebszustände einer Werkzeugmaschine notwendig.

## **4.2 Modulare und parametrisierte Energiebedarfsermittlung**

Es soll ein prozessorientierter Modellierungsansatz des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen im Sinne eines Whitebox-Modells entwickelt werden, der modularisiert und parametrisiert den Energiebedarf eines Zerspanungsprozesses abbildet.

Ein Zerspanungsprozess wird auf einer Werkzeugmaschine ausgeführt, welche sich wiederum in einzelne Module resp. Verbrauchergruppen untergliedern lässt. Die Module müssen dabei nach dem Verständnis von Rebitzer (2005) und Buxmann et al. (2009) so modelliert werden, dass diese ausreichend unabhängig sind. Nur dadurch können diese unter Berücksichtigung vorgegebener technologie- und systemrelevanter Parameter zu einem Gesamtsystem aufsummiert werden (Buxmann et al. 2009). Durch die klare Unterteilung der Werkzeugmaschine in die Verbrauchergruppen auf Aggregatsebene in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betriebszustände soll diese Unabhängigkeit garantiert werden.

Zur klaren Unterscheidung der konstanten und variablen Verbrauchergruppen sowie der unterschiedlichen Betriebszustände innerhalb des zu entwickelnden EEMA bedarf es zunächst einer klaren Definition. Die Herleitung, Charakterisierung und die Definition der Verbrauchergruppen sowie der Betriebszustände werden in den nachfolgenden beiden Unterkapiteln beschrieben.

### **4.2.1 Definition von Verbrauchergruppen**

Aus Literaturquellen wurden typische Verbrauchergruppen einer Werkzeugmaschine auf Grundlage von Energie- bzw. Leistungsverbrauchern abgeleitet. Die zugrunde liegende Literaturlauswertung findet sich in Anhang A.6. Daraus können mittels eines Gruppierungsansatzes die nachfolgenden Verbrauchergruppen abgeleitet werden:

- Hauptschalter und Steuerung (v. a. Computer, Schaltschränke),
- Beleuchtung (v. a. Arbeitsraum, Bildschirm),
- Hydraulik (v. a. Pumpen),

- Kühlung (v. a. Kühlmittelpumpe),
- Ventilation (v. a. Lüfter, Ventilatoren),
- Sonst. Nebenaggregate (z. B. Förderband, Schmierer von Werkzeugmaschinenteilen),
- Absaugung (v. a. Ölnebelabscheider),
- Achsantrieb (v. a. Servomotoren),
- Späneförderer (v. a. Motoren),
- Spindel (v. a. Motoren),
- Werkzeug (v. a. Revolver),
- Kühlschmierung (v. a. Pumpen) und
- Materialabtrag (v. a. Schneidleistung).

Verbrauchergruppen können neben der Kategorisierung nach ihrem Nutzen auch nach der Art des Leistungs- bzw. Energiebedarfs unterschieden werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Tabelle 2 zeigt die identifizierten Verbrauchergruppen einer Werkzeugmaschine auf Basis ausgewählter Literaturquellen inkl. einer Eingruppierung der Verbrauchergruppen danach, ob die Autoren diese explizit als konstante (k) oder variable (v) Verbraucher innerhalb ihrer Studien benannt haben oder diese nur implizit aufführen (o). Auf dieser Informationsgrundlage findet nach einer mengenmäßigen Gewichtung der jeweiligen Charakteristik im Vergleich zur Grundgesamtheit die für diese Arbeit relevante Klassifizierung der Verbrauchergruppen zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (Ⓚ)“ und „variable Verbrauchergruppe (Ⓥ)“ statt.

Tabelle 2: Klassifizierung der Verbrauchergruppen entsprechend ausgewiesener Literaturquellen

	Hauptschalter & Steuerung	Beleuchtung	Hydraulik	Kühlung	Ventilation	Sonst. Nebenaggregate	Absaugung	Achsantrieb	Späneförderer	Spindel	Werkzeug	Kuschmierung	Materialabtrag
Gutowski et al. (2006), <i>Fräsmaschine</i>	k	-	-	-	k	-	-	k	k	k	k	k	v
Dietmair und Verl (2009), <i>Fräsmaschine</i>	o	-	o	-	-	-	-	o	-	o	-	o	o
Balogun und Mativenga (2013), <i>Fräsmaschine</i>	k	k	-	-	k	k	-	k	v	v	v	k	v
He et al. (2012), <i>NC-WZM</i>	-	-	-	-	k	k	-	k	v	v	v	v	-
Pavanaskar und McMains (2015), <i>CNC-WZM</i>	k	k	-	-	-	k	-	v	-	v		k	v
Triebe et al. (2018), <i>CNC-WZM</i>	-	-	-	o	-	k	o	o	o	o	o	o	-
Guo et al. (2015), <i>WZM</i>	k	k	k	-	k	-	-	v	-	v	-	k	v
Eberspächer (2017), <i>WZM</i>	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-
<b>Zuordnung</b>	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓥ	Ⓥ	Ⓚ	Ⓥ

k: konstant, v: variabel, o: Nennung ohne Spezifizierung, -: keine Nennung;

Ⓚ: konstante Verbrauchergruppe; Ⓥ: variable Verbrauchergruppe

Aus obenstehender Tabelle wird somit für die vorliegende Arbeit abgeleitet, dass die Verbrauchergruppen:

- Hauptschalter und Steuerung, Hydraulik, Kühlung, Absaugung, Beleuchtung, Ventilation, Sonst. Nebenaggregate, Späneförderer, Kühlschmierung und Achsenantrieb Ⓚ

als konstante Verbrauchergruppen charakterisierbar sind. Diese erfüllen ihren Nutzen innerhalb der Werkzeugmaschine, welcher unabhängig von den Randbedingungen des Zerspanungsprozesses durchgeführt wird. Hierbei sei allerdings anzumerken, dass nach Zhou et al. (2022) das Schmier- und Kühlsystem einiger Werkzeugmaschinen, z. B. zur Kühlung und Schmierung der Spindel, in Abhängigkeit vom Drehzahlbereich der Spindel und der daraus resultierenden Wärmeentwicklung periodische Änderungen im Leistungsbedarf aufweisen kann. Hinsichtlich der Komplexität des angestrebten EEMA werden die Verbrauchergruppe „Kühlung“ sowie die Verbrauchergruppe „Sonst. Nebenaggregate“ aufgrund der oben dargestellten Zuordnung der Aggregate zu den vorgestellten Kategorien, der Kombination des Leistungsbedarfs der jeweiligen Aggregate mit dem Leistungsbedarf anderer konstanter Nebenaggregate sowie des unsicheren maschinenbedingten Ausmaßes einer möglichen Leistungsbedarfsänderung in ihrem Durchschnitt als konstant angenommen.

Demgegenüber werden die Verbrauchergruppen:

- Spindel, Werkzeug und Materialabtrag Ⓥ

in dieser Arbeit zu den variablen Verbrauchergruppen gezählt. Diese werden u. a. durch technologische Prozesseinstellungen, Materialcharakteristika, die angestrebte Geometrie der Zerspanung und den damit verbundenen Materialabtrag innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“ beeinflusst (Zhou et al. 2016). Wie in Kapitel 2.2.1 bereits erläutert, kann der Leistungs- bzw. Energiebedarf von variablen Verbrauchergruppen, die in unproduktiven Betriebszuständen aktiv sind, durch die programmbedingte Steuerung der Werkzeugmaschine als konstant angenommen werden (Zhou et al. 2016).

#### 4.2.2 Definition von Betriebszuständen

Der Betriebszyklus einer Werkzeugmaschine setzt sich aus unterschiedlichen Betriebszuständen der Werkzeugmaschine zusammen (Zhou et al. 2016). Sie sind durch die maschineninterne Steuerung definiert und laufen auf einer spezifischen Werkzeugmaschine programmbedingt jeweils gleich ab. Die Betriebszustände innerhalb eines Betriebszyklus reichen vom Anfahren bis hin zum Ausschalten der Werkzeugmaschine. Dazwischen sind, je nach Werkzeugmaschine, unterschiedliche Betriebszustände programmbedingt möglich (z. B. Betriebsbereit, Bearbeitung, Standby).

Kellens et al. (2012b) schlagen in ihrem CO<sub>2</sub>PEI-Modell vor, die möglichen Betriebszustände der Werkzeugmaschine und die Dauer dieser Produktionszustände innerhalb einer „Zeitstudie“ zu ermitteln. Diese Informationen dienen in Verbindung mit den mittleren Leistungsbedarfen der Werkzeugmaschine in Bezug auf die jeweiligen Betriebszustände der Berechnung des TED des untersuchten Zerspanungsprozesses. Hierbei benennen die Autoren zwar mögliche Betriebszustände, definieren oder charakterisieren diese allerdings nicht näher. So ist aus den Ausführungen nicht direkt ersichtlich, welche Aggregate der Werkzeugmaschine in welchem Betriebszustand betrieben werden. Die innerhalb verschiedener Produktionsumgebungen möglichen Betriebszustände einer Werkzeugmaschine stellen sich nach Kellens et al. (2012b), wie in Tabelle 3 aufgelistet, dar.

Tabelle 3: Betriebszustände für Werkzeugmaschinen nach Kellens et al. (2012b) (übersetzt)

Nummer	Betriebszustand
A	Anfahr-Modus
B	Volllast-Modus
C	Teillast-Modus
D	Standby-Modus
E	Abschalt-Modus
F	Aus-Modus
G	andere Betriebsmodi

Im Gegensatz dazu wird daher die durch den ISO-Standard ISO 14955-1:2018 und durch Eberspächer (2017) empfohlene Klassifizierung der Betriebszustände zu den maschinenspezifischen Schaltzuständen für die Definition der jeweiligen Betriebszustände spanender Werkzeugmaschinen herangezogen. Da Betriebszustände auftreten können, die nicht den Betriebszuständen A bis F zuzuordnen sind, z. B. Maschinenzustände während Wartungsarbeiten, wird, in Anlehnung an Kellens et al. (2012b), eine siebte Kategorie „Sonstige“ eingeführt. Die sieben Betriebszustände A bis G für Werkzeugmaschine werden für die vorliegende Arbeit wie folgt definiert:

- A Bearbeitung: Die Werkzeugmaschine führt ein spezifisches Bearbeitungsprogramm aus, alle Aggregate sind aktiv.
- B Aufwärmen: Anlaufphase der Werkzeugmaschine, vom Einschalten bis zur Betriebsbereitschaft der Werkzeugmaschine.
- C Betriebsbereit: Die Werkzeugmaschine befindet sich in betriebsbereitem Zustand, es wird kein Bearbeitungsprogramm ausgeführt. Der Hauptschalter, die Maschinensteuerung und die Nebenaggregate sind aktiv. Die Zerspanungs- sowie die Bewegungseinheit befinden sich in einer Warteposition.
- D Erweitertes Standby: Der Hauptschalter, die Maschinensteuerung und die Nebenaggregate sind aktiv.
- E Standby: Nur der Hauptschalter und die Maschinensteuerung sind aktiv.
- F Aus: Alle Aggregate sind heruntergefahren und inaktiv.
- G Sonstige: Sonstige Maschinenzustände, wie z. B. Wartung, Not-Aus.

In Tabelle 4 sind die definierten Betriebszustände in Anlehnung an ISO 14955-1:2018 sowie Eberspächer (2017) mit den entsprechenden Schaltzuständen dargestellt.

Tabelle 4: Betriebszustände in Anlehnung an ISO 14955-1:2018 und Eberspächer (2017)

Betriebszustände	Schaltzustände					
	Haupt-schalter	Maschinen-steuerung	Peripherie	Zerspanungs-einheit	Bewegungs-einheit	Antriebe
<b>A Bearbeitung</b>	An	An	An	An/B	An/IB	An/IB
<b>B Aufwärmen</b>	An	An	An	An/KB	An/IB	An/IB
<b>C Betriebsbereit</b>	An	An	An	An/W	An/W	S
<b>D Erweitertes Standby</b>	An	An	An	Aus	Aus	S
<b>E Standby</b>	An	An	Aus	Aus	Aus	S
<b>F Aus</b>	Aus	Aus	Aus	Aus	Aus	S
<b>G Sonstige</b>	An/Aus	An/Aus	An/Aus	An/Aus	An/Aus	An/Aus

IB: In Bewegung; S: Stillstand; W: Warten; B: Bearbeitung; KB: Keine Bearbeitung



### 4.3 Entwicklung des EEMA auf Basis von PKV

Um den Energiebedarf eines Zerspanungsprozesses ganzheitlich im Sinne des TED bilanzieren zu können, muss unter Berücksichtigung des Betriebszyklus der spanenden Werkzeugmaschine der Energiebedarf aller durchlaufenen Betriebsphasen anteilig berücksichtigt werden. Hierbei sei zu beachten, dass während eines Betriebszyklus (z. B. 8-h-Schicht) einzelne Betriebszustände öfter durchlaufen werden. Abbildung 15 zeigt einen synthetischen Lastgang einer Zerspanungsmaschine innerhalb eines Betriebszyklus von 15 Minuten inkl. der Ausweisung der durchlaufenen Betriebszustände.

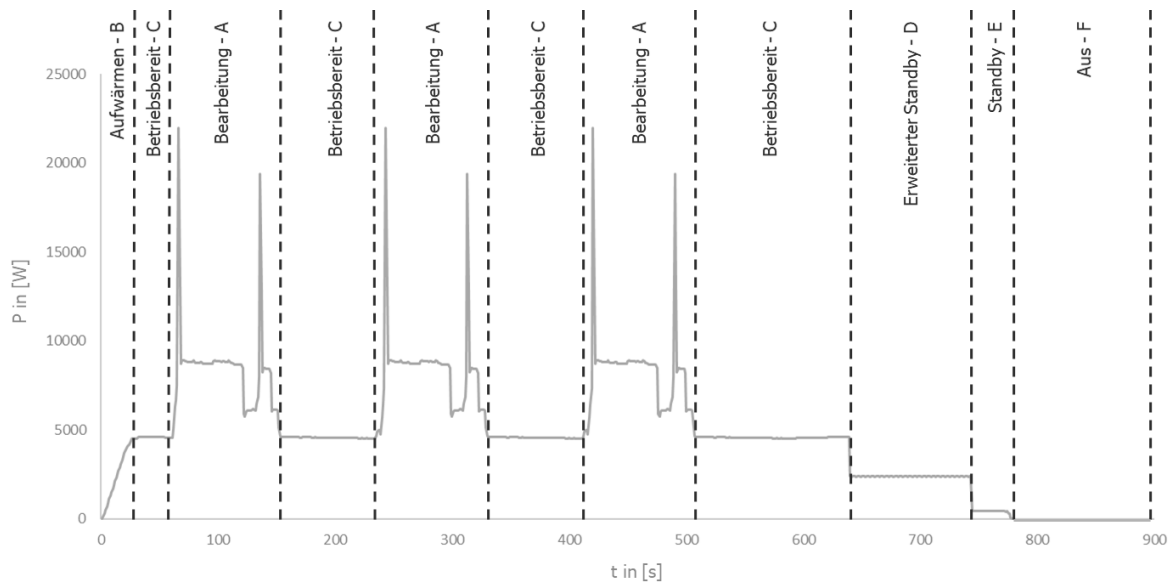


Abbildung 15: Darstellung eines synthetischen Lastganges einer spanenden Werkzeugmaschine (eigene Darstellung)

Da der Gesamtenergiebedarf einer Zerspanungsmaschine, der  $TED_M$ , als das Integral über die Leistung der Maschine beschrieben werden kann (vgl. ISO 14955-3:2019; Pavanaskar und McMains 2015), ergibt sich der  $TED_M$  über einen definierten Zeitraum  $t$  zu:

$$\begin{aligned}
 TED_M = & \left( \sum \int_{t_{0,i}}^{t_{A,i}} P_A(t) \right) + \left( \sum \int_{t_{1,j}}^{t_{B,j}} P_B(t) \right) + \left( \sum \int_{t_{2,k}}^{t_{C,k}} P_C(t) \right) + \left( \sum \int_{t_{3,l}}^{t_{D,l}} P_D(t) \right) + \left( \sum \int_{t_{4,m}}^{t_{E,m}} P_E(t) \right) + \\
 & \left( \sum \int_{t_{5,n}}^{t_{F,n}} P_F(t) \right) + \left( \sum \int_{t_{6,o}}^{t_{G,o}} P_G(t) \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

mit  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ ,  $P_D$ ,  $P_E$ ,  $P_F$  und  $P_G$  als Leistung während der Betriebszustände (A bis G), ausgedrückt durch die jeweiligen Zeitintervalle  $[t_{0,i}, t_{A,i}]$  für Betriebszustand A,  $[t_{1,j}, t_{B,j}]$  für Betriebszustand B,  $[t_{2,k}, t_{C,k}]$  für Betriebszustand C,  $[t_{3,l}, t_{D,l}]$  für Betriebszustand D,  $[t_{4,m}, t_{E,m}]$  für Betriebszustand E,  $[t_{5,n}, t_{F,n}]$  für Betriebszustand F und  $[t_{6,o}, t_{G,o}]$  für Betriebszustand G.

Um die Energiebedarfsanteile der konstanten und variablen Verbrauchergruppen innerhalb des Betriebszustandes A berücksichtigen zu können, wird der  $CO_2PE!$ -Ansatz nach Kellens et al. (2012b) um das Modell von Balogun und Mativenga (2013) erweitert. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, definieren Balogun und Mativenga (2013) für den Betriebszustand A die drei Energiebedarfszustände  $E_{Basic}$ ,  $E_{Ready}$  sowie  $E_{Cutting}$ , welche den jeweiligen Energiebedarfsanteil in Abhängigkeit spezifischer Verbrauchergruppen beschreiben. Um diese Logik auf andere Betriebszustände übertragen zu können, muss der Zeitanteil innerhalb der Energiebedarfsermittlung unberücksichtigt bleiben. Daher werden in dieser Arbeit äquivalent zu den Energiebedarfszuständen nach Balogun und Mativenga (2013) drei **Leistungsbedarfszustände**  $P_{Basic}$ ,  $P_{Ready}$  sowie  $P_{Cutting}$  innerhalb des Betriebszustandes A definiert, die auf

den aggregierten **mittleren Leistungsbedarfswerten** der jeweilig aktiven Verbrauchergruppen beruhen. Der mittlere Leistungsbedarfswert wird als das arithmetische Mittel (AM) bzw. der Durchschnittswert über eine Reihe von einzelnen Leistungsbedarfsdaten innerhalb eines definierten Zeitintervalls und innerhalb eines definierten Bezugsrahmens (z. B. Betriebszustand) verstanden. Die Leistungsbedarfzustände  $P_{\text{Basic}}$ ,  $P_{\text{Ready}}$  sowie  $P_{\text{Cutting}}$  innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“ werden für die vorliegende Arbeit wie folgt definiert:

- $P_{\text{Basic}}$  beschreibt den aggregierten mittleren Leistungsbedarf für die Verbrauchergruppen Hauptschalter und Steuerung, Beleuchtung, Hydraulik, Kühlung, Ventilation sowie sonst. Nebenaggregate,
- $P_{\text{Ready}}$  beschreibt den aggregierten mittleren Leistungsbedarf für die Verbrauchergruppen Absaugung, Achsantrieb, Späneförderer, Spindel sowie Werkzeug und
- $P_{\text{Cutting}}$  beschreibt den aggregierten mittleren Leistungsbedarf für die Verbrauchergruppen Kühlschmierung sowie Materialabtrag.

Da der EEMA nicht nur alle Verbrauchergruppen, sondern auch alle möglichen Betriebszustände berücksichtigen soll, wird geprüft, welcher Betriebszustand mit den zuvor definierten Leistungsbedarfzuständen abgebildet werden kann. Während für die Betriebsphase A natürlich alle drei Leistungsbedarfzustände für die Energiemodellierung herangezogen werden können, kann nur der Grundleistungsbedarf in den Betriebsphasen C und D auf Basis des Leistungsbedarfzustand  $P_{\text{Basic}}$  berechnet werden. Im Gegensatz dazu kann der mittlere Leistungsbedarf für den Betriebszustand B nicht durch die Leistungsbedarfzustände abgebildet werden.  $P_B$  wird daher eigens als mittlerer Leistungsbedarf definiert, der für das Aufwärmen der Werkzeugmaschine aufgewendet werden muss. Es wird davon ausgegangen, dass zwar die gleichen Verbrauchergruppen wie im Betriebszustand C angesteuert werden, der mittlere Leistungsbedarf der beiden Betriebszustände allerdings aufgrund der unterschiedlich ausgeführten maschineninternen Programme nicht gleichgesetzt werden kann. Im Betriebszustand E sind entsprechend ISO 14955-1:2018 nur der Hauptschalter sowie die Maschinensteuerung als Verbraucher aktiv. Diese werden im Ansatz von Balogun und Mativenga (2013) nur implizit mitberücksichtigt. Der Transparenz wegen wird für den zu entwickelnden Ansatz eigens der mittlere Leistungsbedarf  $P_E$  definiert.  $P_E$  wird als der mittlere Leistungsbedarf verstanden, der nach Betätigung des Hauptschalters von der Maschinensteuerung benötigt wird. Bei den Betriebszuständen A, C und D ist  $P_E$  eine Teilmenge von  $P_{\text{Basic}}$  ( $P_E \subset P_{\text{Basic}}$ ). Da Maschinen aufgrund einer individuellen Programmierung auch Betriebszustände durchlaufen können, die nicht direkt den Betriebszuständen nach ISO 14955-1:2018 zuzuordnen sind, wird für den Betriebszustand G der mittlere Leistungsbedarf  $P_G$  eingeführt.

Die mittleren Leistungsbedarfe in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebszustände A bis G werden, unter Berücksichtigung der vorangegangenen Gegenüberstellung mit den Leistungsbedarfzuständen und den daraus resultierenden Einschränkungen, im Folgenden ausgewiesen als  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ ,  $P_D$ ,  $P_E$ ,  $P_F$  sowie  $P_G$ . Neben den mittleren Leistungsbedarfen auf Ebene der Betriebszustände werden zudem die mittleren Leistungsbedarfe der konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände ausgewiesen. Die einmal ermittelten konstanten mittleren Leistungsbedarfswerte sind charakteristisch für eine bestimmte Werkzeugmaschine, unabhängig vom Werkstück. Sie können daher als Berechnungsfaktoren für den Energiebedarf auf Basis der Betriebszeit in [s] des jeweiligen Betriebszustandes verwendet werden. Die variablen Leistungsmittelwerte sind abhängig von den Werkstückeigenschaften und müssen für jeden Zerspanungsprozess (resp. Werkstück) individuell hergeleitet werden. Um die Bedeutung der mittleren Leistungskennwerte im EEMA zu kennzeichnen, werden die mittleren Leistungsbedarfswerte der konstanten und variablen Verbrauchergruppen in

Abhängigkeit der Betriebszustände sowie die aggregierten Leistungsbedarfswerte der einzelnen Betriebszustände als Power Key Values (PKV) bezeichnet.

Tabelle 5 zeigt die Zuordnung der relevanten Verbrauchergruppen zu den Betriebszuständen, die Verknüpfung mit den Leistungsbedarfsluständen entsprechend der Logik von Balogun und Mativenga (2013) sowie die Ausweisung der PKV.

Tabelle 5: Zuordnung aktiver Verbrauchergruppen zu den Betriebszuständen, Verknüpfung mit den Leistungsbedarfsluständen sowie Ausweisung der PKV

Betriebszustand	PKV je Betriebszustand <sup>2</sup> $P_{A \text{ bis } G}$			PKV je Verbrauchergruppe <sup>1</sup>												
				$P_{\text{Betriebszustand} - \text{Verbrauchergruppe}}$												
				Hauptschalter, Steuerung (HS)	Beleuchtung (B)	Hydraulik (H)	Kühlung (K)	Ventilation (V)	sonst. Nebenaggregate (N)	Absaugung (A)	Achsenantrieb (AA)	Spänehförderer (SF)	Spindel (S)	Werkzeug (W)	Kühlschmierung (KS)	Materialabtrag (M)
A	<b><math>P_A</math></b>			<b><math>P_{A-HS}</math></b>	<b><math>P_{A-B}</math></b>	<b><math>P_{A-H}</math></b>	<b><math>P_{A-K}</math></b>	<b><math>P_{A-V}</math></b>	<b><math>P_{A-N}</math></b>	<b><math>P_{A-A}</math></b>	<b><math>P_{A-AA}</math></b>	<b><math>P_{A-SF}</math></b>	<b><math>P_{A-S}</math></b>	<b><math>P_{A-W}</math></b>	<b><math>P_{A-KS}</math></b>	<b><math>P_{A-M}</math></b>
	<i><math>P_{Basic}</math></i>	<i><math>P_{Ready}</math></i>	<i><math>P_{Cutting}</math></i>													
B	<b><math>P_B</math></b>			<b><math>P_{B-HS}</math></b>	<b><math>P_{B-B}</math></b>	<b><math>P_{B-H}</math></b>	<b><math>P_{B-K}</math></b>	<b><math>P_{B-V}</math></b>	<b><math>P_{B-N}</math></b>	<b><math>P_{B-A}</math></b>	<b><math>P_{B-AA}</math></b>	<b><math>P_{B-SF}</math></b>	<b><math>P_{B-S}</math></b>	<b><math>P_{B-W}</math></b>	<i><math>P_{B-KS}</math></i>	-
C	<b><math>P_C</math></b>			<b><math>P_{C-HS}</math></b>	<b><math>P_{C-B}</math></b>	<b><math>P_{C-H}</math></b>	<b><math>P_{C-K}</math></b>	<b><math>P_{C-V}</math></b>	<b><math>P_{C-N}</math></b>	<i><math>P_{C-A}</math></i>	<b><math>P_{C-AA}</math></b>	<i><math>P_{C-SF}</math></i>	<b><math>P_{C-S}</math></b>	<i><math>P_{C-W}</math></i>	<i><math>P_{C-KS}</math></i>	-
	<i><math>P_{Basic}</math></i>	-	-													
D	<b><math>P_D</math></b>			<b><math>P_{D-HS}</math></b>	<b><math>P_{D-B}</math></b>	<b><math>P_{D-H}</math></b>	<b><math>P_{D-K}</math></b>	<b><math>P_{D-V}</math></b>	<b><math>P_{D-N}</math></b>	<i><math>P_{D-A}</math></i>	-	<i><math>P_{D-SF}</math></i>	-	<i><math>P_{D-W}</math></i>	<i><math>P_{D-KS}</math></i>	-
	<i><math>P_{Basic}</math></i>	-	-													
E	<b><math>P_E</math></b>			<b><math>P_{E-HS}</math></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F	<b><math>P_F</math></b>			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	<b><math>P_G</math></b>			<b><math>P_{G-HS}</math></b>	<b><math>P_{G-B}</math></b>	<b><math>P_{G-H}</math></b>	<b><math>P_{G-K}</math></b>	<b><math>P_{G-V}</math></b>	<b><math>P_{G-N}</math></b>	<b><math>P_{G-A}</math></b>	<b><math>P_{G-AA}</math></b>	<b><math>P_{G-SF}</math></b>	<b><math>P_{G-S}</math></b>	<b><math>P_{G-W}</math></b>	<b><math>P_{G-KS}</math></b>	-
Zuordnung <sup>3</sup>				(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(V)	(V)	(K)	(V)

<sup>1</sup> Ausweisung der aktiven (Schriftart, fett), nicht relevanten (-) oder in Abhängigkeit von der Zerspanungsmaschine aktiven (Schriftart, kursiv) Verbrauchergruppen je Betriebsphase. Die Relevanz der Verbrauchergruppen muss für jede Zerspanungsmaschine einzeln überprüft werden.

<sup>2</sup> Leistungsbedarfslustände  $P_{Basic}$ ,  $P_{Ready}$  und  $P_{Cutting}$  nach der Logik von Balogun und Mativenga (2013).

<sup>3</sup> Zuordnung zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (K)“ und „variable Verbrauchergruppe (V)“. Hier sei zu beachten, dass die Zuordnung in Abhängigkeit der Werkzeugmaschine unterschiedlich ausfallen kann.

Die Informationsbereitstellung der PKV aus Tabelle 5 stellt die Grundlage für die Energiebedarfsmodellierung im Sinne des EEMA dar. In Verbindung mit den jeweiligen Zeitanteilen der Betriebszustände kann (i) der TED einer Werkzeugmaschine ( $TED_M$ ) sowie (ii) der TED eines Zerspanungsprozesses unter anteiliger Berücksichtigung des Energiebedarfs der unproduktiven Betriebsphasen, der  $TED_P$ , ganzheitlich modelliert werden.

Für (i) die Ermittlung des  $TED_M$  werden die Zeitanteile der Betriebszustände in [s] einbezogen. Es wird davon ausgegangen, dass für ein spezifisches Bearbeitungsprogramm auf einer Zerspanungsmaschine die Zeitanteile für die Energiebedarfslustände  $E_{Basic}$ ,  $E_{Ready}$  und  $E_{Cutting}$ , also  $t_b$ ,  $t_r$ ,  $t_c$  (bzw.  $t_A$ ) während der Bearbeitungsphase programmbedingt als konstant angenommen werden können. Hierbei sei anzumerken, dass sich die Summe von  $t_b$ ,  $t_r$ ,  $t_c$  mit der Gesamtdauer für den Betriebszustand  $t_A$  ausdrücken lässt ( $t_b + t_r + t_c = t_A$ ). Auch der Zeitanteil für die Aufwärmphase der Maschine  $t_{B,j}$  wird programmbedingt als konstant angenommen. Demgegenüber können die Zeitanteile für die übrigen Betriebszustände ( $t_{C,k}$ ,  $t_{D,l}$ ,  $t_{E,m}$ ,  $t_{F,n}$  und  $t_{G,o}$ ) unterschiedlich lang sein. Diese müssen somit für jeden

Betriebszustand erneut ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Grundlagenmodelle sowie der PKV auf Ebene der Betriebszustände kann der  $TED_M$  in [kWh] entsprechend des EEMA entweder berechnet werden durch<sup>50</sup>:

$$\begin{aligned}
 TED_M &= \left( \sum_{i=0} (P_{Basic} + P_{Ready} + P_{Cutting}) t_{A,i} + \sum_{j=0} P_B t_{B,j} + \sum_{k=0} (P_{Basic} + (P_C - P_{Basic})) t_{C,k} \right. \\
 &\quad + \sum_{l=0} (P_{Basic} + (P_D - P_{Basic})) t_{D,l} + \sum_{m=0} P_E t_{E,m} + \sum_{n=0} P_F t_{F,n} \\
 &\quad \left. + \sum_{o=0} P_G t_{G,o} \right) \frac{1}{3600} \\
 &= \left( \sum_{i=0} (P_{Basic} t_A + P_{Ready} t_r + P_{air} t_{air} + (P_{Ready} + P_{cool} + kv) t_c)_i + \sum_{j=0} P_B t_{B,j} \right. \\
 &\quad + \sum_{k=0} (P_{Basic} + (P_C - P_{Basic})) t_{C,k} + \sum_{l=0} (P_{Basic} + (P_D - P_{Basic})) t_{D,l} + \sum_{m=0} P_E t_{E,m} \\
 &\quad \left. + \sum_{n=0} P_F t_{F,n} + \sum_{o=0} P_G t_{G,o} \right) \frac{1}{3600}
 \end{aligned} \tag{3}$$

oder durch die Berücksichtigung der PKV auf Ebene der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände durch:

$$\begin{aligned}
 TED_M &= \left( \sum_{i=0} P_A t_{A,i} + \sum_{j=0} P_B t_{B,j} + \sum_{k=0} P_C t_{C,k} + \sum_{l=0} P_D t_{D,l} + \sum_{m=0} P_E t_{E,m} + \sum_{n=0} P_F t_{F,n} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{o=0} P_G t_{G,o} \right) \frac{1}{3600} \\
 &= \left( \sum_{i=0} (P_{A-HS} + P_{A-B} + P_{A-H} + P_{A-K} + P_{A-V} + P_{A-N} + P_{A-A} + P_{A-AA} + P_{A-SF} \right. \\
 &\quad + P_{A-S} + P_{A-W} + P_{A-KS} + P_{A-M}) t_{A,i} \\
 &\quad + \sum_{j=0} (P_{B-HS} + P_{B-B} + P_{B-H} + P_{B-K} + P_{B-V} + P_{B-N} + P_{B-A} + P_{B-AA} + P_{B-SF} \\
 &\quad + P_{B-S} + P_{B-W} + P_{B-KS}) t_{B,j} \\
 &\quad + \sum_{k=0} (P_{C-HS} + P_{C-B} + P_{C-H} + P_{C-K} + P_{C-V} + P_{C-N} + P_{C-A} + P_{C-AA} + P_{C-SF} \\
 &\quad + P_{C-S} + P_{C-W} + P_{C-KS}) t_{C,k} \\
 &\quad + \sum_{l=0} (P_{D-HS} + P_{D-B} + P_{D-H} + P_{D-K} + P_{D-V} + P_{D-N} + P_{D-A} + P_{D-SF} + P_{D-W} \\
 &\quad + P_{D-KS}) t_{D,l} + \sum_{m=0} P_{E-HS} t_{E,m} \\
 &\quad + \sum_{o=0} (P_{G-HS} + P_{G-B} + P_{G-H} + P_{G-K} + P_{G-V} + P_{G-N} + P_{G-A} + P_{G-AA} + P_{G-SF} \\
 &\quad \left. + P_{G-S} + P_{G-W} + P_{G-KS}) t_{G,o} \right) \frac{1}{3600}
 \end{aligned} \tag{4}$$

<sup>50</sup> Die Beschreibung der einzelnen Parameter erfolgt gesamtheitlich am Ende des Kapitels für die nachfolgenden Formeln 3 bis 5.

Wie oft in dem betrachteten Betriebszyklus der Betriebszustand A durchlaufen wird bzw. wie viele Produkte in diesem Zeitraum gefertigt werden (Losgröße), wird durch  $z$  repräsentiert. Unter der anteiligen Berücksichtigung des Energiebedarfs aller Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände lässt sich (ii) der  $TED_P$  damit berechnen zu:

$$TED_P = \frac{1}{z} (TED_M) \quad (5)$$

Eine zusammenfassende Erklärung der einzelnen Parameter sowie die Ausweisung der Einheiten der jeweiligen Parameter der Formeln 3 bis 5 erfolgt untenstehend.

$TED_M$	TED der Werkzeugmaschine	[kWh]
$TED_P$	TED des Zerspanungsprozesses	[kWh]
$P_{Basic}$	Aggregierter mittlerer Leistungsbedarf für die Verbrauchergruppen Hauptschalter und Steuerung, Beleuchtung, Hydraulik, Kühlung, Ventilation sowie sonst. Nebenaggregate im Betriebszustand A	[kW]
$P_{Ready}$	Aggregierter mittlerer Leistungsbedarf für die Verbrauchergruppen Absaugung, Achsantrieb, Späneförderer, Spindel sowie Werkzeug im Betriebszustand A	[kW]
$P_{Cutting}$	Aggregierter mittlerer Leistungsbedarf für die Verbrauchergruppen Kühlschmierung sowie Materialabtrag im Betriebszustand A	[kW]
$P_A$ bis $P_G$	PKV je Betriebszustand	[kW]
$P_{\text{Betriebszustand-Verbrauchergruppe}}$	PKV je Verbrauchergruppe in Abhängigkeit des Betriebszustands	[kW]
$t_{A,i}$ bis $t_{G,o}$	Zeitanteil je Ablauf (i bis o) der Betriebszustände A bis G.	[s]
$t_b$	Zeitanteil des Leistungsbedarfszustands Basic	[s]
$t_r$	Zeitanteil des Leistungsbedarfszustands Ready	[s]
$t_c$	Zeitanteil des Leistungsbedarfszustands Cutting	[s]
$P_{air}$	Mittlerer Leistungsbedarf für den Luftschnitt	[kW]
$t_{air}$	Luftschnittdauer	[s]
$P_{cool}$	Mittlerer Leistungsbedarf der Kühlmittelpumpe	[kW]
$k$	Spezifische Schnittkraft	[kJ/cm <sup>3</sup> ]
$\dot{v}$	Materialabtragsrate	[cm <sup>3</sup> /s]
$z$	Iterationen des durchlaufenen Betriebszustands A bzw. der gefertigten Produkte bzw. der Losgröße innerhalb eines Betriebszyklus	[-]

#### 4.4 Validierung des EEMA

Zur Validierung des EEMA wird der  $TED_M$  basierend auf den PKV, welche auf Grundlage einer Primärdatenerhebung an einer Zerspanungsmaschine abgeleitet wurden, berechnet und mit dem gemessenen TED auf Maschinenebene verglichen. Da die Messung auf Maschinenebene alle Energiebedarfsanteile einschließt, soll der Vergleich mit dem berechneten  $TED_M$  dazu dienen, eine mögliche Vernachlässigung von Energiebedarfsanteilen aufgrund fehlender Komponenten, Verluste oder Messunsicherheiten innerhalb des Modells sichtbar zu machen. Die Primärdaten wurden im Rahmen einer Messkampagne einer Qualifikationsarbeit (Lademann 2020) am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität (TU) Darmstadt an der dreiachsigen, vertikalen Pick-up-Drehmaschine EMAG VLC 100Y (Baujahr 2014) der Firma EMAG GmbH & Co. KG aufgenommen. Die Werkzeugmaschine ist Teil des Maschinenparks

des Energieeffizienz-, Technologie- und Anwendungszentrum, der ETA-Fabrik, die im Rahmen von Forschungsarbeiten an der TU Darmstadt betrieben wird. Die Messungen an der Zerspanungsmaschine wurden während der Betriebszustände A, C und E durchgeführt.<sup>51</sup> Die Zerspanungsmaschine arbeitete während des Betriebszustands A im Luftschnitt, d. h. es fand nur die Spindeldrehung statt und es wurde kein Material zerspannt. Im Folgenden wird daher der Betriebszustand A als  $A_{Air}$  innerhalb des Kapitels bezeichnet. Der Energiebedarf für den eigentlichen Materialschnitt wird vernachlässigt, da bei der Untersuchung Unsicherheiten, die durch das zu bearbeitende Material auftreten können, bei der Validierung ausgeschlossen werden sollen. Yoon et al. (2014) beziffern den Energiebedarfsunterschied zwischen dem Luftschnitt und dem Spanen von Material auf 2 bis 3 %. Die Fokussierung auf den Luftschnitt hat damit keine Konsequenz auf die Aussagegüte der nachfolgenden Validierungsergebnisse des EEMA.

Die Messwerte an der Werkzeugmaschine wurden sowohl über die maschineninterne Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) als auch über zusätzliches Messequipment für einzelne Aggregate der Zerspanungsmaschine gewonnen und zentral in einer Datei gespeichert. Bei dem verwendeten Messequipment handelt es sich um einen mobilen Messkoffer zur elektrischen Leistungsmessung von Maschinen und Anlagen der Firma Janitza (Modell UMG604-EP) (ETA 2022). Mit Hilfe der SPS konnte der gesamte Leistungsbedarf der Zerspanungsmaschine ohne den Leistungsbedarf der Achsantriebe sowie die einzelnen Leistungsbedarfskennwerte der nachfolgenden Achsantriebe in einer **zeitlichen Auflösung**<sup>52</sup> von einer Sekunde gewonnen werden:

- Werkzeug,
- Revolver,
- Spindel,
- Transportband,
- x-Achse,
- y-Achse sowie
- z-Achse.

Zur Berechnung der Gesamtleistung der EMAG VLC 100Y wurden die Achsleistungen aufaddiert, aufgrund von Umrichter-Verlusten mit einem Faktor von 1,4 (empirischer Parameter nach Sossenheimer (2020)) multipliziert und mit der Gesamtleistung ohne die Leistungsverbräuche der Antriebe summiert. Die Notwendigkeit der faktorbasierten Korrektur der gemessenen Achsleistung stellt dabei eine Ausnahme für die Werkzeugmaschine EMAG VLC 100Y dar. Es erfolgt bei der Werkzeugmaschine eine externe Stromversorgung der Antriebe, die auf einem anderen Spannungsniveau erfolgt als das der Maschine selbst. Da durch den Messkoffer nur ein Spannungsabgriff auf einem Spannungsniveau möglich ist, konnten bei der EMAG VLC 100Y die Antriebe nicht direkt mit dem Messkoffer vermessen werden (vgl. Sossenheimer 2020). Mit Hilfe des Messkoffers wurden nachfolgende Nebenaggregate separat vermessen:

- Zentralschmierung,
- KSS-Pumpe,
- Hydraulikpumpe,

---

<sup>51</sup> Ein spezifisches Anfahrprogramm (Betriebszustand B) auf der Werkzeugmaschine EMAG VLC 100Y existiert nicht.

<sup>52</sup> Unter Auflösung wird die Fähigkeit verstanden „zwei benachbarte Werte voneinander unterscheiden zu können. Besonders bei der Archivierung von Messwerten in Datenbanken sollte die zeitliche Auflösung der Zielgröße beachtet werden. Die Frage, ob bspw. der elektrische Energiebedarf einer Maschine sekundlich oder minütlich erfasst wird, hängt letztendlich davon ab, welche Optimierungsziele verfolgt werden“ (Metternich et al. 2021).

- Absaugung sowie
- Späneförderer.

Die Ermittlung der Leistungsdaten des Hauptanschlusses und der Steuerung sowie der sonstigen Nebenaggregate (Beleuchtung, Kühlung, Ventilation) erfolgt durch Rückrechnung mit Hilfe der ermittelten Primärdaten in einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde. Tabelle 6 stellt die Zuordnung der einzelnen erfassten Aggregate zu den in Kapitel 4.2.1 definierten Verbrauchergruppen sowie die jeweils erfolgte Leistungsbedarfsermittlung dar.

Tabelle 6: Zuordnung der erfassten Aggregate der EMAG VLC 100Y zu den Verbrauchergruppen und Ausweisung der Art der Leistungsbedarfsermittlung

<b>Verbrauchergruppen</b>	<b>Aggregate</b>	<b>Leistungsbedarfsermittlung</b>
Hauptschalter, Steuerung	- Hauptanschluss, Steuerung	⇒ Rückrechnung
Beleuchtung	- Beleuchtung	⇒ Rückrechnung
Hydraulik	- Hydraulikpumpe	⇒ Messung
Kühlung	- Kühlung	⇒ Rückrechnung
Ventilation	- Ventilation	⇒ Rückrechnung
sonst. Nebenaggregate	- Transportband	⇒ SPS
	- Zentralschmierung	⇒ Messung
Absaugung	- Absaugung	⇒ Messung
Achsenantrieb	- x-Achse	⇒ SPS
	- y-Achse	⇒ SPS
	- z-Achse	⇒ SPS
Späneförderer	- Späneförderer	⇒ Messung
Spindel	- Spindel	⇒ SPS
Werkzeug	- Werkzeug	⇒ SPS
	- Revolver	
Kühlschmierung	- KSS-Pumpe	⇒ Messung
Materialabtrag	- / ( <i>Luftschnitt</i> )	⇒ -

In untenstehender Abbildung ist der Gesamtleistungsverlauf inkl. des Leistungsbedarfs der Achsenantriebe sowie die Ausweisung der durchlaufenen Betriebszustände innerhalb des untersuchten Betriebszyklus der Zerspanungsmaschine EMAG VLC 100Y dargestellt (Abbildung 16).

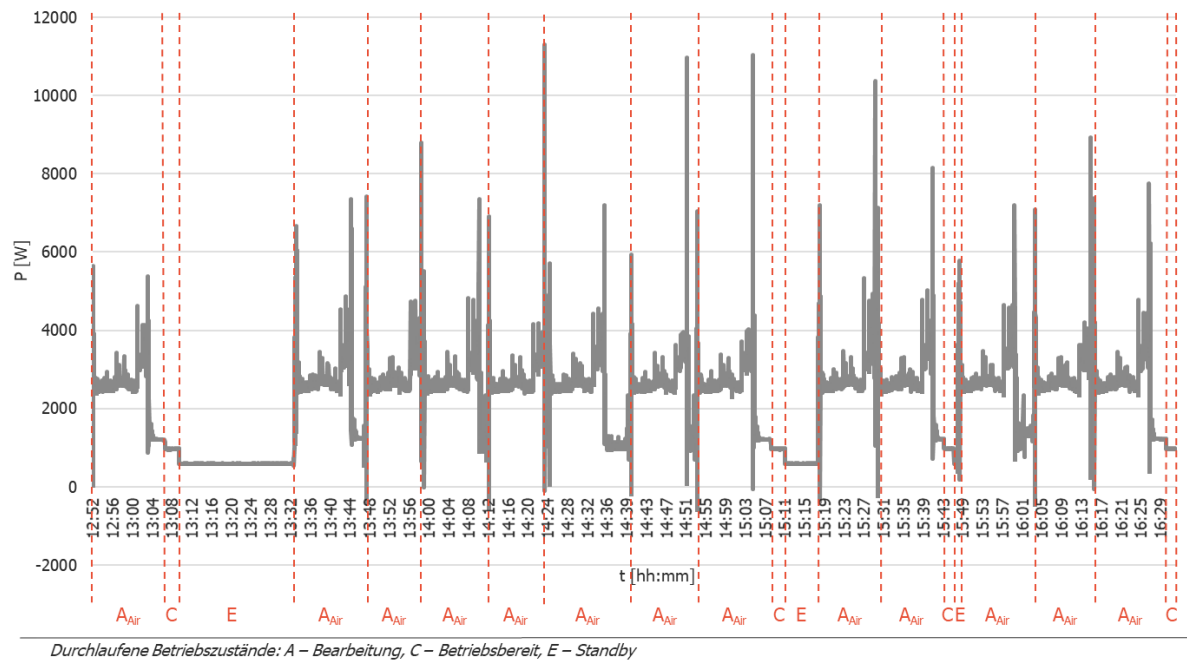


Abbildung 16: Gesamtleistungsverlauf der Messkampagne EMAG VLC 100Y (Baujahr 2014) vom 09.06.2020 inkl. Ausweisung der unterschiedlichen Betriebszustände (eigene Darstellung)

Zur Berechnung der PKV wurde das arithmetische Mittel (AM) (vgl. Papula 1999) über alle Datenpunkte der jeweiligen Betriebszustände innerhalb des untersuchten Betriebszyklus und getrennt nach den einzelnen Verbrauchergruppen berechnet. Tabelle 7 zeigt die PKV der identifizierten Verbrauchergruppen je Betriebszustand, die aggregierten PKV der Betriebszustände A<sub>Air</sub>, C, E, die aggregierte Messdauer der jeweiligen Betriebszustände sowie die Anzahl der jeweiligen Iterationen.

Tabelle 7: Übersicht zu den PKV je Verbrauchergruppe in Abhängigkeit der Betriebszustände

EMAG VLC 100Y (EMAG GmbH & Co. KG, Baujahr 2014); Spezifischer Zerspanungsprozess, Luftschnitt												
Betriebszustand	Messdauer Gesamt [hh:mm:ss]	Anzahl	PKV je Verbrauchergruppe AM in [W]									PKV, Betriebszustand AM in [W]
			Hauptschalter, Steuerung; Beleuchtung; Kühlung; Ventilation	Hydraulik	Sonst. Nebenaggregate	Absaugung	Achsenantrieb	Späneförderer	Spindel	Werkzeug	Kühlschmierung	
A <sub>Air</sub>	02:57:56	13	745,7	349,4	2,1	93,9	184,1	77,8	3,6	100,0	872,3	2428,7
C	00:09:56	4	653,3	317,3	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	974,4
E	00:30:15	3	589,2	0,6	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	590,5
Zuordnung <sup>1</sup>			(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(V)	(V)	(K)	

<sup>1</sup> Zuordnung zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (K)“ und „variable Verbrauchergruppe (V)“.

Die auf den PKV basierte Berechnung des TED<sub>M</sub> wurde entsprechend des entwickelten EEMA für den untersuchten Betriebszyklus durchgeführt. Hierdurch konnte ein TED<sub>M</sub> innerhalb des Betriebszyklus von 7,7 kWh berechnet werden (vgl. Kapitel 4.3, Formel 3 bzw. Formel 4). Es sei anzumerken, dass entgegen der theoretischen Vorgaben nach ISO 14955-1:2018 (vgl. Tabelle 4) bei einzelnen Verbrauchergruppen in spezifischen Betriebszuständen ein Leistungsbedarf gemessen wurde. So



wurde bspw. beim Hydraulikaggregat in dem Betriebszustand E ein Leistungsverlauf nachgewiesen. Diese Leistungsverläufe wurden innerhalb der oben genannten Berechnungen berücksichtigt.

Für die Validierung werden die berechneten Ergebnisse nun mit den an der Maschine gemessenen Realwerten verglichen, indem deren Abweichung mathematisch bestimmt wird. Wie in Armstrong und Collopy (1992) konstatiert, hat die Wahl der Methode zur Bestimmung der Abweichungen bzw. der Unsicherheiten einen enormen Einfluss auf Aussagen bzgl. der Genauigkeit des Modellierungsansatzes. Daher werden zur Prüfung der Validität des EEMA zwei Messfehlerberechnungsvarianten herangezogen: die relative Messabweichung sowie die normierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. Normalized Root-Mean-Square Error, NRMSE). Dadurch sollen die Unsicherheiten des Modellierungsansatzes quantifiziert werden.

Die Abweichung der auf den PKV basierten Berechnung des  $TED_M$  nach dem EEMA zu den gemessenen Realwerten wird als **relative Messabweichung** ausgewiesen. Diese wird wie folgt berechnet:

$$\text{Relative Messabweichung} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} * 100 \% \quad (6)$$

mit  $y_i$  als berechneter Wert und  $\hat{y}_i$  als gemessener Wert.

Zudem wird als zweite Fehlergröße eine normierte Form der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. Root-Mean-Square Error, RMSE), der **NRMSE**, in Anlehnung an Sossenheimer et al. (2020) ausgewiesen. Der RMSE ist eine *„Maßzahl zur Beurteilung der Prognosegüte“* (statista 2020) von prognostizierten Daten bzw. Modellen im Vergleich zu Beobachtungswerten bzw. gemessenen Daten. Die normierte Fehlergröße, der NRMSE, verhält sich zwar ähnlich wie ein über den Wertebereich normierter Fehler, führt aber nicht durch Ausreißer zu extremen Verzerrungen, wie sie bspw. bei dynamischen Energieverbrauchern durch Lastspitzen zustande kommen können (Sossenheimer et al. 2020). Er wird nach Sossenheimer et al. (2020) wie folgt berechnet:

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}{(y_{\max} - y_{\min})}} \quad (7)$$

mit  $y_i$  als berechneter Wert und  $\hat{y}_i$  als gemessener Wert,  $n$  als die Anzahl der Werte des Wertebereiches sowie  $y_{\max}$  bzw.  $y_{\min}$  als höchster bzw. niedrigster Wert des betrachteten Wertebereichs.

Tabelle 8 weist die Ergebnisse der berechneten relativen Messabweichung (vgl. Formel 6) und des NRMSE (vgl. Formel 7) bezogen auf die einzelnen Betriebszustände und den  $TED_M$  aus. Während die relative Messabweichung für den Betriebszustand  $A_{\text{Air}}$  bei -4,6 % liegt, liegt sie für C bei -0,8 % bzw. für E bei -0,2 %. Bezogen auf den  $TED_M$  lässt sich die relative Messabweichung berechnen zu -4,4 %. Der NRMSE liegt für den Betriebszustand  $A_{\text{Air}}$  bei 0,01, für den Betriebszustand C bei 0,029 und für den Betriebszustand E bei 0,004. Der NRMSE bezogen auf den TED liegt bei 0,008.

Tabelle 8: Fehlerausweisung in Bezug auf den berechneten Energiebedarf pro Betriebszustand bzw. Gesamtenergiebedarf: relative Messabweichung sowie NRMSE (Messkampagne EMAG VLC 100Y)

Betriebszustand	Energiebedarf [Ws]		Relative Messabweichung [%]	n	Y <sub>max</sub> [W]	Y <sub>min</sub> [W]	NRMSE
	y <sub>i</sub> (Berechnung) <sup>1</sup>	ŷ <sub>i</sub> (Messung)					
A <sub>Air</sub>	25.928.924,8	27.176.805,5	- 4,6	10680	11.309,2	-558,5	0,010
C	580.740,7	585.551,5	- 0,8	600	1.225,4	945,8	0,029
E	1.071.747,8	1.073.994,2	- 0,2	1818	888,7	579,8	0,004
<b>TED</b>	<b>27.581.413,3</b>	<b>28.836.351,2</b>	<b>- 4,4</b>	<b>13098</b>	<b>11.309,2</b>	<b>-558,5</b>	<b>0,008</b>

<sup>1</sup> y<sub>i</sub> entspricht dem berechneten Energiebedarf der Zerspanungsmaschine für die Betriebszustände A<sub>Air</sub>, C oder E bzw. dem TED<sub>M</sub> nach dem EEMA.

Mit gezeigter Bestimmung der Genauigkeit des Modellierungsansatzes unter den dargestellten Bedingungen können die Prognosegüte und somit die Gültigkeit des EEMA nachgewiesen werden. Dies bestätigt die Eignung der entwickelten, disaggregierten Berechnungsmethode zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen.

#### 4.5 Empfehlungen zur Datenerfassung der PKV

Die prozessorientierte Modellierung entsprechend eines Whitebox-Modells erfordert, wie in Kapitel 2.1.1.2 erläutert, eine disaggregierte Abbildung des Zerspanungsprozesses. Während für die Modellierung des Hintergrundsystems Durchschnittsdaten oder aggregierte Daten (z. B. zur Energiebereitstellung) ausreichend sein können, sollte das Vordergrundsystem durch prozessspezifische Daten (z. B. Energiebedarf) beschrieben werden (vgl. Curran 2006). Die Verbrauchsdaten in Form der Inputs und Outputs sollten somit als Primärdaten auf Aggregatsebene, d. h. auf Ebene der Verbrauchergruppen, direkt an der Werkzeugmaschine für die Bilanzierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen erhoben werden. Da die Datenerfassung im Betriebsumfeld allerdings mit nicht zu vernachlässigenden Herausforderungen verbunden ist und Messkampagnen an der Werkzeugmaschine i. d. R. zeit- und kostenaufwendig sind, soll an dieser Stelle eine praxisorientierte Empfehlung zur Primärdatenerhebung als Grundlage für die Ableitung der PKV des EEMA gegeben werden.

Mittels der Digitalisierung von Fertigungsumgebungen ist eine kontinuierliche, sensorbasierte Erfassung und automatisierte Auswertung des Ressourcenverbrauchs der Werkzeugmaschine bzw. der einzelnen Verbrauchergruppen möglich (Mourtzis et al. 2016). Hohe Relevanz hat hierbei die sensorgestützte Erfassung des Leistungsbedarfs im verarbeitenden Gewerbe, nicht nur aus Gründen der Zustandsüberwachung oder Steuerung der Werkzeugmaschine, sondern auch immer mehr um den Energiebedarf als wichtigen Kostentreiber nachhaltig zu optimieren. Die Erfassung des Leistungsbedarfs erfolgt entweder direkt durch die Werkzeugmaschine selbst mittels interner Sensorik oder durch nachgerüstete Sensorik. Der Energiebedarf wird daraus nachgelagert durch die Berücksichtigung der Dauer, in welchem die Leistungsmessung erfolgt ist, berechnet.

Aufgrund der hohen Kosten, die ein kontinuierlich betriebenes, nachgerüstetes Messequipment verursacht (Kara et al. 2011), gewinnen kosten- und sensorreduzierte Monitoring-Ansätze nach Sossenheimer et al. (2019) an Wichtigkeit. Obwohl moderne Werkzeugmaschinen eine große Menge an Daten erzeugen, findet eine strukturierte Auswertung der Daten im Bereich der Fertigung bisher nur bedingt statt (Sossenheimer et al. 2019). Maschineninterne Daten, die u. a. durch die SPS generiert werden, werden oft nur für die interne Steuerung herangezogen. Diese Daten (z. B. der Leistungsbedarf in einer definierten zeitlichen Auflösung) können aber ebenfalls zum Zwecke des Energiemonitorings verwendet werden (Metternich et al. 2021; Sossenheimer et al. 2019; Bauerdick et al. 2017).

Für den EEMA bedarf es einer Datenmodellierung und -erfassung auf Ebene der Verbrauchergruppen. Da dies einen hohen Messaufwand impliziert und, wie oben erwähnt, eine kontinuierliche sensorgestützte Datenerfassung kostenintensiv ist, empfiehlt sich für Unternehmen, gerade auch für solche mit geringem Digitalisierungsgrad, aus Gründen der Praktikabilität eine Kombination aus

- der Verwendung maschineninterner Daten (SPS),
- einer temporären sensorgestützten Erfassung der Verbräuche auf Ebene der Verbrauchergruppen (mobiles Messequipment) und
- der Herleitung der restlichen Daten aus mathematischen Modellen (Berechnungen).

Die temporäre, sensorgestützte Erfassung ist z. B. mit mobilen Messgeräten kostenorientiert umsetzbar (Metternich et al. 2021; Sossenheimer et al. 2019) und muss nur für solche Verbrauchergruppen erfolgen, deren Leistungskennwerte nicht über die interne SPS abrufbar sind. Berechnungen einzelner Leistungskennwerte von Verbrauchergruppen können dann erfolgen, wenn bspw. aggregierte Leistungskennwerte zu mehreren Verbrauchergruppen vorliegen und zusätzlich Informationen vorhanden sind, die einen Rückschluss auf den Leistungsbedarf der übrigen Verbrauchergruppen zulassen.

Vor Durchführung der eigentlichen Messkampagne sollte ermittelt werden, i) welche Betriebszustände programmbedingt auf der Werkzeugmaschine ablaufen, ii) welche Verbrauchergruppen vorhanden sind und iii) wie der jeweilige Leistungsbedarf entsprechend der vorhandenen Verbrauchergruppen in den verschiedenen Betriebszuständen ermittelt werden kann (sensorgestützte Erfassung, SPS, Berechnung). Darauf aufbauend ist ein Messplan zu entwickeln und durchzuführen. Es erfolgt die Datenerfassung des Leistungsbedarfs der einzelnen Verbrauchergruppen in den jeweiligen Betriebszuständen direkt durch eine Messung oder indirekt durch die SPS bzw. durch eine Berechnung in einer zuvor definierten zeitlichen Auflösung. Zu empfehlen ist hierbei aus Gründen der Präzision und Praktikabilität den Leistungsbedarf mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde zu ermitteln. Die innerhalb eines definierten Betriebszyklus erfassten Leistungsbedarfsdaten werden gemeinsam mit den Informationen, zu welchem Zeitpunkt die Daten erfasst wurden, in einem Dokument bzw. einer Datenbank zusammengeführt und bilden den Primärdatensatz. Nach Durchführung der Messkampagne lassen sich aus diesem Primärdatensatz die durchschnittlichen Leistungsbedarfswerte pro Verbrauchergruppe und pro Betriebszustand, die PKV, sowie die Anzahl an Iterationen und die jeweiligen Perioden, in denen die einzelnen Betriebszustände abgelaufen sind, berechnen bzw. ableiten. Die so ermittelten PKV können zur Berechnung des  $TED_M$  bzw. des  $TED_P$  entsprechend der Formel 4 bzw. Formel 5 (Kapitel 4.3) verwendet werden.

Für Vergleichsvorhaben von Zerspanungsprozessen empfiehlt es sich außerdem, zusätzlich den Leistungsbedarf der Werkzeugmaschine in der Standardmaschineneinstellung während des Luftschnitts zu messen und auszuweisen. Nach Yoon et al. (2014) ist der Energiebedarf des Luftschnitts, wie bereits erwähnt, nur 2 bis 3 % geringer als der Energiebedarf der tatsächlichen Materialzerspanung. Durch die Ausweisung des Energiebedarfs des Betriebszustands A im Luftschnitt kann v.a. der Einfluss des zu bearbeitenden Werkstoffs und der Achsenfahrwege des spezifischen Zerspanungsprogramms auf den Leistungsbedarf ausgeschlossen werden (Yoon et al. 2014). Dementsprechend können daraus resultierende Abweichungen oder Unsicherheiten bei der Bestimmung des TED und dem Vergleich unterschiedlicher Zerspanungsprozesse vermieden werden.

Die resultierenden Informationen aus der Primärdatenerhebung (Messdauer und Anzahl der Messung pro Betriebszustand, PKV pro Verbrauchergruppe und Betriebszustand) sollten wie in Tabelle 9 dargestellt, dokumentiert werden.

Tabelle 9: Dokumentation der relevanten Informationen für den EEMA

Zerspanungsmaschine XY (Hersteller, Baujahr), Zerspanungsprozess YZ																
Betriebszustand	Messdauer Gesamt [hh:mm:ss]	Anzahl	PKV je Verbrauchergruppe <sup>2</sup>													PKV je Betriebszustand
			Hauptschalter, Steuerung (HS)	Beleuchtung (B)	Hydraulik (H)	Kühlung (K)	Ventilation (V)	sonst. Nebenaggregate (N)	Absaugung (A)	Achsenantrieb (AA)	Späneförderer (SF)	Spindel (S)	Werkzeug (W)	Kühlschmiermittel (KS)	Materialabtrag (M)	
Zuordnung <sup>1</sup>			Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ
A	t <sub>A</sub>	# <sub>A</sub>	<b>P<sub>A-HS</sub></b>	<b>P<sub>A-B</sub></b>	<b>P<sub>A-H</sub></b>	<b>P<sub>A-K</sub></b>	<b>P<sub>A-V</sub></b>	<b>P<sub>A-N</sub></b>	<b>P<sub>A-A</sub></b>	<b>P<sub>A-AA</sub></b>	<b>P<sub>A-SF</sub></b>	<b>P<sub>A-S</sub></b>	<b>P<sub>A-W</sub></b>	<b>P<sub>A-KS</sub></b>	<b>P<sub>A-M</sub></b>	<b>P<sub>A</sub></b>
B	t <sub>B</sub>	# <sub>B</sub>	<b>P<sub>B-HS</sub></b>	<b>P<sub>B-B</sub></b>	<b>P<sub>B-H</sub></b>	<b>P<sub>B-K</sub></b>	<b>P<sub>B-V</sub></b>	<b>P<sub>B-N</sub></b>	<b>P<sub>B-A</sub></b>	<b>P<sub>B-AA</sub></b>	<b>P<sub>B-SF</sub></b>	<b>P<sub>B-S</sub></b>	<b>P<sub>B-W</sub></b>	<i>P<sub>B-KS</sub></i>	-	<b>P<sub>B</sub></b>
C	t <sub>C</sub>	# <sub>C</sub>	<b>P<sub>C-HS</sub></b>	<b>P<sub>C-B</sub></b>	<b>P<sub>C-H</sub></b>	<b>P<sub>C-K</sub></b>	<b>P<sub>C-V</sub></b>	<b>P<sub>C-N</sub></b>	<i>P<sub>C-A</sub></i>	<b>P<sub>C-AA</sub></b>	<i>P<sub>C-SF</sub></i>	<b>P<sub>C-S</sub></b>	<i>P<sub>C-W</sub></i>	<i>P<sub>C-KS</sub></i>	-	<b>P<sub>C</sub></b>
D	t <sub>D</sub>	# <sub>D</sub>	<b>P<sub>D-HS</sub></b>	<b>P<sub>D-B</sub></b>	<b>P<sub>D-H</sub></b>	<b>P<sub>D-K</sub></b>	<b>P<sub>D-V</sub></b>	<b>P<sub>D-N</sub></b>	<i>P<sub>D-A</sub></i>	-	<i>P<sub>D-SF</sub></i>	-	<i>P<sub>D-W</sub></i>	<i>P<sub>D-KS</sub></i>	-	<b>P<sub>D</sub></b>
E	t <sub>E</sub>	# <sub>E</sub>	<b>P<sub>E-HS</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>P<sub>E</sub></b>
F	t <sub>F</sub>	# <sub>F</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>P<sub>F</sub></b>
G	t <sub>G</sub>	# <sub>G</sub>	<b>P<sub>G-HS</sub></b>	<b>P<sub>G-B</sub></b>	<b>P<sub>G-H</sub></b>	<b>P<sub>G-K</sub></b>	<b>P<sub>G-V</sub></b>	<b>P<sub>G-N</sub></b>	<i>P<sub>G-A</sub></i>	<b>P<sub>G-AA</sub></b>	<i>P<sub>G-SF</sub></i>	<b>P<sub>G-S</sub></b>	<i>P<sub>G-W</sub></i>	<i>P<sub>G-KS</sub></i>	-	<b>P<sub>G</sub></b>
A <sub>Air</sub>	t <sub>Air</sub>	# <sub>Air</sub>	<b>P<sub>Air-HS</sub></b>	<b>P<sub>Air-B</sub></b>	<b>P<sub>Air-H</sub></b>	<b>P<sub>Air-K</sub></b>	<b>P<sub>Air-V</sub></b>	<b>P<sub>Air-N</sub></b>	<b>P<sub>Air-A</sub></b>	<b>P<sub>Air-AA</sub></b>	<b>P<sub>Air-SF</sub></b>	<b>P<sub>Air-S</sub></b>	<b>P<sub>Air-W</sub></b>	<b>P<sub>Air-KS</sub></b>	-	<b>P<sub>Air</sub></b>

<sup>1</sup> Zuordnung zu den Kategorien konstante Ⓚ und variable Ⓟ Verbrauchergruppe.

<sup>2</sup> Ausweisung der relevanten (Schriftart, fett), nicht relevanten (-) oder in Abhängigkeit von der Zerspanungsmaschine relevanten (Schriftart, kursiv) Verbrauchergruppen je Betriebsphase. Die Relevanz der Verbrauchergruppen muss für jede Zerspanungsmaschine einzeln überprüft werden.

Der große Mehrwert des EEMA liegt in der Wiederverwendbarkeit der konstanten PKV für die Berechnung des TED anderer Zerspanungsprozesse auf einer spezifischen Werkzeugmaschine. Da die variablen PKV abhängig vom jeweiligen Werkstück bzw. vom jeweiligen Zerspanungsprozess sind, sind sie jeweils für Prozessvarianten neu zu ermitteln. Hierfür können die variablen PKV, P<sub>A-S</sub> für die Verbrauchergruppe Spindel und P<sub>A-W</sub> für die Verbrauchergruppe Werkzeug, über die SPS erhoben werden. Der variable PKV P<sub>A-M</sub> für die Verbrauchergruppe Materialabtrag kann demgegenüber über die Berechnung  $P_{A-M} = k \cdot \dot{v}$  (vgl. Balogun und Mativenga 2013) gewonnen werden (vgl. Formel 1). Somit sind für Nachfolgeuntersuchungen auf der jeweiligen Werkzeugmaschine keine zusätzlichen aufwendigen Messkampagnen mehr notwendig.

## **5 Verbindung des EEMA mit dem LCA als Grundlage für den Carbon Accounting Ansatz**

Die nachfolgenden Unterkapitel dienen der Beantwortung der dritten Unterforschungsfrage: *Welche methodischen Schritte sind notwendig um das entwickelte Modell in das LCA und somit in das Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019 zu integrieren?*

Zu diesem Zweck erfolgt zunächst eine detaillierte Erläuterung zur Verbindung des EEMA mit dem LCA und zu berücksichtigender Anforderungen. Die damit einhergehende Integration des EEMA in das LCI hat dabei das Ziel, transparente und parametrisierte LCI-Datensätze für den Inputfluss „Strom“ zu erzeugen. Die Implikationen, welche sich aus dieser Verbindung für die resultierenden LCI-Datensätze ergeben, werden zum Anlass genommen, um nach generellen Verbesserungspotenzialen für die Datenlandschaft im Forschungsbereich des LCA zu suchen. Zudem begründet die Verbindung des EEMA mit dem LCA den zu entwickelnden systematischen Verfahrensansatz für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen. Die entsprechende Konzeptionierung des Verfahrens, eine detaillierte und praxisorientierte Verfahrensbeschreibung sowie die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Verbesserung der Eingangsdaten und damit der Bilanzierungsergebnisse werden am Ende des Kapitels vorgestellt.

### **5.1 Integration des EEMA in das LCI**

Wie durch Sonnemann und Vigon (2011) dargestellt, werden LCI-Datensätze dadurch generiert, indem Rohdaten mit Hilfe mathematischer Relationen zu einem funktionellen Fluss, der FU, in Beziehung gesetzt werden. Diese mathematische Beziehung wird in dieser Arbeit durch den entwickelten EEMA auf Basis der PKV zur Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen hergestellt. Aus der in Kapitel 2.2.3 gewonnenen Erkenntnis, dass nur Modellierungsansätze der Kategorie 3 den TED abbilden können, werden durch diese Festlegung im Umkehrschluss direkt die technologischen Systemgrenzen für entsprechende LCA-Studien definiert. Abbildung 17 zeigt das abstrahierte Produktsystem mit den zugrunde liegenden Systemgrenzen für das LCA des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses ( $TED_p$ ) für die FU „Spanen eines spez. Produkts“ innerhalb eines definierten Betriebszyklus.

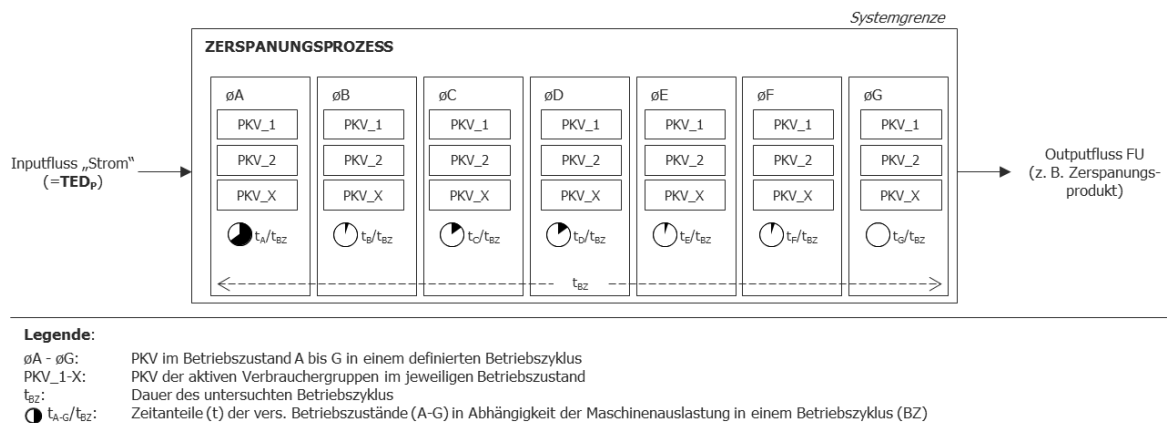


Abbildung 17: Schematische Darstellung des abstrahierten Produktsystems zur Bilanzierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses innerhalb eines definierten Betriebszyklus basierend auf dem EEMA (eigene Darstellung)

Nachfolgend werden die relevanten Eckpunkte erläutert, die bei der Integration des EEMA in das LCA und dabei v. a. in das LCI berücksichtigt werden müssen und welche Implikationen sich daraus für resultierende LCI-Datensätze ergeben.

In der ersten Phase des LCA, der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, sind das definierte Ziel der LCA-Studie, die anvisierte Adressatengruppe sowie die beabsichtigte Entscheidungsunterstützung für die Wahl einer geeigneten FU bestimmend. Diese festgelegte FU ist dabei entscheidend für alle weiteren Bearbeitungsschritte, z. B. die Festlegung der Systemgrenzen sowie die nachfolgende Datenerhebung und -quantifizierung im Rahmen des LCI. Bei Reinhardt (2013) wird die Fertigung eines Produktes als „die bestimmende Funktion der Prozesskette“ (Reinhardt 2013) verstanden. Daran angelehnt wird in der vorliegenden Arbeit zur lebenszyklusorientierten Bilanzierung des TED von Zerspanungsprozessen empfohlen, die FU produktbezogen (z. B. Fertigung eines Zerspanungsprodukts) festzulegen.<sup>53, 54</sup>

Allerdings ist, wie in Kapitel 2.4 erörtert, bei der Wahl einer produktbezogenen FU (genauso wie bei der Wahl einer prozessbezogenen FU) innerhalb der lebenszyklusorientierten Modellierung des TED – aufgrund der Nichtlinearität zwischen der Materialabtrags- bzw. Produktionsrate und dem TED – entscheidend, dass der zugrunde liegende Referenzfluss so definiert wird, dass er den TED adäquat repräsentieren kann. Nach dem Vorbild der Arbeit von Kellens et al. (2012b) soll daher der

<sup>53</sup> Hierbei ist zu beachten, dass wenn die Wahl für ein Produktsystem auf eine produktbezogene FU fällt (z. B. Fertigung eines Zerspanungsprodukts), welches nach dem Materialabtrag endet, kann dies grundsätzlich größere technische Systemgrenzen entsprechend einer „cradle-to-gate“-Modellierung bedingen. Ist dies der Fall, kann ein entsprechend passendes prozessbezogenes System (z. B. hinsichtlich des Materials oder der Maschinenauslastung), welches entsprechend einer „gate-to-gate“-Modellierung erstellt wurde, auf die neue produktbezogene FU normieren werden.

<sup>54</sup> Je nach Interessenslage des Unternehmens bzw. Adressatengruppe kann die grundsätzliche Wahl der FU unterschiedliche Vorteile mit sich bringen. Soll der TED und darauf aufbauende Umweltbewertungen bspw. dazu verwendet werden verschiedene Zerspanungsprozesse im Rahmen des Energiemanagements miteinander zu vergleichen, ist als Bezugseinheit des LCA möglicherweise eine prozessbezogene FU vorteilhafter. Soll hingegen die Umweltperformanz unterschiedlicher Zerspanungsprodukte bspw. zu Marketingzwecken ausgewiesen werden, kann eine produktbezogene FU als geeigneter angesehen werden. Für die Ausweisung der Umweltperformanz aller Zerspanungsprozesse resp. Zerspanungsprodukte an einem Standort oder des gesamten Unternehmens über einen definierten Betriebszyklus können somit je nach Sichtweise und gewünschter Kommunikationsabsicht des zu berichtenden Unternehmens beide FU-Varianten zweckdienlich sein.

Referenzfluss für den TED durch eine zeitliche Perspektive, bspw. mittels einer Referenzsekunde, parametrisiert und somit transparent ausgedrückt werden.<sup>55</sup> Der TED für eine Referenzsekunde ( $TED_{P/s}$ ) eines spezifischen Zerspanungsprozesses resp. eines spezifischen Zerspanungsproduktes auf Basis des entwickelten EEMA kann wie folgt formuliert werden:

$$TED_{P/s} = \frac{TED_P}{\varnothing t_A} = \frac{1}{z \cdot \varnothing t_A} (TED_M) \quad (8)$$

mit  $TED_P$  als der TED des Zerspanungsprozesses in [kWh] nach Formel 5, Kapitel 4.3,  $TED_M$  als TED der Zerspanungsmaschine nach Formel 3 bzw. Formel 4, Kapitel 4.3, sowie  $\varnothing t_A$  in [s] als mittlere Gesamtdauer des Zerspanungsprozesses bzw. des Betriebszustandes „Bearbeitung“ innerhalb des betrachteten Betriebszyklus.

Wie oben bereits dargelegt, wird der Inputfluss "Strom" zur Modellierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses durch den  $TED_P$  auf Basis des EEMA im Rahmen des LCI repräsentiert. Die grundsätzlichen Schritte zur entsprechenden Datenquantifizierung innerhalb des LCI gestalten sich hierfür folgendermaßen: Die Primärdaten des Leistungsbedarfs, welche aus Messungen an der Zerspanungsmaschine gewonnen werden, werden in die PKV umgerechnet. Die PKV werden gemäß dem Ziel und Untersuchungsrahmen des LCA (Phase 1) generiert und repräsentieren den durchschnittlichen Leistungsbedarf der verschiedenen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der definierbaren Maschinen- und Prozessspezifika (z. B. Betriebszustand, Betriebszeit/-zyklus). Ausgehend von den PKV kann der  $TED_P$  (bzw. der  $TED_M$ ) parametrisiert berechnet werden (vgl. Formel 5, Kapitel 4.3).<sup>56</sup> Das Ergebnis, das auch parametrisiert auf Grundlage der PKV in den LCI-Datensatz einfließen soll, repräsentiert den Inputfluss „Strom“ (bzw. „elektrische Energie“).

Durch die Analyse der LCI-Datensätze aus konventionellen Datenbanken und themenrelevanter LCA-Studien in Kapitel 2.3.1 und Kapitel 2.3.2 konnte gezeigt werden, dass der Inputfluss „Strom“ im LCI i. d. R. nur als absoluter Einzelwert dargestellt wird. Aus den entsprechenden Datensätzen ist somit oft nicht klar ersichtlich, wie sich der Einzelwert zusammensetzt. Derartige Informationen sind, wenn überhaupt, in Beschreibungen oder Dokumentationen zu den Datensätzen enthalten (vgl.ecoinvent 2021a; GaBi 2019). Somit ist die Aussagekraft von Einzelwerten in Form der Input- und Outputflüsse v. a. in prozessorientierten LCI-Datensätzen nicht ausreichend, um wie gefordert das zugrunde liegende Prozesssystem transparent darzustellen und zu beschreiben (Blackbox-Modellierung). Da bestehende LCI-Datensätze von Zerspanungsprozessen dadurch nicht nur Defizite in Bezug auf die Transparenz, sondern auch hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit, Plausibilität und Vergleichbarkeit aufweisen, haben auch die nachfolgenden Bewertungsprozesse und -ergebnisse (z. B. im Rahmen des LCIA) diese qualitativen Einschränkungen. Um die Informationstiefe der hier dargestellten Modellierung zu erhöhen, welche mit der Ausweisung eines Einzelwerts innerhalb des LCI-Datensatzes nicht transportiert werden (vgl. Sonnemann und Vigon 2011), sollen innerhalb des LCI-Datensatzes daher

<sup>55</sup> Hinweis: Bei einer produktbezogenen FU kann der Referenzfluss grundsätzlich auch durch den  $TED_P$  abgebildet werden. Sollen daneben weitere materielle betriebliche Ressourcen in das LCA einbezogen werden, muss deren Verbrauch auch nicht nur ganzheitlich berücksichtigt werden, sondern in diesem Fall auch auf die mittlere Bearbeitungsdauer des Zerspanungsprozesses  $\varnothing t_A$  bezogen werden. Die Erfassung und Handhabung von Referenzsekunden-Werten bei der Modellierung von Zerspanungsprozessen scheinen demgegenüber praxisfreundlicher und übertragbarer.

<sup>56</sup> Hierbei sei anzumerken, dass je nach Ziel und Untersuchungsabsicht der zugrunde liegenden LCA-Studie auch die Ermittlung des  $TED_M$  innerhalb eines definierten Betriebszyklus von Relevanz sein kann. Die Berechnung würde dann entsprechend der Formel 3 bzw. 4 in Kapitel 4.3 erfolgen.

neben dem Einzelwert die wesentlichen Hintergrundinformationen des Zerspanungsprozesses berichtet werden.

Mit dem EEMA lässt sich – je nach Untersuchungsschwerpunkt – der  $TED_M$  bzw.  $TED_P$  ganzheitlich ermitteln. Die Modellierung erfolgt dabei in Bezug auf einen definierten Systemrahmen (entsprechend dem Ziel- und Untersuchungsrahmen des LCA), auf Basis von Primärdaten sowie definierbaren Maschinen- und Prozessspezifika, wie Betriebszustände und -zeiten sowie auf Ebene der Verbrauchergruppen der Werkzeugmaschine. Das Endergebnis des EEMA ist, wie oben beschrieben, der berechnete TED in Form einer absoluten Zahl. Dieser absolute Wert ergibt sich aus der Aggregation der aggregatsspezifischen PKV in Abhängigkeit der verschiedenen Betriebszustände in Verbindung mit den jeweiligen Zeitanteilen. Genau diese Hintergrundinformationen schaffen die nach Sonnemann und Vigon (2011) geforderte Systemtransparenz. Auch Kellens et al. (2012b) haben bereits empfohlen, die Transparenz durch die Ausweisungen zusätzlicher Hintergrundinformationen zu erhöhen. Allerdings wurde durch die Autoren nicht spezifiziert, welche Informationen in die LCI-Datensätze eingegliedert werden sollen. Daher wird an dieser Stelle eine dezidierte Empfehlung ausgesprochen, die nachfolgenden Hintergrundinformationen in Bezug auf den Energiebedarf von Zerspanungsprozessen innerhalb von LCI-Datensätzen zu dokumentieren und verbindlich auszuweisen:

- Maschinentyp, Hersteller, Baujahr sowie eine Kurzbeschreibung des Zerspanungsprozesses;
- mögliche Betriebszustände, die die Werkzeugmaschine durchlaufen kann, bestenfalls mit einer kurzen Beschreibung bzw. Charakterisierung der einzelnen Betriebszustände;
- existierende konstante und variable Verbrauchergruppen auf Maschinenebene, bestenfalls mit Nennung und kurzer Charakterisierung der entsprechenden Aggregate;
- PKV der identifizierten Verbrauchergruppen in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebszustands;
- PKV der identifizierten Betriebszustände sowie
- Messdauer sowie Anzahl der Iterationen der jeweiligen Betriebszustände.

In Tabelle 9 (Kapitel 4.5) sind die obenstehenden wesentlichen Hintergrundinformationen strukturiert und kompakt aufgeführt. Es wird empfohlen, diese tabellarische Übersicht in LCI-Datensätze für Zerspanungsprozesse inkl. weiterer beschreibender Elemente (z. B. Charakterisierung der Betriebszustände oder Aggregate) zu integrieren.

Die parametrisierte Ausweisung der Energiebedarfsanteile auf Basis der PKV für die konstanten und variablen Verbrauchergruppen innerhalb eines LCI-Datensatzes schafft für den Anwender zudem den Vorteil, dass die konstanten PKV für Nachfolgeuntersuchungen (z. B. weitere Prozessvarianten oder das Spanen eines anderen Produktes) an der jeweiligen Werkzeugmaschine einfach wiederverwendet werden können. Hierbei müssen durch den Anwender nur die jeweiligen Zeitanteile der Betriebszustände sowie die PKV für die variablen Verbrauchergruppen in den Datensatz neu eingepflegt werden. Dabei können die variablen PKV aus Maschinenparametern abgeleitet (SPS, Berechnung) werden und müssen nicht erneut mittels einer aufwendigen Messkampagne erhoben werden (vgl. Kapitel 4.5). Für Unternehmen, die die so erzeugten LCI-Datensätze einfach in ihren produktionsstandortspezifischen oder organisationsübergreifenden Datenbanken speichern und für Nachfolgeuntersuchungen an der jeweiligen Werkzeugmaschine leicht wiederverwenden können, wird somit die Phase der Datensammlung innerhalb des LCI erheblich vereinfacht. Zudem vermindert das Vorgehen mögliche Störungen im Betriebsablauf und kann dadurch mögliche Hemmnisse in Bezug auf die Durchführung von aufwendig und kapazitätsintensiv geglaubten LCA-Untersuchungen in der Praxis abbauen.



Durch die beschriebene Integration des EEMA in das LCI können die nachfolgend aufgeführten Stärken der daraus resultierenden LCI-Datensätze im Vergleich zu den in Kapitel 2.3 analysierten LCI-Datensätzen aus konventionellen Datenbanken sowie den analysierten LCA-Studien direkt abgeleitet werden:

- *Methodische Konsistenz* aufgrund der ganzheitlichen Berücksichtigung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses in Form des TED, der Differenzierung zwischen der FU und dem Referenzfluss und der Wahrung der Linearität zwischen den funktionellen Flüssen und den Berechnungsergebnissen des LCI und des LCIA innerhalb der lebenszyklusorientierten Modellierung;
- *Erhöhung der Transparenz* durch die Eingliederung des Einzelwerts für den Inputfluss „Strom“ in Verbindung mit der verbindlichen Ausweisung der relevanten Hintergrundinformationen innerhalb des LCI-Datensatzes;
- *Schaffung einer Vergleichsbasis* von entsprechenden LCI-Datensätzen, die auf Grundlage dieser Methodik modelliert wurden, aufgrund des fest definierten Systemrahmens zur Bestimmung des TED (entsprechend der Kategorie 3-Modellierung, vgl. Kapitel 2.2.3) sowie der Ausweisung der Energiebedarfsanteile auf Basis der PKV für die Verbrauchergruppen und Betriebszustände.
- *Direkte Übertragbarkeit bzw. Wiederverwendbarkeit* der konstanten PKV für Nachfolgeuntersuchungen auf einer Werkzeugmaschine dank parametrisierter LCI-Datensätze.

## 5.2 Potenziale für die Datenlandschaft im Bereich des LCA

Die zuvor aufgeführten Implikationen für spezifische LCI-Datensätze, die aus der Verbindung des EEMA mit dem LCI resultieren, lassen Potenziale zur Verbesserung der forschungsthemenbezogenen Datenlandschaft im Bereich des LCA vermuten. Anhand zweier Fallbeispiele werden daher zunächst die auf Basis des EEMA erzeugten LCI-Daten für den jeweiligen Inputfluss „Strom“ sowie entsprechende generische LCI-Daten aus konventionellen LCA-Datenbanken gegenübergestellt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse liefern Aufschluss über mögliche Schwächen bestehender generischer LCI-Datensätze aus konventionellen LCA-Datenbanken. Darauf aufbauend werden Möglichkeiten zur Ableitung verbesserter generischer LCI-Datensätze für den Inputfluss „Strom“ auf Basis des EEMA vorgestellt, welche in konventionelle LCA-Datenbanken eingepflegt werden und die LCA-Datenlandschaft im Bereich der Energiemodellierung von Zerspanungsprozessen verbessern können.

### 5.2.1 Gegenüberstellung auf Basis des EEMA erzeugter und generischer LCI-Daten

Die mittels des EEMA generierten Energiebedarfswerte, die als Quantifizierung für den Inputfluss „Strom“ in das LCI integriert werden können, sollen entsprechenden generischen LCI-Daten aus konventionellen LCA-Datenbanken gegenübergestellt werden. Dabei geht es bei diesem Schritt weniger um den direkten Vergleich der quantifizierten Werte, sondern vielmehr darum, einen übersichtsmäßigen Eindruck von der Annehmbarkeit bzw. Nachvollziehbarkeit der entsprechenden LCI-Daten zu gewinnen.

Innerhalb der Gegenüberstellung werden für zwei Fallbeispiele Energiebedarfswerte für einen Zerspanungsprozess (TED<sub>p</sub>) auf Basis des EEMA berechnet, welche als Quantifizierung für den Inputfluss „Strom“ in entsprechende LCI-Datensätze integriert werden könnten. Diese Werte werden dem Inputfluss „Strom“ aus ausgewählten LCI-Datensätzen der in der Praxis etablierten LCA-Datenbanken ecoinvent (v3.8, cut-off) und GaBi (2019) gegenübergestellt, welche für eine Modellierung dieser Fallbeispiele geeignet wären. Aufgrund der Größe der beiden Datenbanken, deren Etablierung in der

Praxis, sowie deren Reputation am Markt, repräsentieren diese sehr gut die vorhandene Datenlandschaft im Bereich des LCA.

Die Fallbeispiele basieren auf Primärdaten aus Messreihen an zwei spanenden Werkzeugmaschinen. Durch die Bestimmung der PKV auf Betriebszustandsebene erfolgt in Abhängigkeit der Maschinenauslastung jeweils die Quantifizierung des Gesamtenergiebedarfs für einen Zerspanungsprozess, also die Bestimmung des  $TED_P$  („gate-to-gate“-Modellierung). Die Fallbeispiele werden nachfolgend vorgestellt.

#### Fallbeispiel 1: Fräsen eines Zylinderbodens

Innerhalb des ersten Fallbeispiels werden innerhalb einer 8-h-Schicht Zylinderböden ( $\varnothing 25$ ) für einen Pneumatik-Kompaktzylinder aus Edelstahl auf der CNC-gesteuerten Fräsmaschine Deckel Maho DCM 50H (DECKEL MAHO GmbH, 2001) in der CiP Lernfabrik am Standort Lichtwiese der TU Darmstadt gefertigt. Der Betriebszustand A dauert 420 s. Der Materialabtrag liegt durchschnittlich bei 106,2 g (Masse Endprodukt: 96 g) und der Energiebedarfsanteil der variablen Verbrauchergruppen in Betriebszustand A liegt bei 5,81 %. Der Betriebszustand B hat eine programmbedingte Länge von 232 s. Die maximale Tagesproduktion an Endprodukten liegt bei 68 Stück. Der Zeitanteil für Betriebszustand F wird mit 0,03 % (8 s) angenommen. Die übrigen Zeitanteile für die Betriebszustände C und G werden 1:1 angesetzt. Tabelle 10 zeigt neben der zusammenfassenden Übersicht der getroffenen Annahmen, die auf Basis der Primärdaten berechneten PKV in Abhängigkeit der Betriebszustände sowie die für den Betriebszyklus berechneten Werte des  $TED_P$  in Abhängigkeit der Anzahl der gefertigten Bauteile bzw. der Maschinenauslastung. Letztere entspricht dem Zeitanteil des Betriebszustand A innerhalb der unterschiedlichen Szenarien und ergibt sich durch die Variation der gefertigten Stückzahl (100 %, 75 %, 50 %, 25 % der max. Tagesproduktion bzw. ein gefertigtes Bauteil innerhalb des Betriebszyklus).

Tabelle 10: Fallbeispiel 1: Berechnung des  $TED_P$  in Abhängigkeit der Maschinenauslastung, Messreihe – Deckel Maho DCM 50H

- Werkzeugmaschine: Deckel Maho DCM 50H (Prozesslernfabrik CiP, TU Darmstadt)								
- Untersucher Betriebszyklus: 8-h-Schicht								
- Dauer Betriebszustand A: 420 s (= 7 min)								
- Dauer Betriebszustand B: 232 s (= 3,9 min)								
- Maximale Tagesproduktion: 68 Bauteile (Ausschussquote: 0 %)								
- Spanen (Fräsen) eines Zylinderbodens ( $\varnothing 25$ ) für einen Pneumatik-Kompaktzylinder aus Edelstahl								
- Materialabtrag: 106,2 g (Vorprodukt: 202,2 g; Endprodukt: 96 g)								
- Während des angenommenen Betriebszyklus ergeben sich die Zeitanteile für die Betriebszustände A und B aus den oben genannten programmbedingten Zeitdauern. Der Zeitanteil für Betriebszustand F wird mit 0,03 % (8 s) angenommen. Die übrigen Zeitanteile für die Betriebszustände C und G werden 1:1 angesetzt.								
- Berechnung des $TED_M$ und $TED_P$ basierend auf den PKV pro Betriebszustand, s. u.								
PKV je Betriebszustand		Anz. Bauteile [St]	68	51	34	17	1	
<b>A</b>	4.509,84	Zeitanteile [%]	<b>A</b>	99,17	74,38	49,58	24,79	1,46
<b>B</b>	1.366,27		<b>B</b>	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
<b>C</b>	2.163,14		<b>C</b>	0,00	12,40	24,79	37,19	48,85
<b>F</b>	0,00		<b>F</b>	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
<b>G</b>	1.002,03		<b>G</b>	0,00	12,40	24,79	37,19	48,85
<b><math>TED_M</math> [kWh]</b>				35,87	30,06	24,25	18,45	12,98
<b><math>TED_P</math> [kWh]</b>				<u>0,53</u>	<u>0,59</u>	<u>0,71</u>	<u>1,09</u>	<u>12,98</u>

#### Fallbeispiel 2: Drehen eines Kugellabyrinths

Innerhalb des zweiten Fallbeispiels werden innerhalb einer 8-h-Schicht Kugellabyrinth aus Edelstahl auf der CNC-Drehmaschine EMAG VLC 100Y (EMAG GmbH & Co. KG, Baujahr 2014) als Give-Away im

Rahmen des Transferprojektes ArePron (vgl. Anhang A.2) in der ETA-Fabrik am Standort Lichtwiese der TU Darmstadt gefertigt. Der Betriebszustand A dauert 821 s. Der Materialabtrag liegt durchschnittlich bei 330,4 g (Masse Endprodukt: 365,5 g). Der spezifische Energiebedarfsanteil der variablen Verbrauchergruppen in Betriebszustand A ist für das vorliegende Fallbeispiel durch die Primärdaten nicht bekannt. Dieser wird aber konservativ auf 10 % geschätzt. Ein spezifisches Anfahrprogramm auf der Werkzeugmaschine (Betriebszustand B) existiert nicht. Die maximale Tagesproduktion an Endprodukten liegt bei 40 Stück. Die Zeitanteile für Betriebszustand C und E werden 1:1 angesetzt. Tabelle 11 zeigt neben der zusammenfassenden Übersicht der getroffenen Annahmen, die auf Basis der Primärdaten berechneten PKV in Abhängigkeit der Betriebszustände sowie die für den Betriebszyklus berechneten Werte des  $TED_p$  in Abhängigkeit der Anzahl der gefertigten Bauteile bzw. der Maschinenauslastung. Letztere entspricht, wie auch bei Fallbeispiel 1, dem Zeitanteil des Betriebszustand A innerhalb der unterschiedlichen Szenarien und ergibt sich durch die Variation der gefertigten Stückzahl (100 %, 75 %, 50 %, 25 % der max. Tagesproduktion bzw. ein gefertigtes Bauteil innerhalb des Betriebszyklus).

Tabelle 11: Fallbeispiel 2: Berechnung des  $TED_p$  in Abhängigkeit der Maschinenauslastung, Messreihe – EMAG VLC 100Y, Transferprojekt ArePron

- Werkzeugmaschine: EMAG VLC 100Y (ETA-Fabrik, Technische Universität Darmstadt)								
- Untersucher Betriebszyklus: 8-h-Schicht								
- Dauer Betriebszustand A: 821 s (= 13,7 min)								
- Dauer Betriebszustand B: programmbedingt nicht vorhanden								
- Maximale Tagesproduktion: 40 Bauteile (Ausschussquote: 0 %)								
- Spanen (Drehen) eines Kugellabyrinths aus Edelstahl (Werkstoff X14CrMoS17) – Daten aus Untersuchungen des Transferprojektes ArePron, vgl. Anhang A.2								
- Materialabtrag: 330,4 g (Vorprodukt: 695,9 g; Endprodukt: 365,5 g);								
- Während des angenommenen Betriebszyklus ergeben sich die Zeitanteile für den Betriebszustand A aus oben genannter programmbedingter Zeitdauer. Die Zeitanteile für Betriebszustand C und E werden 1:1 angesetzt.								
- Berechnung des $TED_M$ und $TED_p$ basierend auf den PKV pro Betriebszustand, s. u.								
PKV je Betriebszustand		Anz. Bauteile [St]	40	30	20	10	1	
A	2.364,76 W	Zeit- anteile [%]	A	98,61	73,96	49,31	24,65	2,47
C	974,40 W		B	0,69	13,02	25,35	37,67	48,77
E	590,50 W		C	0,69	13,02	25,35	37,67	48,77
<b><math>TED_M</math> [kWh]</b>				18,74	15,62	12,50	9,38	6,57
<b><math>TED_p</math> [kWh]</b>				<u>0,46</u>	<u>0,52</u>	<u>0,63</u>	<u>0,94</u>	<u>6,57</u>

Als Eingangsgröße für die Gegenüberstellung wird für beide Fallbeispiele jeweils der  $TED_p$  bei mittlerer Maschinenauslastung gewählt (produzierte Stückzahl in Fallbeispiel 1 mit 34 St und in Fallbeispiel 2 mit 20 St, s. Tabelle 10 und Tabelle 11).

#### Gegenüberstellung der LCI-Daten für den Inputfluss „Strom“

Um die Zerspanungsprozesse der Fallbeispiele mittels passender LCI-Datensätze (vgl. Anhang A.3) abzubilden, werden entsprechend der vorgestellten Angaben möglichst passende generische LCI-Datensätze aus den LCA-Datenbanken ecoinvent (v3.8, cut-off) und GaBi (2019) ausgewählt. Die begründete Auswahl ist dabei nachfolgend für die jeweiligen Prozessvarianten und Datenbankquellen in Anhang A.7 beschrieben. Zur Abbildung der Fallbeispiele bzw. Gegenüberstellung der jeweiligen LCI-Daten für den Inputfluss „Strom“ werden nachfolgende generische Datensätze aus den Datenbanken herangezogen:

- Fallbeispiel 1:
  - ecoinvent (v3.8, cut-off): *“chromium steel removed by milling, average | Cut-off, U – RER”*;

- GaBi (2019): *“Steel high-alloyed machining (0.47 kg shavings per 1 kg part); single route, at plant”*;
- Fallbeispiel 2:
  - ecoinvent (v3.8, cut-off): *“chromium steel removed by turning, primarily roughing, computer numerical controlled | Cut-off, U – RER”* sowie *“chromium steel removed by turning, average, computer numerical controlled | Cut-off, U – RER”*;
  - GaBi (2019): *“Steel turning (adjustable), single route, at plant, adjustable”* sowie *“Steel high-alloyed machining (0.47 kg shavings per 1 kg part); single route, at plant”*.

Die in den ausgewählten Datensätzen angegebenen Werte für den Inputfluss „Strom“ werden anschließend entsprechend den Vorgaben aus den Fallbeispielen (abgespannte Materialmenge, Masse des Endprodukts) und anhand der datensatzspezifischen Angaben zum Referenzfluss (ecoinvent: Masse abgespanntes Material [1 kg], GaBi: Masse Endprodukt [1 kg]) normiert. Für die Normierung des Inputflusses „Strom“ der Datenbankwerte werden die originären Angaben des Strombedarfs der generischen Datensätze nur anteilig in Bezug auf den jeweiligen Referenzfluss des Fallbeispiels angerechnet. Für die ecoinvent-Werte, die in Bezug auf den Referenzfluss 1 kg abgetragenes Material ausgewiesen werden, bedeutet dies, dass sie z. B. im Hinblick auf das Fallbeispiel 1 auf den Materialabtrag des Zylinderbodens (0,1602 kg) herunterskaliert werden. Demgegenüber werden die Energiewerte aus GaBi, welche in Bezug auf 1 kg gefertigtes Endprodukt ausgewiesen werden, innerhalb des Fallbeispiels 1 auf die Masse des gefertigten Zylinderbodens (0,096 kg) herunterskaliert. Die Normierung für das Fallbeispiel 2 erfolgt äquivalent zu den jeweiligen Angaben. Die normierten Datenbankwerte des Inputflusses „Strom“ werden den nach dem EEMA berechneten Energiewerten (TED<sub>p</sub> bei mittlerer Maschinenauslastung) entsprechend den vorgestellten Fallbeispielen in Tabelle 12 und Tabelle 13 gegenübergestellt.

Tabelle 12: Fallbeispiel 1: Gegenüberstellung des Inputflusses „Strom“ der verschiedenen Datensätze

<b>Fallbeispiel 1: Fräsen eines Zylinderbodens (Ø25), Deckel Maho DCM 50H</b>					
Datenquelle	Datensatzname	Referenzfluss		Inputfluss „Strom“	
		Material-abtrag [kg]	End-Produkt [kg]	Originärer Wert [kWh/Zerspanungsprozess]	Normierter Wert [kWh/Zerspanungsprozess]
<b>EEMA (TED<sub>p</sub>)</b>	<b>Edelstahl Fräsen, Zylinderboden, 34 St</b>	<b>0,1062</b>	<b>0,096</b>	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>
ecoinvent, v3.8, cut-off	chromium steel removed by milling, average   Cut-off, U – RER	1	(-)	0,67	<b>0,07</b>
GaBi (2019)	Steel high-alloyed machining (0,47 kg shavings per 1 kg part); single route, at plant	(0,47)	1	0,63	<b>0,06</b>

Tabelle 13: Fallbeispiel 2: Gegenüberstellung des Inputflusses „Strom“ der verschiedenen Datensätze

Fallbeispiel 2: Drehen eines Kugellabyrinths aus Edelstahl (ArePron), EMAG VLC 100Y					
Datenquelle	Datensatzname	Referenzfluss		Inputfluss „Strom“	
		Material-abtrag [kg]	End-Produkt [kg]	Originärer Wert [kWh/Zerspanungsprozess]	Normierter Wert [kWh/Zerspanungsprozess]
<b>EEMA (TED<sub>p</sub>)</b>	<b>Edelstahl Drehen, ArePron-Kugellabyrinth, 20 St</b>	<b>0,3304</b>	<b>0,3655</b>	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>
ecoinvent, v3.8, cut-off	chromium steel removed by turning, average, computer numerical controlled   Cut-off, U – RER	1	(-)	2,51	<b>0,83</b>
ecoinvent, v3.8, cut-off	chromium steel removed by turning, primarily roughing, computer numerical controlled   Cut-off, U – RER	1	(-)	0,50	<b>0,16</b>
GaBi (2019)	Steel turning (adjustable), single route, at plant, adjustable	(0,36)	1	0,92	<b>0,84</b>
GaBi (2019)	Steel high-alloyed machining (0,47 kg shavings per 1 kg part); single route, at plant	(0,47)	1	0,63	<b>0,23</b>

Die Gegenüberstellung in obenstehenden Tabellen zeigt zunächst eine „ähnliche“ Größenordnung des Inputflusses „Strom“, in welcher sich die Modellierungsvarianten einreihen. Allerdings können hierbei die Modellierungsunterschiede nicht vermittelt werden. Zu diesem Zweck werden die oben aufgeführten Werte zum Inputfluss „Strom“ der unterschiedlichen LCI-Datensätze bzw. -quellen für die beiden Fallbeispiele noch einmal detaillierter in Abbildung 18 grafisch gegenübergestellt. Die Grafik weist neben den (normierten) Werten für den Inputfluss „Strom“, die der Modellierung jeweils zugrunde liegenden Systemgrenzen aus (dreigliedriges Kategorisierungssystem entsprechend Kapitel 2.2.3). Hierbei werden bei den mithilfe des EEMA bestimmten Werten jeweils nicht nur die Anteile der unterschiedlichen Betriebszustände am TED<sub>p</sub> ausgewiesen, sondern auch explizit der Anteil des eigentlichen Zerspanungsvorganges am Betriebszustand A.

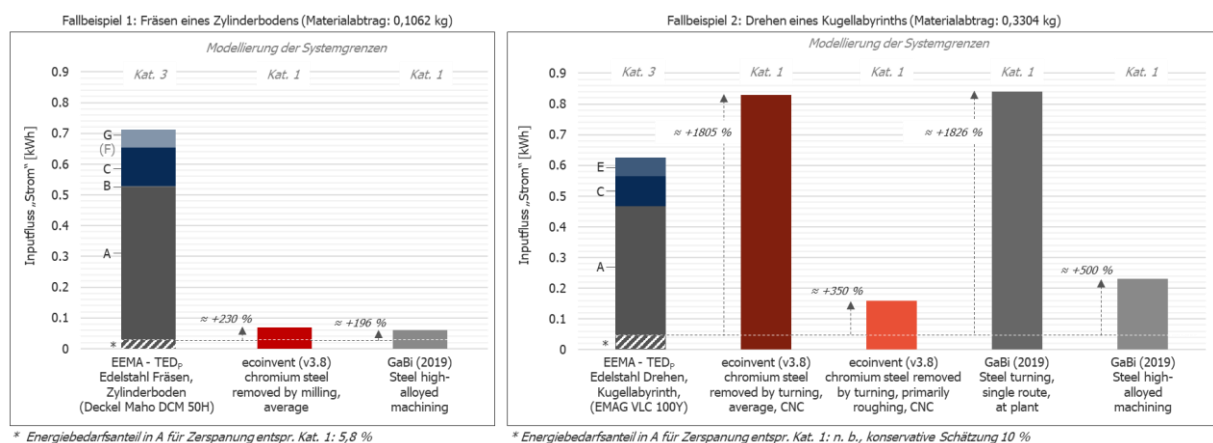


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Werte zum Inputfluss „Strom“ unterschiedlicher LCI-Datensätze für Fallbeispiel 1 (links) und Fallbeispiel 2 (rechts) (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 18 dargestellte Gegenüberstellung zeigt nicht nur die enorme Schwankungsbreite zwischen den anhand von Primärdaten ermittelten EEMA-Daten und den auf die Fallbeispiele normierten generischen Werten aus den konventionellen Datenbanken, sondern auch die Schwankungsbreite zwischen den generischen Datenbankwerten. Um die Unterschiede in den Höhen der Energiebedarfswerte zu verstehen, werden die Daten zum Inputfluss „Strom“ für die beiden Fallbeispiele noch einmal eingängig analysiert.

Die Inputflüsse „Strom“ für Fallbeispiel 1 werden in der linken Darstellung in Abbildung 18 gegenübergestellt. Hier erfolgt die Ausweisung des Inputflusses „Strom“ bzw. des  $TED_p$  entsprechend des EEMA sowie die Visualisierung der Datenbankwerte für den jeweiligen ecoinvent- und GaBi-Datensatz. Augenscheinlich ist zunächst, dass der nach dem EEMA berechnete Absolutwert für den Inputfluss „Strom“ um ein Vielfaches höher ist als die entsprechenden Datenbankwerte. Dies ist auf die zugrunde liegenden Systemgrenzen der Modellierung zurückzuführen. Während die EEMA-Werte aus einer Kategorie-3-Modellierung resultieren und damit auch den Energiebedarf für den Betrieb der Werkzeugmaschine im Betriebszustand A sowie die anteiligen Aufwände für die unproduktiven Betriebszustände einbeziehen, entsprechen die Datenbankwerte aus ecoinvent und GaBi einer Kategorie-1-Modellierung und repräsentieren somit nur den Energiebedarf für den eigentlichen Spanabtrag. Daher ist nicht der EEMA-Absolutwert, also der  $TED_p$ , als geeignete Vergleichsgröße heranzuziehen, sondern lediglich der Energiebedarfsanteil für die eigentliche Zerspanung entsprechend einer Kategorie-1-Modellierung (Abbildung 18, schraffierter Bereich des  $TED_p$ ). Bei dieser Gegenüberstellung zeigt sich, dass die Datenbankwerte für den Inputfluss „Strom“ für den Zerspanungsvorgang ungefähr doppelt so hoch sind wie der EEMA-Wert (0,03 kWh pro Zylinderboden für die eigentliche Zerspanungsaufgabe). Wie in Anhang A.7 dargestellt, basiert die Bestimmung des Inputflusses „Strom“ in ecoinvent (v3.8, cut-off) für das Fräsen von Chromstahl bzw. Edelstahl auf den durch Degner und Wolfram (1990) ausgewiesenen Energiebedarfswerten verschiedener Prozessarten und den nach Barnes (1976) vorgestellten Energiebedarfsverhältnisse für das Fräsen verschiedener Materialien. Auf dieser Grundlage werden durch die Urheber des ecoinvent-Datensatzes, Steiner und Frischknecht (2007), zudem weitere Annahmen getroffen, um den dargestellten „average“- bzw. Durchschnittsdatensatz abzuleiten (s. Anhang A.7): Der Energiebedarfswert des Durchschnittsdatensatzes besteht aus einer anteiligen Kombination des Energiebedarfs spezifischerer Fräsprozesse (90 % milling, large parts, 9 % milling, small parts; 1 % milling, dressing). Wie bzw. warum diese Festlegung der Energiebedarfsanteile zur Abbildung des Durchschnittsdatensatzes gewählt wird, geht aus der Datensatzdokumentation nicht hervor (vgl. Steiner und Frischknecht 2007). Der Energie bzw. Leistungsbedarfswert des GaBi-Datensatzes zur Bearbeitung eines hochlegierten Stahls geht auf eine spezifische Menge an abgetragenen Material zurück. Auf welchem oder welchen spezifischen Fertigungsprozessen allerdings dieser Materialabtrag gründet, wird in der Datensatzdokumentation nicht aufgeführt. Diese weist nur aus, dass die Daten aus durchschnittlichen Industriedaten aus den Jahren 1999 bis 2010 sowie aus einer Sekundärquelle aus dem Jahr 1996 (König und Klocke 1996) abgeleitet werden. Wie genau aber die Berechnung des Inputflusses „Strom“ durchgeführt wurde, geht nicht daraus hervor. Somit ist für das Fallbeispiel 1 der Größenunterschied der Datenbankwerte zu dem nach EEMA berechneten Energiebedarfswert für die eigentliche Zerspanung nicht erklärbar, da die zugrunde liegenden Datenbankdokumentationen nicht die notwendige Transparenz und die nötigen Erläuterungen liefern.

Die rechte Darstellung in Abbildung 18 zeigt die Inputflüsse „Strom“ für das Fallbeispiel 2. Die rechte Darstellung ist dabei genauso wie die bereits beschriebene linke Darstellung aufgebaut: Zuerst erfolgt die Abbildung des  $TED_p$  nach dem EEMA, danach die Abbildung der Energiebedarfswerte nach den ausgewählten ecoinvent-Datensätzen und danach die Abbildung der Energiebedarfswerte für die ausgewählten GaBi-Datensätze. Auch hier würde man zunächst erwarten, dass der EEMA-Absolutwert deutlich über den Datenbankwerten aufgrund der Kategorie-3-Modellierung liegt. Dies ist allerdings nicht der Fall. Wie in Bezug auf die linke Darstellung bereits erläutert, wird für die korrekte Gegenüberstellung der Inputflüsse „Strom“ nur der Energiebedarfsanteil für die eigentliche Zerspanung entsprechend einer Kategorie-1-Modellierung berücksichtigt. Im Gegensatz zu Fallbeispiel 1, bei welchem die Energiebedarfswerte bzw. die Unterschiede trotz der nicht möglichen

Erklärung noch realistisch wirken könnten, ist die enorme Schwankungsbreite in Fallbeispiel 2 überraschend. Dabei ist nicht nur ein sehr großer Unterschied der Datenbankwerte zum EEMA-Energiebedarfswert erkennbar, sondern auch ein großer Unterschied zwischen den Datenbankwerten selbst. Aus der ecoinvent-Datenbank wurden zwei Datensätze zur Abbildung des Fallbeispiels 2 gewählt: Der Durchschnittsdatensatz für den Drehprozess von Chrom- bzw. Edelstahl auf einer CNC-Maschine sowie ein spezifischer Drehprozess (Schruppen) für die Bearbeitung von Edelstahl auf einer CNC-Maschine. Die Inputflüsse „Strom“ der beiden Drehprozesse basieren auf der gleichen Datengrundlage wie bei dem oben dargestellten Fräsprozess aus Fallbeispiel 1 (Degner und Wolfram 1990; vgl. Barnes 1976). Da der Durchschnittsdatensatz hier allerdings auf einer rein auf Annahmen basierten Mittelwertbildung des Energiebedarfs der spezifischen Fertigungsprozesse Schruppen und Abrichten beruht (Steiner und Frischknecht 2007) (vgl. Anhang A.7, Tabelle 60) wurde zum Vergleich der weniger energieintensive Schruppprozess mit in die Gegenüberstellung aufgenommen. Bei dem Vergleich mit dem EEMA-Wert (0,046 kWh pro Kugellabyrinth für die eigentliche Zerspanungsaufgabe) wird deutlich, dass schon der Energiebedarf für den ecoinvent-Schruppprozess um ein dreifaches höher ist, der Energiebedarf des Durchschnittsdatensatzes sogar um ein 18-Faches. Da auch beim Fallbeispiel 2 nicht bekannt ist, welcher spezifische Drehprozess bzw. welche spezifischen Drehprozesse während der Bearbeitung durchgeführt wird bzw. werden, würde man bei der Auswahl eines geeigneten Datensatzes der ecoinvent-Datenbank vermutlich eher auf den Durchschnittsdatensatz zurückgreifen. Diese Wahl würde allerdings, wie gezeigt, die Modellierung des Energiebedarfs eines Zerspanungsprozesses nicht plausibel und realitätsnah abbilden können und die daraus resultierenden LCIA-Ergebnisse vollkommen verzerren. Auch innerhalb der GaBi-Datenbank wurden zur Abbildung des Fallbeispiels 2 zwei Datensätze ausgewählt: der in GaBi einzige Datensatz, der einen spezifischen Fertigungsprozess in Form des Drehens von Stahl abbildet, sowie zum Vergleich der auch schon in Fallbeispiel 1 vorgestellte Datensatz für einen Fertigungsprozess zur Bearbeitung eines hochlegierten Stahls. Auch hier ist wieder die große Schwankungsbreite zwischen dem EEMA- und den Datenbankwerten sowie zwischen den beiden Datenbankwerten selbst auffällig. Während der allgemeine Fertigungsprozess für die Abbildung des Fallbeispiels 2 einen fünffach höheren Wert als die EEMA-Berechnung für den eigentlichen Spanabtrag liefert, ist der Energiebedarfswert nach dem GaBi-Drehprozess um ein 18-Faches höher. Die dem allgemeinen Fertigungsprozess zur Bearbeitung des hochlegierten Stahls zugrunde liegenden Unsicherheiten bzgl. der Datengenerierung und -herkunft wurden bereits obenstehend für das Fallbeispiel 1 erläutert. Auch für den Inputfluss „Leistung“ des GaBi-Drehprozesses bestehen genau diese Unklarheiten, wie die Höhe des Leistungsbedarfs begründet werden kann (vgl. Anhang A.7). Auch hier werden zwar die Datenquellen aufgeführt (durchschnittlichen Industriedaten aus den Jahren 1999 bis 2010; König und Klocke 1996; schriftlicher Austausch mit der Gardena Manufacturing GmbH), auf welcher das LCI beruht. Woher allerdings im Speziellen die Festlegung des Strombedarfsgradienten entstammt, mit welchem der Leistungsbedarf in Zusammenhang mit dem Materialabtrag berechnet wird (vgl. Formel 17, Anhang A.7) ist aus der Datensatzdokumentation nicht ableitbar. Für eine möglichst passgenaue Modellierung des Fallbeispiels 2 würde ein LCA-Anwender vermutlich den Datensatz für den spezifischen Drehprozess wählen. Auch hier hätte diese Wahl eine enorme Verzerrung der LCIA-Ergebnisse aufgrund des viel zu hohen und nicht plausiblen Leistungs- bzw. Energiebedarfswertes des Datensatzes zur Folge.

Die Unterschiede der Gegenüberstellung in Abbildung 18 sind, wie gezeigt, damit nicht nur auf die unterschiedlichen Modellierungslogiken und dem unterschiedlichen Setzen von Systemgrenzen zurückzuführen, sondern v. a. auf die herangezogenen Hintergrund- resp. Primärdaten, die getroffenen und teils nicht begründeten Annahmen sowie die Abschätzungen (vgl. Anhang A.7). Es sei hier erneut darauf hingewiesen, dass die Gegenüberstellung nicht den direkten Vergleich der Werte fokussiert,

sondern vielmehr eine Erkenntnis über die jeweiligen Größenordnungen, Verhältnisse sowie Ursachen möglicher Unterschiede liefern soll. Die intransparente Dokumentation der LCI-Datensätze aus den konventionellen Datenbanken macht es allerdings unmöglich, genaue Ursachen der Abweichung zu erkennen. Somit können die generischen Datensätze nicht auf reale Bedingungen zurückgeführt werden, geschweige denn, zur Abbildung realer Sachverhalte herangezogen werden. Durch die scheinbar präzise Benennung und Modellierung der generischen Datensätze können Datenbank-Anwender, deren grundsätzliches Ziel eine passgenaue und realitätsnahe Abbildung des Untersuchungsgegenstandes ist, bei ihrer Datensatzauswahl durch die nichtvorhandene Transparenz der Datensatzdokumentationen leicht in die Irre geführt werden. Dies kann enorme Konsequenzen für die darauf aufbauenden LCIA-Ergebnisse und die darauf fußenden Handlungsempfehlungen haben.

Mit der vorgenommenen Gegenüberstellung der auf Basis des EEMA berechneten LCI-Ergebnisse für den Inputfluss „Strom“ für zwei Fallbeispiele gegenüber den entsprechenden Werten aus konventionellen LCA-Datenbanken konnte die nicht vorhandene Plausibilität bzw. Unverständlichkeit sowie die Überschätzung des Energiebedarfs für den eigentlichen Zerspanungsvorgang der generischen Datenbankwerte demonstriert werden. Dieser Umstand begründet die Notwendigkeit, generische Datensätze für Zerspanungsprozesse zu entwickeln, die

1. die Hintergrundinformationen transparent dokumentieren,
2. die Realität möglichst nah abbilden, indem sie alle mit dem Zerspanungsprozess verbundene Energiebedarfsanteile entsprechend einer Kategorie-3-Modellierung ( $TED_p$ ) berücksichtigen,
3. die Hintergrunddaten parametrisiert integrieren, damit der LCA-Anwender – mit wenigen Zusatzinformationen – eine möglichst passgenaue Modellierung durchführen kann, und
4. in bestehende LCA-Datenbanken, wie ecoinvent oder GaBi, integriert werden können.

Nur so ist es möglich, nicht nur die Datenlandschaft im Bereich des LCA nachhaltig zu verbessern, sondern v. a. auch die Aussagegüte von LCA-Studien zu erhöhen, die sich bisheriger generischer LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen aus konventionellen LCA-Datenbanken bedienen. Möglichkeiten hierfür werden im folgenden Abschnitt erörtert.

### **5.2.2 Möglichkeiten zur Erzeugung generischer LCI-Datensätze**

Mit der Integration des EEMA auf Basis der PKV zur Bestimmung des TED in das LCI sowie durch die Herstellung einer linearen Beziehung zwischen dem TED und der FU mittels eines zeitbezogenen Referenzflusses können auf Primärdaten beruhende, qualitativ hochwertige LCI-Datensätze erzeugt werden, die aufgrund ihrer Parametrisierung, ihrer Transparenz und der zugrunde liegenden Systemgrenze als vergleichbar und zu Teilen übertragbar eingestuft werden können (vgl. Kapitel 5.1). Allerdings bilden auch diese Datensätze streng genommen nur einen spezifischen Zerspanungsprozess auf einer spezifischen Werkzeugmaschine ab.

Um die Datenverfügbarkeit in bestehenden LCA-Datenbanken zu verbessern, kann der entwickelte EEMA zur Ableitung von generischen LCI-Datensätzen herangezogen werden. Generische Datensätze zielen in der Regel darauf ab, einen bestimmten Produktions- oder Marktmix innerhalb eines Referenzgebietes darzustellen. So stellen beispielsweise generische LCI-Datensätze für Strom einen Strommix im Netz innerhalb einer bestimmten Region dar. Aufgrund der großen Vielzahl an Zerspanungsmaschinen, die unzählige Unternehmen für die vielfältigsten Zerspanungsprozesse im Einsatz haben, wäre eine solide Ableitung eines derartigen repräsentativen Marktmixes für einen Zerspanungsprozess praktisch nicht möglich. Durch die Charakteristik des EEMA mit seiner zugrunde liegenden Modularität und Parametrisierung der Energiemodellierung auf Ebene der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände kann allerdings die Ableitung eines solchen



generischen LCI-Datensatzes eines synthetischen Zerspanungsprozesses möglich gemacht werden. Wie eine solche Generierung von generischen LCI-Datensätzen aussehen kann, soll anhand von zwei Alternativen gezeigt werden.

#### Alternative 1: Ableitung parametrisierter generischer LCI-Datensätze auf Basis generischer PKV

Auf der Grundlage eines repräsentativen Satzes von LCI-Datensätzen von spezifischen Zerspanungsprozessen auf spezifischen Werkzeugmaschinen, die unter Berücksichtigung des EEMA erzeugt wurden, besteht die Möglichkeit einen generischen Datensatz für einen synthetischen Zerspanungsprozess abzuleiten. Hierfür werden auf Ebene der Verbrauchergruppen generische PKV erzeugt, die einen Durchschnittsleistungsbedarf einer repräsentativen Anzahl spezifischer Verbrauchergruppen und den zugrunde liegenden realen Leistungsbedarfen dieser Aggregate repräsentieren. Um Unsicherheiten bei besonders energieintensiven Aggregaten (z. B. Kühlsystem, Hauptantriebe) zu minimieren (vgl. Denkena et al. 2020), sollte eine höhere Stichprobengröße bei der Berechnung des generischen PKV für diese Aggregate berücksichtigt werden. Die generischen PKV können im Rahmen des Berechnungsansatzes des  $TED_P$  bzw.  $TED_M$  (vgl. Kapitel 4.3, Formel 3 bis 5) parametrisiert im LCI-Datensatz integriert und so in bestehende LCA-Datenbanken inkl. notwendiger Hintergrundinformationen (z. B. der Charakterisierung der angenommenen Betriebszyklen auf der synthetischen Werkzeugmaschine) eingegliedert werden. Auf der Grundlage der generischen PKV bzw. des generischen LCI-Datensatzes in Verbindung mit Angaben zu realen Zeitanteilen der Betriebszustände innerhalb eines realen Betriebszyklus können LCA-Anwendende den Energiebedarf von Zerspanungsprozessen dann präziser abschätzen als mit bisherigen generischen LCI-Datensätzen aus etablierten LCA-Datenbanken, welche aufgrund ihrer Systemgrenzen wichtige Energiebedarfsanteile vernachlässigen. Insbesondere für produktorientierte Ökobilanzstudien würde eine genauere Abschätzung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zu einer exakteren Modellierung und zu belastbareren LCIA-Bilanzierungsergebnissen, bspw. hinsichtlich eines Carbon Footprint von Produkten, führen.

#### Alternative 2: Vereinfachte Ableitung generischer LCI-Datensätze unter Vernachlässigung variabler Energiebedarfsanteile

Nach Aramcharoen und Mativenga (2014) ist der Energiebedarfsanteil der variablen Verbrauchergruppen eines Zerspanungsprozesses im Vergleich zum Energiebedarfsanteil der konstanten Verbrauchergruppen relativ gering. Um dies weiter zu untersuchen wird erneut ein fiktives Fallbeispiel aufgespannt, mit welchem die Auswirkungen auf den  $TED_M$  durch die Variation der Maschinenauslastung analysiert werden sollen. Das fiktive Fallbeispiel basiert dabei auf den in Kapitel 4.4 ermittelten PKV für die Werkzeugmaschine EMAG VLC 100Y und legt die Annahme zugrunde, dass die Werkzeugmaschine während einer achtstündigen Schicht die Betriebszustände A, C und E durchläuft. Das Anfahren der Werkzeugmaschine und der Abschaltvorgang finden direkt bei Schichtbeginn und bei Schichtende statt. Maschinenbedingt existiert kein festes Anfahrprogramm für den Betriebszustand B auf der Werkzeugmaschine. Die Maschinenauslastung während der 8-h-Schicht wird innerhalb von drei Szenarien variiert (Szenario 1: A = 100 %, C = 0 %, E = 0 %; Szenario 2: A = 80 %, C = 10 %, E = 10 %; Szenario 3: A = 50 %, C = 25 %, E = 25 %). Die Zeitanteile innerhalb des Betriebszyklus für die Betriebszustände C und E werden mit 1:1 angenommen. Der durchschnittliche Zerspanungsprozess dauert 3 min. Die Ergebnisse des Fallbeispiels sind in Abbildung 19 dargestellt. Auffällig ist, dass die konstanten Verbrauchergruppen Hauptschalter und Steuerung; Beleuchtung; Kühlung; Ventilation (in allen Betriebszuständen aktiv; 31 bis 43 %) und Kühlschmierung (nur im Betriebszustand A aktiv; 36 bis 27 %) einen wesentlichen Einfluss auf den  $TED_M$  haben. Der Anteil der variablen Verbrauchergruppen Spindel und Werkzeug, die nur im Betriebszustand A aktiv sind, steigt

mit zunehmender Maschinenauslastung. Mit 3,2 bis 4,2 % in Summe ist der Anteil der variablen Verbrauchergruppen am  $TED_M$  als gering einzustufen. Untersucht man weiter die Veränderung des  $TED_M$  anhand der Variation der Maschinenauslastung, so kann man feststellen, dass dieser mit der Erhöhung der Maschinenauslastung zunimmt (Szenario 1:  $TED_M = 19,4$  kWh; Szenario 2:  $TED_M = 16,8$  kWh; Szenario 3:  $TED_M = 12,8$  kWh). Gleichzeitig sinkt der  $TED_P$  bei Erhöhung der Maschinenauslastung (Szenario 1:  $TED_P = 0,12$  kWh; Szenario 2:  $TED_P = 0,13$  kWh; Szenario 3:  $TED_P = 0,16$  kWh).

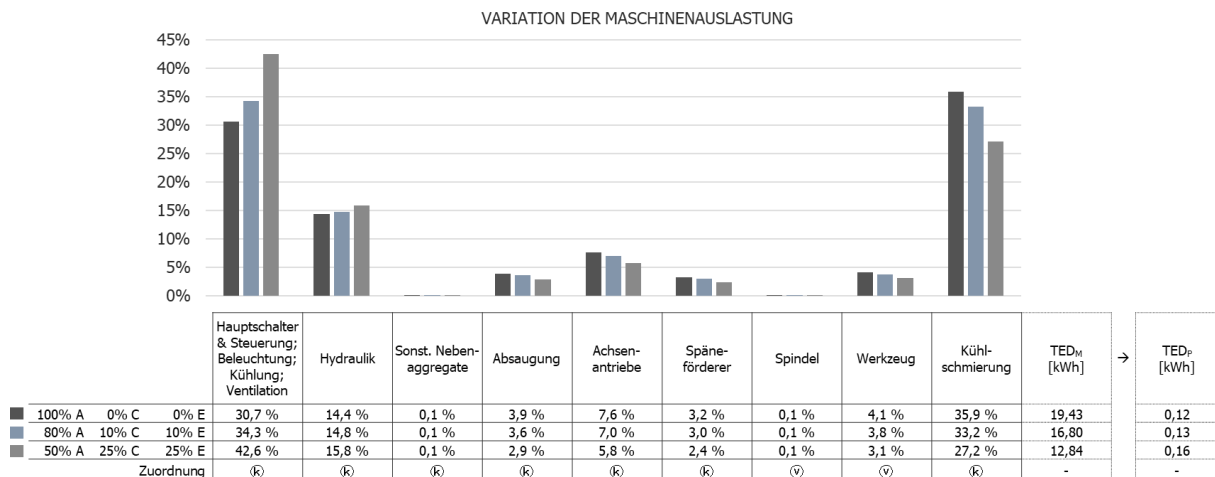


Abbildung 19: Fallbeispiel – Auswirkungen auf den TED bei variierender Maschinenauslastung (eigene Darstellung)

Die wichtigsten Erkenntnisse, die durch dieses Fallbeispiel somit generiert werden können, sind:

1. die konstanten Verbrauchergruppen haben einen signifikanten Einfluss auf den  $TED_M$ ;
2. der Energiebedarfsanteil der variablen Verbrauchergruppen am  $TED_M$  steigt mit zunehmender Maschinenauslastung (im Fallbeispiel liegt deren Anteil aber immer unter 5 %);
3. mit zunehmender Maschinenauslastung steigt der  $TED_M$  pro Betriebszyklus, was die Dominanz des Betriebszustandes A belegt;
4. mit zunehmender Maschinenauslastung und somit steigender Produktionsrate sinkt aber auch gleichzeitig der  $TED_P$  innerhalb des jeweiligen Betriebszyklus.

Basierend auf diesen Erkenntnissen ergibt sich eine weitere Möglichkeit, wie ein generischer LCI-Datensatz für einen synthetischen Zerspanungsprozess noch vereinfachter hergeleitet werden könnte. Da der variable Energiebedarfsanteil einen so geringen Anteil am TED hält, könnte für einen generischen Datensatz dieser variable Anteil als konstanter Schätzwert, z. B. 5 % des Energiebedarfs des Betriebszustandes A, angenommen werden. Aus dieser Vereinfachung folgt zudem, dass es bei der Erstellung eines solchen generischen Datensatzes nicht mehr notwendig ist, zwischen verschiedenen Materialien zu unterscheiden, da die Art des zu bearbeitenden Materials nur den variablen Energiebedarfsanteil beeinflusst. Wie in Abbildung 11 gezeigt, verhält sich zwar der Energiebedarf des eigentlichen Spanabtrags nicht proportional zu einer Erhöhung der Maschinenauslastung, dennoch ist eine Abhängigkeit zwischen den Größen zu erkennen. Diese Abhängigkeit könnte zur Herleitung einer mathematischen Beziehung verwendet werden, bei welcher der TED nur auf Basis der konstanten PKV in Verbindung mit Korrekturfaktoren, die den Einfluss der Maschinenauslastung widerspiegeln, hergeleitet werden kann. Eine Abschätzung der generischen PKV könnte dann bspw., wie oben beschrieben, aus einer repräsentativen Menge an spezifischen PKV abgeleitet werden oder auf Basis von Herstellerangaben erfolgen. Zudem könnte der Grad der Maschinenauslastung in verschiedenen

Größenordnungen innerhalb des LCI-Datensatzes hinterlegt werden, welcher dann wiederum als sensitiver Parameter für nachfolgende Sensitivitätsanalysen untersucht werden kann.

Betrachtet man die in Kapitel 2.3.1 analysierten LCI-Datensätze aus konventionellen LCA-Datenbanken und hierbei v. a. die in Anhang A.3 gelisteten Angaben zum Inputfluss „Strom“ sowie die Erkenntnisse des vorangegangenen Kapitels 5.2.1, wird nicht nur die große Streubreite zwischen den Einzelwerten deutlich, sondern auch die Unverständlichkeit bzw. nicht vorhandene Plausibilität der vorhandenen generischen Datensätze. Diese Datensätze bilden zudem den TED nicht ab und vernachlässigen wesentliche Energiebedarfsanteile. Selbst eine grobe (Alternative 2), aber fundierte Ableitung eines generischen Datensatzes auf Basis des EEMA für die Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen für das Hintergrundsystem stellt daher immer noch ein Fortschritt gegenüber bestehenden generischen LCI-Datensätzen aus konventionellen LCA-Datenbanken und v. a. im Hinblick auf eine realistischere Abbildung des Beitrags von Zerspanungsprozessen in produktorientierten LCA-Studien dar.

### 5.3 Systematischer Verfahrensansatz für das Carbon Accounting in Unternehmen

Ein systematischer „CFP-Ansatz besteht aus einer Reihe von Tätigkeiten, [...] um die Entwicklung von CFP für weitere Produkte innerhalb derselben Organisation zu erleichtern“ (DIN EN ISO 14067:2019). Dieser praxisorientierte Umgang mit der THG-Bilanzierung von Produkten soll auf die Prozessebene übertragen werden. So sollen die mit dem Energiebedarf von Zerspanungsprozessen verknüpften THG-Emissionen auf Basis des in Kapitel 4.3 entwickelten EEMA und dessen in Kapitel 5.1 dargestellter Integration in das LCA effizient und konsistent innerhalb eines Unternehmens erfasst bewertet werden.

Die grundsätzlichen Aufgaben eines Unternehmens bei der Erstellung und Aufrechterhaltung eines systematischen Verfahrensansatzes eines CFP gestalten sich nach DIN EN ISO 14067:2019 wie in Abbildung 20 dargestellt. Die sieben Aufgaben laufen dabei nicht hierarchisch nacheinander ab, sondern wirken gleichzeitig nebeneinander. Aufgabe (1) „Wahrung der Anforderungen nach ISO 14067“ ist grundlegend für alle weiteren Aufgaben und bedarf einer stetigen Berücksichtigung bei der Definition und Ausführung aller weiteren Aufgaben. Durch die Aufgabe (2) „Beschreibung des systematischen CFP-Ansatzes“ wird der operative Ablauf der THG-Bilanzierung systematisiert. Aufgabe (3) „Maßnahmen zum Erkennen von Schwächen hinsichtlich Aktualität und Repräsentativität“ dient der Qualitätssicherung der im Rahmen von Aufgabe (2) generierten Daten. Die Aufgabe (4) „Bestimmung, Bereitstellung und Instandhaltung von relevanter Infrastruktur“, die Aufgabe (5) „Definition und Bekanntmachung von Verantwortlichkeiten und Befugnissen“, die Aufgabe (6) „Bestimmung und Bereitstellung von erforderlichen Ressourcen und Kompetenzen“ und die Aufgabe (7) „Erstellung von Verfahren zur Sicherstellung von ordnungsgerechtem Betrieb, Lenkung und Überwachung“ sind organisationsspezifisch entsprechend der jeweiligen Unternehmensstruktur zu definieren. Während die DIN EN ISO 14067:2019 für die Aufgabe (4) noch eine nähere Spezifizierung zur benötigten Infrastruktur liefert (Arbeitsplätze und Versorgungseinrichtungen; Prozessausrüstung, v. a. Hard- und Software; unterstützende Dienste, v. a. Informationssysteme; LCA-Kompetenz), werden keine weiteren beschreibenden Elemente zu den Aufgaben (5) bis (7) durch den Standard vorgegeben. Die genaue Ausführung dieser Aufgaben obliegt somit gänzlich den Unternehmen entsprechend den vorherrschenden Rahmenbedingungen und ist schwer zu generalisieren. Da der Schwerpunkt der Arbeit auf der systematischen Verfahrensentwicklung der THG-Bilanzierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen auf Basis des EEMA liegt, die von einem Unternehmen in den eigenen Verfahrensablauf integriert werden kann, finden die Aufgaben (4) bis (7) keine weitere Berücksichtigung im Verlauf dieser Arbeit. Selbstverständlich sind zur Wahrung der Konformität der

DIN EN ISO 14067:2019 diese Aufgaben bei der Integration des prozessorientierten THG-Bilanzierungsansatzes ins organisationseigene Carbon Accounting zu berücksichtigen (s. Abbildung 20).



Abbildung 20: Theoretischer Aufbau eines systematischen Verfahrensansatzes nach DIN EN ISO 14067:2019 (eigene Darstellung)

Für die systematische Verfahrensentwicklung des Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen werden nachfolgend die Aufgaben (2), im Folgenden benannt als „Verfahrensbeschreibung“ und Aufgabe (3), im Folgenden benannt als „Prüfverfahren zur Bestimmung der Datenqualität“ unter Berücksichtigung der identifizierten Anforderungen aus Kapitel 2.1.2 sowie der in Kapitel 3 (AP 3) beschriebenen Bedingungen für die praxisorientierte Anwendung ausgeführt. Da die Konformität des systematischen Ansatzes mit der DIN EN ISO 14067:2019 ein durchgehendes Hauptziel bei der Verfahrenskonzeptionierung ist, bedarf Aufgabe (1) keiner weiterführenden Beschreibung, sondern wird im Verlauf der Arbeit direkt in die entwickelten Ausführungen der Aufgabe (2) und der Aufgabe (3) integriert.

### 5.3.1 Verfahrensbeschreibung

Um Unternehmen die Bilanzierung der THG-Emissionen des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zu erleichtern, wird ein systematischer Verfahrensansatz für die Bestimmung eines partiellen CFP auf Prozessebene im Rahmen des anvisierten lebenszyklus- und praxisorientierten Carbon Accounting entwickelt. Dieser systematische Verfahrensansatz, unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.1.2 erläuterten Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019 und den in Kapitel 3 beschriebenen Bedingungen, basiert auf einem eigens erstellten Ablaufplan mit sieben Hauptschritten: [1] Basisinformationen, [2] Referenzsystem, [3] Messplan, [4] Leistungsmesskampagne, [5] Leistungskennwerte (PKV), [6] THG-Emissionen und [7] Ergebnisauswertung. Der entwickelte Ablaufplan inkl. der Hauptschritte und einer Kurzerläuterung der wesentlichen Abläufe ist in Abbildung 21 dargestellt. Da der systematische Verfahrensansatz entsprechend der normativen Vorgaben auf den Grundsätzen der DIN EN ISO 14040:2020 bzw. DIN EN ISO 14044:2020 aufbaut, findet sich im Ablaufplan zudem eine Verordnung der einzelnen Hauptschritte zu den vier Phasen des LCA.

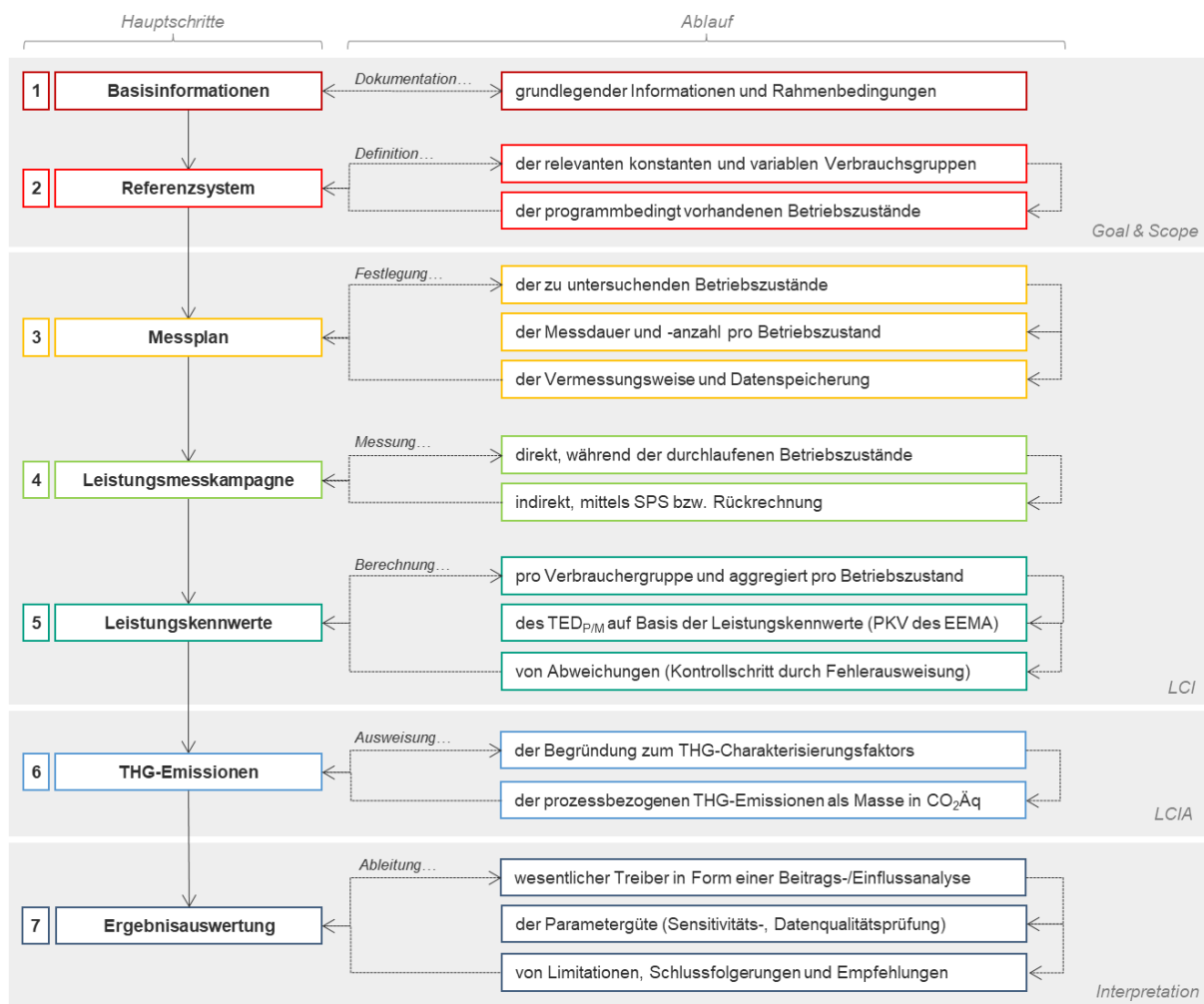


Abbildung 21: Ablaufplan des systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen (eigene Darstellung)

Die sieben Hauptschritte werden nachfolgend einzeln erläutert.

### [1] Basisinformationen

In Hauptschritt [1] werden grundlegende, den Untersuchungsgegenstand betreffende Informationen und Rahmenbedingungen in Anlehnung an die Vorgaben des Standards ISO 14955-3:2019 abgefragt. Als Untersuchungsgegenstand wird hierbei der Gesamtenergiebedarf des Zerspanungsprozesses in Form des  $TED_M$  bzw. des  $TED_P$  auf Basis des EEMA verstanden.

Als Basisinformationen sind in Schritt [1] nachfolgende Punkte zu dokumentieren:

- Der Name des Unternehmens, eine Standortspezifikation des Untersuchungsgegenstandes (z. B. Adresse/ Abteilung/ Halle) und Verantwortlichkeiten (s. Tabelle 14, [1.1]);
- Angaben zum Untersuchungsgegenstand, d. h. auf welcher Werkzeugmaschine wird der Zerspanungsprozess durchgeführt inkl. einer Kurzbeschreibung der Werkzeugmaschine mit den Mindestinhalten Name, Hersteller, Seriennummer, Baujahr, Nennleistung (s. Tabelle 14, [1.2]);
- Festsetzung des Ziels der Untersuchung sowie der FU (s. Tabelle 14, [1.3]);
- Welche Umgebungsbedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) während der Untersuchung vorherrschen, um evtl. daraus ableitbare Einflüsse auf die Werkzeugmaschine detektieren und stabile Prozessbedingungen nachweisen zu können. Die ISO 14955-3:2019

empfiehlt hierfür die entsprechenden Werte mindestens in einem 30-Minuten Takt während der Test-bzw. Messphase aufzunehmen (s. Tabelle 14, [1.4]). An diese Empfehlung wird sich in der vorliegenden Arbeit angelehnt;

- Der Zeitpunkt (Datum, Uhrzeit) und die Dauer, während welcher die Untersuchung/Messung stattfindet (s. Tabelle 14, [1.5]);
- Für welchen Bezugsrahmen (zeitlich, geografisch und innerhalb der Technosphäre) die THG-Bilanz des Energiebedarfs eines spezifischen Zerspanungsprozesses erstellt werden soll (bspw. ein definierter Betriebszyklus, z. B. eine 8-h-Schicht, oder ein Jahr mit 220 Betriebstagen) (s. Tabelle 14, [1.6]);
- Welcher Charakterisierungsfaktor in Form des EF bzw. welche Lebenszyklusdaten sollen der THG-Bilanz zugrunde gelegt werden (s. Tabelle 14, [1.7]);<sup>57</sup>
- Die Art inkl. einer Kurzbeschreibung, des Messmittels bzw. der Messmittel, mit welchem bzw. mit welchen die Leistungsabnahme erfolgt. Diese kann dabei sowohl kontinuierlich bzw. durch eingebaute Sensorik oder temporär durch mobiles Messequipment erfolgen (s. Tabelle 14, [1.8]).

Tabelle 14 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [1] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 14: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [1] Basisinformationen

**[1] Basisinformationen**

<b>[Nr.]</b>	<b>Abfrage</b>	<b>Handlungsempfehlung</b>
[1.1]	Unternehmen, Standort und Verantwortlichkeit?	Dokumentation (Name, Standort, verantwortliche Person)
[1.2]	Welche Maschine wird untersucht?	Dokumentation und Kurzbeschreibung der zu untersuchenden Werkzeugmaschine (Name, Hersteller, Seriennummer, Baujahr, Nennleistung)
[1.3]	Welches Ziel hat die Untersuchung und welche FU wird gewählt?	Festlegung des Ziels und der FU (Empfehlung: Wahl einer produktbezogenen FU)
[1.4]	Wie sind die Umgebungsbedingungen?	Bestimmung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Empfehlung: Messung der Werte im 30 min Takt um Testbedingungen zu dokumentieren)
[1.5]	Wann und wie lange werden die Messungen durchgeführt?	Datum und Dauer der Messung
[1.6]	Welcher Bezugsrahmen wird für die THG-Bilanz gewählt?	Festlegung des Bezugsrahmens
[1.7]	Welcher TH_EF wird bzw. welche Lebenszyklusdaten werden zur Berechnung der THG gewählt?	Bestimmung des THG-Emissionsfaktors bzw. der Lebenszyklusdaten, die der THG-Bilanz zugrunde gelegt werden sollen
[1.8]	Welches Messmittel wird zur Leistungsmessung verwendet?	Festlegung und Beschreibung des Messmittels

**[2] Referenzsystem**

In Hauptschritt [2] findet die Definition des Referenzsystems statt. Hierfür werden zunächst alle energieverbrauchenden Aggregate innerhalb der Werkzeugmaschine identifiziert und, wie in Tabelle 15 dargestellt, den in Kapitel 4.2.1 definierten Verbrauchergruppen zugeordnet. Durch die klare Zuordnung können Doppelzählungen von Energiebedarfsanteilen entsprechend der Anforderung nach DIN EN ISO 14067:2019 vermieden werden. Gleichzeitig findet die Klassifizierung der Verbrauchergruppen als konstante oder variable Verbrauchergruppen statt (s. Tabelle 16, [2.1]).

<sup>57</sup> Eine detaillierte Begründung der Auswahl des EF soll in Hauptschritt [6] erfolgen.

Tabelle 15: Identifizierung und Klassifizierung relevanter Verbrauchergruppen

	Verbrauchergruppe	zugehörige Aggregate (Bsp.)	Klassifizierung <sup>1</sup>
(1)	Hauptschalter und Steuerung	Computereinheit, Schaltschrank	Ⓚ -
(2)	Hydraulik	Hydraulikpumpe(n)	Ⓚ -
(3)	Kühlung	Pumpe(n), Motor(en)	Ⓚ -
(4)	Absaugung	Ölnelabscheider	Ⓚ -
(5)	Beleuchtung	Beleuchtung im Arbeitsraum, Bildschirmbeleuchtung	Ⓚ -
(6)	Ventilation	Lüfter & Ventilator(en)	Ⓚ -
(7)	Sonst. Nebenaggregate	Zentralschmierung, Transportband, externe Aggregate	Ⓚ -
(8)	Späneförderer	Motor(en)	Ⓚ -
(9)	Kühlschmiermittel	Kühlmittelpumpe (n)	Ⓚ -
(10)	Achsantriebe	Servomotoren	Ⓚ -
(11)	Spindle	Spindelmotor	- Ⓟ
(12)	Werkzeug	Revolver	- Ⓟ
(13)	Materialabtrag	Schneidleistung	- Ⓟ

<sup>1</sup> Zuordnung zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (Ⓚ)“ und „variable Verbrauchergruppe (Ⓟ)“. Hier sei zu beachten, dass die Zuordnung in Abhängigkeit der Werkzeugmaschine unterschiedlich ausfallen kann.

Sollen externe Aggregate, die notwendig für die Zerspanungsaufgabe an einer spezifischen Werkzeugmaschine sind, wie bspw. ein externer Späneförderer, mitberücksichtigt werden, sind diese klar auszuweisen und gegebenenfalls zu beschreiben (s. Tabelle 16, [2.2]). Diese können als Bestandteil der Verbrauchergruppe (7), sonst. Nebenaggregate, kategorisiert werden (vgl. Tabelle 15).

Zudem sind die Betriebszustände zu definieren, die auf der untersuchten Werkzeugmaschine programmbedingt ablaufen können. Die unterschiedlichen Betriebszustände können entsprechend der Charakterisierung aus Kapitel 4.2.2 beschrieben und festgelegt werden (s. Tabelle 16, [2.3]). Es ist möglich, dass die Betriebszustände der untersuchten Werkzeugmaschine programmbedingt unterschiedlich benannt werden. In diesem Fall ist vom Unternehmen eine Konkretisierung in Form einer Kurzbeschreibung für evtl. Abweichungen durchzuführen.

Wird vom ausführenden Unternehmen des systematischen Verfahrensansatzes eine andere, evtl. organisationsspezifische Einteilung oder Klassifizierung der Verbrauchergruppen oder der Betriebszustände festgelegt, ist die getroffene Wahl zu dokumentieren und ausführlich zu begründen. Die entwickelte organisationsspezifische Methodik zur Festlegung der Verbrauchergruppen und/oder der Betriebszustände ist für alle zu bilanzierenden Zerspanungsprozesse innerhalb der Organisation konsistent anzuwenden.

Tabelle 16 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [2] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 16: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [2] Referenzsystem

**[2] Referenzsystem**

[Nr.]	Abfrage	Handlungsempfehlung
[2.1]	Welche Verbrauchergruppen sind in der Werkzeugmaschine vorhanden?	Identifizierung und Klassifizierung relevanter Verbrauchergruppen
[2.2]	Werden externe Aggregate der Werkzeugmaschine mitberücksichtigt?	Evtl. Benennung und Kurzbeschreibung der externen Aggregate
[2.3]	Welche Betriebszustände laufen programmbedingt auf der Werkzeugmaschine ab?	Identifizierung und Beschreibung relevanter Betriebszustände

### [3] Messplan

In Hauptschritt [3] wird die Messkampagne geplant. Hierbei wird festgelegt, welche Betriebszustände innerhalb der Messkampagne durchlaufen werden und wie deren Leistungsbedarf gemessen werden soll. Um ein ganzheitliches Bild der Energieperformanz der Werkzeugmaschine zu bekommen, wird in der vorliegenden Arbeit empfohlen, alle programmbedingt möglichen Betriebszustände der Werkzeugmaschine zu untersuchen und infolgedessen deren Leistungsbedarf messtechnisch zu erfassen (s. Tabelle 19, [3.1]).

Zudem wird festgelegt, wie lange die einzelnen Betriebszustände vermessen werden. Während die einzelnen Betriebszustände teilweise nach einem definierten Programm und damit innerhalb eines definierten Zeitintervalls ablaufen, wie bspw. die Aufwärmphase während des Betriebszustands B oder der Bearbeitungsprozess während des Betriebszustandes A, laufen andere Betriebszustände nicht nach einem definierten Zeitplan ab bzw. schalten erst nach einem vorprogrammierten Zeitpunkt in einen anderen Betriebszustand, wie z. B. vom Betriebszustand C zum Betriebszustand E. Um repräsentative Leistungskennwerte für die einzelnen Betriebszustände generieren zu können, wird entsprechend den Vorgaben der ISO 14955-3:2019 empfohlen, Betriebszustände ohne festen Programmablauf mindesten 300 Sekunden unter stabilen Bedingungen zu vermessen. Stabile Bedingungen werden für ebendiese Betriebszustände entsprechend der ISO 14955-3:2019 angenommen, wenn die Abweichung des Messwertes nicht größer als  $\pm 5\%$  zur Anschlussleistung oder nicht größer als 100 Watt ist (s. Tabelle 19, [3.2]). Zudem wird empfohlen, die einzelnen Betriebszustände mindestens dreifach zu vermessen, um evtl. Ausreißer direkt detektieren zu können (s. Tabelle 19, [3.3]). Tabelle 17 stellt die empfohlene Messdauer in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebszustandes dar.

Tabelle 17: Empfohlene Messdauer in Abhängigkeit der Betriebszustände (in Anlehnung an ISO 14955-3:2019)

	<b>Betriebszustände</b>	<b>Messdauer</b>
A	Bearbeitung	Programmbedingt
B	Aufwärmen	Programmbedingt
C	Betriebsbereit	$\geq 300$ s
D	Erweitertes Standby	$\geq 300$ s
E	Standby	$\geq 300$ s
F	Aus	$\geq 300$ s
G	Sonstige	Evtl. Programmbedingt, ansonsten $\geq 300$ s

Zudem findet die Festlegung hinsichtlich der Vermessungsweise und der Datenspeicherung statt. Je nach Ausstattung der Werkzeugmaschine können die Leistungsbedarfsdaten der Verbrauchergruppen direkt sensorgestützt durch eine mobile temporäre Messung oder durch die maschineninterne SPS oder indirekt durch Rückrechnung bestimmt werden (vgl. Kapitel 4.5). Tabelle 18 schlägt hierfür in Abhängigkeit der Verbrauchergruppen mögliche Vermessungsweisen zur jeweiligen Leistungsermittlung vor. Zudem ist festzulegen, in welcher zeitlichen Auflösung die Datenerfassung erfolgen soll. Zum Zwecke einer leichteren Auswertung wird empfohlen, die Leistungsbedarfsdaten in einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde aufzunehmen (s. Tabelle 19, [3.4]).



Tabelle 18: Verbrauchergruppen und Möglichkeit zur jeweiligen Ermittlung des Leistungsbedarfs

	<b>Verbrauchergruppe</b>	<b>Vorschläge zur Ermittlung des Leistungsbedarfs</b>
(1)	Hauptschalter und Steuerung	Direkte Messung
(2)	Hydraulik	Direkte Messung
(3)	Kühlung	Indirekt durch Rückrechnung
(4)	Absaugung	Direkte Messung
(5)	Beleuchtung	Indirekt durch Rückrechnung
(6)	Ventilation	Indirekt durch Rückrechnung
(7)	Sonst. Nebenaggregate	Indirekt durch Rückrechnung
(8)	Späneförderer	Direkte Messung
(9)	Kühlschmiermittel	Direkte Messung
(10)	Achsenantriebe	SPS
(11)	Spindel	SPS
(12)	Werkzeug	SPS
(13)	Materialabtrag	Berechnung

Des Weiteren ist festzulegen, wie und wo die Speicherung der aufgenommenen Daten erfolgen soll. Empfohlen wird die Speicherung in einem Microsoft Excel konformen Format, um die einzelnen Leistungsmessdaten für die nachfolgende Datenaufbereitung direkt verfügbar zu haben. Da es sich um einfach strukturierte Datensätze handelt, die während der Messkampagne generiert werden, eignet sich hierfür bspw. das Dateiformat CSV (Comma-separated values). Die Primäredatensätze sollten dabei mindestens die folgenden Informationen zu jedem Datenpunkt enthalten: Maschinename, Messzeitpunkt (Datum und Uhrzeit), Messpunkt (Kennzeichen bzw. Name des Messortes, an dem die Messklammer angebracht ist), Leistungsbedarf je vermessenem Aggregat in [W], Gesamtleistungsbedarf in [W] (gemessen am Hauptschalter oder extrahiert aus der SPS). Der Speicherort ist entsprechend der organisationsspezifischen Rahmenbedingungen festzulegen (s. hierfür auch Kapitel 5.3, Aufgabe (4) „Bestimmung, Bereitstellung und Instandhaltung von relevanter Infrastruktur“). Es wird zudem eine zusätzliche Sicherung dieser Primärdaten, z. B. auf dem organisationsinternen Laufwerk oder einer betriebsinternen Cloud empfohlen (s. Tabelle 19, [3.5]).

Tabelle 19 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [3] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 19: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [3] Messplan

<b>[3] Messplan</b>		
<b>[Nr.]</b>	<b>Abfrage</b>	<b>Handlungsempfehlung</b>
[3.1]	Welche Betriebszustände werden während der Messkampagne durchlaufen?	Festlegung der Betriebszustände (Empfehlung: Messen aller programmbedingt möglichen Betriebszustände)
[3.2]	Wie lange sollen die Betriebszustände jeweils vermessen werden?	Festlegung der Vermessungszeiten pro Betriebszustand
[3.3]	Wie oft sollen die festgelegten Betriebszustände durchlaufen werden?	Festlegung der Iterationen pro Betriebszustand
[3.4]	Welche Aggregate werden direkt bzw. indirekt vermessen?	Festlegung der Art der Leistungsermittlung und der zeitlichen Auflösung (Empfehlung: Hauptschalter und Steuerung, Hydraulik, Späneförderer, Kühlschmiermittel, Absaugung direkt vermessen; zeitliche Auflösung von 1 s)
[3.5]	Wie und wo sollen die Daten gespeichert werden? Welche Zusatzinformationen werden in den Datensatz integriert?	Festlegung des Speicherformats, der Zusatzinformationen und des Speicherorts (Empfehlung: Microsoft Excel konformes Speicherformat; Eingliederung der Zusatzinformationen Maschinename, Messzeitpunkt, Messpunkt, Leistungsbedarf je vermessenes Aggregat in [W], Gesamtleistungsbedarf in [W])

#### **[4] Leistungsmesskampagne**

In Hauptschritt [4] erfolgt die Durchführung der Leistungsmesskampagne für die relevanten Betriebszustände auf Ebene der Verbrauchergruppen entsprechend des festgelegten Messplans ([3]). Aufgrund der Bedeutung der daraus resultierenden PKV muss die Leistungsvermessung nicht nur genau geplant, sondern v. a. auch sorgfältig durchgeführt werden. Hierfür werden die Daten über die verschiedenen Betriebszustände entweder durch die sensorgestützte Messung, durch eine mobile temporäre Messung oder durch die SPS auf Ebene der Verbrauchergruppen bestimmt, in einem Dokument, wie einer Microsoft Excel Arbeitsmappe, zusammengeführt und gespeichert. Daneben muss zudem eine Leistungsdatenerfassung des Gesamtenergiebedarfs erfolgen, um spätere Rückrechnungen sowie die mögliche Abweichung der berechneten Werte zu den Realwerten zu bestimmen. Dies kann entweder über eine direkte Messung am Hauptschalter umgesetzt werden oder über das Auslesen der entsprechenden Daten aus der SPS. Neben den Primärdaten auf Aggregats- und Werkzeugmaschinenebene sind, wie in Hauptpunkt [3] genannt, zudem der Messzeitpunkt sowie der Messort jedem Datenpunkt aus Gründen der Dokumentation und zum Zwecke der späteren Auswertung zuzuordnen (s. Tabelle 20, [4.1] und [4.2]).

Danach werden die Daten für die Verbrauchergruppen durch Rückrechnung bestimmt, die nicht direkt vermessen werden konnten oder deren Daten nicht aus der SPS auslesbar waren. Um Fehler im Primärdatensatz zu verhindern, sollte in einem Duplikat der Microsoft Excel Arbeitsmappe die Datenberechnung der verbleibenden Verbrauchergruppen erfolgen (s. Tabelle 20, [4.3]). Die gesamte Datensammlung bildet die Grundlage zur Berechnung der PKV der einzelnen Verbrauchergruppen in Bezug auf die jeweiligen Betriebszustände.

Tabelle 20 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [4] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 20: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [4] Leistungsmesskampagne

**[4] Leistungsmesskampagne**

[Nr.]	Abfrage	Handlungsempfehlung
[4.1]	Wie hoch ist der Leistungsbedarf der direkt vermessenen Verbrauchergruppen?	Direkte Leistungsmessung sowie Erfassung und Speicherung der Daten inkl. Aufnahme des Messzeitpunkts und des Messortes/-objektes (jeweilige Verbrauchergruppe) (Empfehlung: Messung mit zeitlicher Auflösung von 1 s, Speicherung in einer Microsoft Excel Arbeitsmappe)
[4.2]	Wie hoch ist der Leistungsbedarf der indirekt über die SPS vermessenen Verbrauchergruppen?	Indirekte Leistungsermittlung mittels SPS sowie Erfassung und Speicherung der Daten inkl. Aufnahme des Messzeitpunkts und des Messortes/-objektes (jeweilige Verbrauchergruppe) (Empfehlung: Messung mit zeitlicher Auflösung von 1 s, Speicherung in einer Microsoft Excel Arbeitsmappe)
[4.3]	Wie hoch ist der Leistungsbedarf der übrigen Verbrauchergruppen?	Rückrechnung der Leistungsdaten für die übrigen Verbrauchergruppen auf Basis des Gesamtleistungsbedarfs der Werkzeugmaschine und der direkt vermessenen Aggregate (Verbrauchergruppen) sowie Erfassung und Speicherung der Daten inkl. Übertrag des Messzeitpunkts und des Messortes/-objektes (jeweilige Verbrauchergruppe) (Empfehlung: direkte Berechnung durch das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel)

**[5] Leistungskennwerte**

In Hauptschritt [5] wird die Berechnung der einzelnen PKV der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit zu den jeweiligen Betriebszuständen durchgeführt. Hierfür erfolgt für jede Verbrauchergruppe die Berechnung des Mittelwertes des Leistungsbedarfs während eines Betriebszustandes. Um Ausreiser frühzeitig zu erkennen kann hierbei zunächst für jeden Durchlauf eines Betriebszustandes der Mittelwert einzeln ausgewiesen und geprüft werden. Sind die bestimmten Werte plausibel, kann daraus der Gesamtmittelwert für die jeweilige Verbrauchergruppe in Abhängigkeit zu den unterschiedlichen Betriebszuständen berechnet werden (s. Tabelle 23, [5.1]).

Zudem werden die (aggregierten) PKV für die verschiedenen Betriebszustände ermittelt. Diese können jeweils durch Summation der einzelnen PKV auf Ebene der Verbrauchergruppen innerhalb eines Betriebszustandes erzeugt werden. Zur nachfolgenden Berechnung des  $TED_M$  bzw. des  $TED_P$  sind zudem die aggregierten Messintervalle bzw. Betriebsintervalle für die einzelnen Betriebszustände auszuweisen (s. Tabelle 23, [5.2]). Die generierten Informationen sind entsprechend der tabellarischen Aufstellung nach Tabelle 9 zu dokumentieren.

Auf Basis der PKV kann nun der  $TED_M$  entsprechend Kapitel 4.3, Formel 3 bzw. Formel 4, bestimmt werden. Zur Berechnung eines repräsentativen  $TED_P$  (s. Kapitel 4.3, Formel 5), sind die realen Zeitanteile der Betriebszustände innerhalb des Betrachtungszeitraums zu berücksichtigen (s. Tabelle 23, [5.3]). Liegen dem Unternehmen diese realen Zeitanteile nicht vor, sollte eine valide und begründete Abschätzung bspw. auf Basis von Informationen der Produktionsplanung und -steuerung erfolgen.

Um das Berechnungsverfahren zur Bestimmung eines repräsentativen  $TED_P$  zu demonstrieren, werden exemplarisch für die in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Betriebszustände in Anlehnung an die ISO 14955-3:2019 Standardzeitanteile für einen definierten Betriebszyklus bzw. Betrachtungszeitraum dargestellt. Diese Standardzeitanteile nach ISO 14955-3:2019 dienen grundsätzlich Vergleichs- oder Benchmarking-Vorhaben und sind in Tabelle 21 aufgeführt.

Tabelle 21: Standardzeitanteile für die Betriebszustände innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums in Anlehnung an ISO 14955-3:2019

Betriebszustände	Standardzeitanteil pro Betrachtungszeitraum [%]
A Bearbeitung	60
B Aufwärmen	10
C Betriebsbereit	5
D Erweitertes Standby	10
E Standby	10
F Aus	5
G Sonstige	0

Für die Integration dieser Standardzeitanteile in den Berechnungsansatz des  $TED_p$  sind diese Standardzeitanteile in einem vorgelagerten Schritt zunächst auf den in Hauptschritt [1] definierten zeitlichen Bezugsrahmen umzulegen. Untenstehend ist ein Berechnungsbeispiel in Anlehnung an ISO 14955-3:2019 aufgeführt, welches die Ermittlung der Zeitanteile der Betriebszustände bezogen auf ein Jahr aufzeigt. Exemplarisch wird hierbei ein zeitlicher Bezugsrahmen von einem Betriebsjahr mit 220 Produktions- bzw. Betriebstagen zu je 8 Stunden angesetzt (Tabelle 22).

Tabelle 22: Umlage der Standardzeitanteile auf den definierten zeitlichen Bezugsrahmen anhand eines fiktiven Beispiels

- Shopfloor-Produktion an 220 Tagen/Jahr			
- Eine Schicht pro Tag (8-h-Schicht)			
- 16 h (= 2/3 eines Tages) ist die Werkzeugmaschine an einem Produktionstag ausgeschaltet sowie an 365-220=145 Tagen pro Jahr			
- Während der operativen Zeiten gelten die Standardzeitanteile aus Tabelle 17			
Standardzeitanteil je Betriebszustand in [%]		Berechnung des Anteils der Betriebszustände am Betriebsjahr	Prozentualer Anteil der Betriebszustände am Betriebsjahr [%]
A	60	$1/3 * 0,6 * 220/365 = 0,1205$	12
B	10	$1/3 * 0,1 * 220/365 = 0,0201$	2
C	5	$1/3 * 0,05 * 220/365 = 0,0100$	1
D	10	$1/3 * 0,1 * 220/365 = 0,0201$	2
E	10	$1/3 * 0,1 * 220/365 = 0,0201$	2
F	5	$(2/3 + 1/3 * 0,05) * 220/365 + 145/365 = 0,8091$	81
G	0	$1/3 * 0 * 220/365 = 0,0$	0

Das Beispiel aus Tabelle 22 zeigt die mögliche Dominanz einzelner Betriebszustände in Abhängigkeit vom angesetzten Betrachtungszeitraum. In dem dargestellten Beispiel entfallen auf ein Jahr mit 220 Betriebstagen bei einem Einschichtbetrieb zu je 8 Stunden 81 % der Gesamtzeit (365 Tage) auf den Betriebszustand F (Aus), 12 % auf den Betriebszustand A (Bearbeitung) und die restlichen 7 % entsprechend der Angaben aus Tabelle 21 auf die übrigen Betriebszustände.

Die exemplarischen Anteile der Betriebszustände am Betriebsjahr aus Tabelle 22 können folgendermaßen in die Berechnungsformel des  $TED_p$  in [Wh] (s. Kapitel 4.3, Formel 5) integriert werden, um einen repräsentativen  $TED_p$  für den angesetzten zeitlichen Bezugsrahmen zu ermitteln:

$$TED_p = \frac{365 * 24}{z} (P_A * 0,1205 + P_B * 0,0201 + P_C * 0,0100 + P_D * 0,0201 + P_E * 0,0201 + P_F * 0,8091 + P_G * 0,0) \quad (9)$$

Als Kontrollschritt wird die Validität der berechneten Werte geprüft, indem die relative Messabweichung des  $TED_M$  zum gemessenen Gesamtenergiebedarf (Realwert) nach Kapitel 4.4, Formel 6, berechnet wird. Alternativ kann hierzu auch der NRMSE nach Kapitel 4.4, Formel 7, bestimmt

werden. Auf Basis der bisher durchgeführten Messkampagnen und der dadurch generierten Werte werden Abweichungen  $\leq 5\%$  als stimmig eingestuft. Bei Abweichungen  $>5\%$ , entweder in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf oder in Bezug auf den Energiebedarf einzelner Betriebszustände, muss das Unternehmen selbst entscheiden, ob die Abweichung, nach Kontrollprüfung der einzelnen Rechenschritte, akzeptabel ist<sup>58</sup> oder ob eine neue Messkampagne durchgeführt werden soll. Die Fehlerausweisung in Bezug auf den berechneten Energiebedarf pro Betriebszustand und dem  $TED_M$  gegenüber den gemessenen Realdaten (relative Messabweichung und/oder NRMSE) ist zu dokumentieren. Dies kann ebenso auf Ebene der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebszustandes erfolgen. Die Dokumentation kann entsprechend dem Beispiel aus Tabelle 8 umgesetzt werden (s. Tabelle 23, [5.4]).

Tabelle 23 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [5] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 23: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [5] Leistungskennwerte

**[5] Leistungskennwerte**

<b>[Nr.]</b>	<b>Abfrage</b>	<b>Handlungsempfehlung</b>
[5.1]	Wie hoch ist der mittlere Leistungsbedarf der einzelnen Verbrauchergruppen je Betriebszustand?	Mittelwertbildung pro Verbrauchergruppe je Betriebszustand (ggf. zzgl. Ausweisung des gemessenen Zeitintervalls)
[5.2]	Wie hoch ist der mittlere Leistungsbedarf der einzelnen Betriebszustände?	Mittelwertbildung pro Betriebszustand zzgl. Ausweisung des gemessenen Zeitintervalls
[5.3]	Wie hoch ist der $TED_M$ und ggf. der $TED_P$ ?	Berechnung des $TED_M$ auf Basis der Leistungskennwerte und der einzelnen Betriebsintervalle je Betriebszustand sowie ggf. des $TED_P$ unter Berücksichtigung der repräsentativen Zeitanteile der Betriebszustände innerhalb des Betrachtungszeitraums
[5.4]	Kontrollschritt: Wie hoch ist der Grad der Genauigkeit sowie die Abweichung des $TED_M$ zum gemessenen Realwert?	Bestimmung des Grads der Genauigkeit und Berechnung der relativen Messabweichung vom $TED_M$ zum gemessenen Gesamtenergiebedarf (Realwert) (Empfehlung: Ausweisung der Abweichung für alle angegebenen Leistungskennwerte sowie Dokumentation der Fehlerausweisung)

**[6] THG-Emissionen**

In Hauptschritt [6] erfolgt die Ermittlung der mit dem Zerspanungsprozess verbundenen THG-Emissionen. Hierfür muss zunächst die Auswahl geeigneter Lebenszyklusdaten bzw. eines entsprechend geeigneten EF erfolgen, die bzw. der den unternehmensspezifischen Strombezug möglichst genau abbildet. Je nach Rahmenbedingungen und verfügbarer Datenlage existieren die in Tabelle 24 strukturiert dargestellten Optionen zur Wahl geeigneter Lebenszyklusdaten bzw. eines geeigneten EF in Anlehnung an DIN EN ISO 14067:2019 (vgl. Kapitel 2.1.2). Hierbei gilt, je passgenauer die Lebenszyklusdaten bzw. der EF für die unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen festgelegt werden können bzw. kann, desto genauer werden die Ergebnisse für das unternehmenseigene Carbon Accounting. Die Wahl ist zu begründen und zu dokumentieren (s. Tabelle 26, [6.1]).

<sup>58</sup> Dies kann bspw. der Fall sein, wenn die Unsicherheit sich auf einen Leistungskennwert bzw. Energiebedarfsanteil eines Betriebszustandes bezieht, welcher in Bezug auf den ganzen zeitlichen Bezugsrahmen der THG-Bilanz einen geringen Anteil hält.

Tabelle 24: Optionen zur Bestimmung geeigneter Lebenszyklusdaten bzw. eines geeigneten EF zur Abbildung des Strombezugs (eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14067:2019)

Option	Strombezug	Wahl der Lebenszyklusdaten/ des EF
Option 1:	Unternehmensinterne Erzeugung, ohne (Teil-)Verkauf an Dritte	→ Spezifische Lebenszyklusdaten
Option 2:	Externer Bezug von direkt angeschlossenem Erzeuger	→ Vom Erzeuger bereitgestellter EF
Option 3:	Externer Bezug vom Netz	→ Lieferantenspezifische Lebenszyklusdaten
Option 4:	Externer Bezug vom Netz ohne Lebenszyklusdaten vom Erzeuger	→ Bilanzierung auf Basis der bekannten THG-Emissionsmengen des jeweiligen Stromnetzes
Option 5:	Externer Bezug vom Netz ohne repräsentative Lebenszyklusdaten	→ Lebenszyklusdaten/ EF aus anerkannten Datenbanken

+ Genauigkeit der Ergebnisse  
-

Baut die THG-Bilanzierung auf Lebenszyklusdaten auf, muss der Emissionsfaktor für die Strombereitstellung als Wirkungsindikatorwert für die Wirkungskategorie „Klimawandel“ berechnet werden. Hierzu erfolgt durch Berechnung der Elementarflüsse und im Rahmen der Wirkungsabschätzung nachfolgende Klassifizierung und Charakterisierung anhand der aktuellsten vom IPCC veröffentlichten Charakterisierungsfaktoren (GWP 100a in [kg CO<sub>2</sub>Äq / kg Elementarfluss]).<sup>59</sup> Dies kann von LCA-Expertinnen und Experten bzw. LCA-Anwendenden durch entsprechende LCA-Software-Lösungen umgesetzt werden.

Liegt ein adäquater EF zur Abbildung des Strombezugs bereit, erfolgt die Berechnung der prozessbezogenen THG-Emissionen eines Zerspanungsproduktes (THG<sub>E<sub>TED<sub>P</sub></sub></sub>) in [kg CO<sub>2</sub>Äq] durch Multiplikation des TED<sub>P</sub> in [Energieeinheit, z. B. kWh] mit dem entsprechenden EF in [kg CO<sub>2</sub>Äq / Energieeinheit] (vgl. Panagiotopoulou et al. 2022):

$$THG_{E_{TED_P}} = TED_P * EF \tag{10}$$

Sollen die THG-Emissionen bezogen auf einen anderen Energiebedarf, z. B. den Gesamtenergiebedarf der Werkzeugmaschine innerhalb der Messkampagne (TED<sub>M</sub>), ausgewiesen werden, ist anstelle des TED<sub>P</sub> der entsprechende Energiebedarfsanteil zu wählen.

Je nach Ergebnisdarstellung und Auswertungs- bzw. Reporting-Absicht kann es zudem sinnvoll sein, die THG-Emissionen einzelner Bestandteile, z. B. einzelner Betriebszustände oder Verbrauchergruppen, auszuweisen.

Erfolgt ein externer Strombezug vom Netz, ohne dass verfügbare repräsentative Lebenszyklusdaten verfügbar sind, können Lebenszyklusdaten resp. THG-Emissionen aus anerkannten Datenbanken zur Modellierung der THG-Emissionen herangezogen werden (vgl. Tabelle 24, Option 5).

Je nach angewendeten Bilanzierungsstandard gelten unterschiedliche Anforderungen an das Carbon Accounting, an die anzuwendenden Lebenszyklusdaten bzw. den EF des Stromproduktes sowie an die zu berücksichtigten THG und Lebenswegabschnitte. Die Wahl der jeweiligen Lebenszyklusdaten bzw. des EF bedingt maßgeblich die berechneten Ergebnisse bzgl. der Menge an THG-Emissionen innerhalb der THG-Bilanzierung. Tabelle 25 listet beispielhafte EF für den deutschen Strombezug (Strommix) aus öffentlichen sowie kommerziellen Datenquellen und stellt die Modellierungsunterschiede gegenüber. Die Gegenüberstellung zeigt deutlich, dass die Höhe der EF von den einbezogenen

<sup>59</sup> Die zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit aktuelle vom Weltklimarat veröffentlichte Wirkungsabschätzungsmethode ist die IPCC 2013.

Lebenswegabschnitten des Stromproduktes, den zugrunde liegenden Lebenszyklusdaten, dem zugrunde liegenden Modellierungs- und Berechnungsvorgehen innerhalb der Wirkungsabschätzung, dem zeitlichen Bezugsrahmen sowie dem Bilanzierungsziel (Bilanzierung des Ist-Zustandes vs. einer möglichen Energiebedarfsänderung durch z. B. eine Optimierungsmaßnahme im Sinne des CLCA) abhängig ist. Daher ist die Auswahl des jeweiligen EF aus öffentlichen oder kommerziellen Quellen im Rahmen des Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019, ebendann wenn keine genauen Lebenszyklusdaten des bezogenen Stromproduktes vorliegen, genauestens zu begründen und die Charakteristika des EF sind innerhalb der Bilanzierung zu beschreiben. Der hervorgehobene EF in Tabelle 25 entspricht den beschriebenen Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019.

Tabelle 25: Beispielhafte EF aus anerkannten Datenbanken/-quellen für den Strombezug innerhalb Deutschlands (Strommix)

Quelle	Beschreibung	EF [kg CO <sub>2</sub> Äq/kWh]	Kommentar
UBA (2021a)	Direkter EF des deutschen Stromverbrauchs <sup>4</sup>	0,416	Öffentliche Quelle, Datenstand 02/2021, <b>keine Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus</b>
UBA (2021a)	EF des deutschen Stromverbrauchs inkl. Vorketten-Emissionen <sup>4</sup>	0,470	Öffentliche Quelle, Datenstand 02/2021, <b>keine Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus</b>
ecoinvent (2021c)	EF, des deutschen Stromverbrauchs, Niederspannung nach <b>Scope 2, alle THG</b> <sup>1, 4</sup>	0,407	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, <b>cut-off</b> , IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 100a</b>
	EF, des deutschen Stromverbrauchs, Niederspannung nach <b>Scope 3</b> inkl. Übertragungs- und Verteilungsverluste, <b>alle THG</b> <sup>1, 4</sup>	0,109	
	<i>Summe</i>	<b>0,516</b>	
ecoinvent (2021c)	EF, des deutschen Stromverbrauchs, Niederspannung nach <b>Scope 2, verpflichtende THG nach WRI und WBCSD</b> (2011, 2004) <sup>2, 4</sup>	0,406	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, <b>cut-off</b> , IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 100a</b>
	EF, des deutschen Stromverbrauchs, Niederspannung nach <b>Scope 3</b> inkl. Übertragungs- und Verteilungsverluste, <b>verpflichtende THG nach WRI und WBCSD</b> (2011, 2004) <sup>2, 4</sup>	0,107	
	<i>Summe</i>	0,513	
ecoinvent (2021a)	Zugrundeliegende Lebenszyklusdaten durch den Datensatz „market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   APOS, U“ (DE) <sup>3</sup> , <b>alle THG</b> <sup>1, 4</sup>	0,518	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, <b>apos</b> , IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 100a</b>
ecoinvent (2021a)	Zugrundeliegende Lebenszyklusdaten durch den Datensatz „market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   APOS, U“ (DE) <sup>3</sup> , <b>alle THG</b> <sup>1, 4</sup>	0,555	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, <b>apos</b> , IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 20a</b>
ecoinvent (2021a)	Zugrundeliegende Lebenszyklusdaten durch den Datensatz „market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   Cut-off, U“ (DE) <sup>3</sup> , <b>alle THG</b> <sup>1, 4</sup>	0,516	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, <b>cut-off</b> , IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 100a</b>
ecoinvent (2021a)	Zugrundeliegende Lebenszyklusdaten durch den Datensatz „market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   Cut-off, U“ (DE) <sup>3</sup> , <b>alle THG</b> <sup>1, 4</sup>	0,563	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, <b>cut-off</b> , IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 20a</b>
ecoinvent (2021a)	Zugrundeliegende Lebenszyklusdaten durch den Datensatz „market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   Consequential, U“ (DE) <sup>3</sup> , <b>alle THG</b> <sup>1, 5</sup>	0,138	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell Substitution, <b>consequential</b> (long-term),

Quelle	Beschreibung	EF [kg CO <sub>2</sub> Äq/kWh]	Kommentar
			IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 100a</b>
ecoinvent (2021a)	Zugrundeliegende Lebenszyklusdaten durch den Datensatz „market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   Consequential, U“ (DE) <sup>3</sup> , <b>alle THG<sup>1, 5</sup></b>	0,158	Kommerzielle Datenbank ecoinvent v3.8, Systemmodell Substitution, <b>consequential</b> (long-term), IPCC 2013 AR5 Report <b>GWP 20a</b>

<sup>1</sup> Unter alle THG werden die folgenden nach IPCC 2013 berücksichtigten THG verstanden: Kohlendioxid, fossil; Kohlenmonoxid, fossil; Kohlenmonoxid, nicht fossil; Chlorkohlenwasserstoffe und teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe; Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW); Halone; teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW); teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW); Methan, fossil; Methan, nicht fossil; Distickstoffoxid; Stickstofftrifluorid; Stickstoffoxid; Perfluorkohlenwasserstoffe (PFCs); Schwefelhexafluorid; flüchtige organische Verbindungen, nicht spezifizierter Ursprung (VOC). Emissionen die mit Landnutzungsänderung verbunden sind werden nicht mit berichtet, sondern separat berichtet (ecoinvent 2021b).

<sup>2</sup> Unter den nach WRI und WBCSD (2011, 2004) verpflichtenden THG werden gerechnet: Kohlendioxid, fossil; Fluorkohlenwasserstoffe (HFC); Methan, fossil; Methan, nicht fossil; Distickstoffoxid; Stickstofftrifluorid; Perfluorkohlenwasserstoffe (PFC); Schwefelhexafluorid.

<sup>3</sup> Dieser Datensatz wurde vom Jahr 2017 auf das Jahr der Berechnung (2021) extrapoliert. Die Unsicherheit wurde entsprechend angepasst.

<sup>4</sup> Bilanzierung des Ist-Zustandes (ALCA)

<sup>5</sup> Bilanzierung einer möglichen Energiebedarfsänderung bspw. durch Optimierungsmaßnahmen an der Werkzeugmaschine (CLCA).

Je nach Wahl des zeitlichen Bezugsrahmens in Hauptschritt [1] und der Wahl der Betrachtungsebene, für welche die THG-Emissionen ausgewiesen werden sollen, erfolgt die Berechnung der entsprechenden THG-Emissionen. Hierbei kann bspw. eine Skalierung der ermittelten THG-Emissionen auf Basis eines repräsentativen TED<sub>p</sub> oder die Berechnung der betrieblichen Jahres-THG-Emissionen auf Basis des entsprechend skalierten TED<sub>M</sub> durchgeführt werden. Je nachdem, wie lange der Berichterstattungszeitraum gewählt wird, ist eine Skalierung der THG-Emissionen bzw. der Leistungsverbräuche und dabei v. a. der variablen Verbrauchergruppen nur möglich, wenn keine Veränderung des eigentlichen Zerspanungsprozesses und somit der zugrunde liegenden Leistungsdaten in Form der PKV durchgeführt wurde bzw. wird (s. Tabelle 26, [6.2]).

Tabelle 26 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [6] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 26: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [6] THG-Emissionen

**[6] THG-Emissionen**

[Nr.]	Abfrage	Handlungsempfehlung
[6.1]	Welcher EF kann angewendet werden?	Möglichst spezifische Auswahl des EF sowie Begründung der Auswahl (Empfehlung: Beschreibung des THF-EF und seiner Charakteristika, z. B. zugrunde liegendes Berechnungsmodell, inkludierte oder vernachlässigte Lebenszyklusabschnitte)
[6.2]	Wie hoch sind die THG-Emissionen?	Bestimmung der THG-Emissionen entsprechend der gewählten Betrachtungsebene und des gewählten zeitlichen Bezugsrahmens

**[7] Ergebnisauswertung**

In Hauptschritt [7] erfolgt die Auswertung der berechneten Ergebnisse. Hierbei werden die Ergebnisse aus Hauptschritt [5] und Hauptschritt [6] gemeinsam betrachtet. Die Beurteilung der eigenen Ergebnisse, zur Ableitung von Limitationen und Schlussfolgerungen sowie Handlungsempfehlungen



entsprechend der DIN EN ISO 14040:2020 sollen dabei vorwiegend auf Maschinenebene abgeleitet werden (s. Tabelle 29, [7.3]).

Um die Ergebnisse allerdings zunächst besser analysieren zu können, sollen die ermittelten THG-Emissionen mittels einer Hotspotanalyse auf Ebene der Betriebszustände und Verbrauchergruppen untersucht werden. Dies kann beispielweise wie in Tabelle 27 bzw. Tabelle 28 tabellarisch in Form einer Beitragsanalyse dargestellt werden.<sup>60</sup> Durch die integrierte farbliche Einordnung der einzelnen Anteile an der Gesamt-THG-Emissionsmenge<sup>61</sup> wird eine schnelle Übersicht hinsichtlich der Treiber des Energiebedarfs während des betrachteten Betriebszyklus bzw. in Bezug auf die unterschiedlichen Verbrauchergruppen möglich und lässt ggf. einen Rückschluss auf signifikante Parameter zu (s. Tabelle 29, [7.1]).

Tabelle 27: Beitragsanalyse: Rangbildung der THG-Emissionen auf Betriebszustandsebene

Betriebszustand		THG-Emissionen, absolut [kg CO <sub>2</sub> Äq]	Anteil an Gesamt-THG-Menge [%]
A	Bearbeitung	WERT	PROZENTSATZ
B	Aufwärmen	WERT	PROZENTSATZ
C	Betriebsbereit	WERT	PROZENTSATZ
D	Erweitertes Standby	WERT	PROZENTSATZ
E	Standby	WERT	PROZENTSATZ
F	Aus	WERT	PROZENTSATZ
G	Sonstige	WERT	PROZENTSATZ
<b>Gesamt</b>		<i>SUMME</i>	100

**Einordnung der Anteile an der Gesamt-THG-Emissionsmenge**  
Rangfolge

- > 50 %
- 25 bis 50 %
- 10 bis 25 %
- 2,5 bis 10 %
- 0 bis 2,5 %

Tabelle 28: Beitragsanalyse: Rangbildung der THG-Emissionen auf Verbrauchergruppenebene

Verbrauchergruppe		THG-Emissionen, absolut [kg CO <sub>2</sub> Äq]	Anteil an Gesamt-THG-Menge [%]
(1)	Hauptschalter und Steuerung	WERT	PROZENTSATZ
(2)	Hydraulik	WERT	PROZENTSATZ
(3)	Kühlung	WERT	PROZENTSATZ
(4)	Absaugung	WERT	PROZENTSATZ
(5)	Beleuchtung	WERT	PROZENTSATZ
(6)	Ventilation	WERT	PROZENTSATZ
(7)	Sonst. Nebenaggregate	WERT	PROZENTSATZ
(8)	Späneförderer	WERT	PROZENTSATZ
(9)	Kühlschmiermittel	WERT	PROZENTSATZ
(10)	Achsantriebe	WERT	PROZENTSATZ
(11)	Spindel	WERT	PROZENTSATZ
(12)	Werkzeug	WERT	PROZENTSATZ
(13)	Materialabtrag	WERT	PROZENTSATZ
<b>Gesamt</b>		<i>SUMME</i>	100

**Einordnung der Anteile an der Gesamt-THG-Emissionsmenge**  
Rangfolge

- > 50 %
- 25 bis 50 %
- 10 bis 25 %
- 2,5 bis 10 %
- 0 bis 2,5 %

Zur Vollständigkeit sei hier erwähnt, dass in Abhängigkeit des Ziels und Untersuchungsrahmens der Studie neben der dargestellten Beitragsanalyse zur Identifizierung der signifikanten Parameter auch Methoden wie die (i) Dominanzanalyse oder die (ii) Einflussanalyse durch die DIN EN ISO 14044:2020 empfohlen werden. Während bei (i) die signifikanten Beiträge durch statistische Werkzeuge erkannt werden (qualitative oder quantitative Rangbildung, z. B. durch ABC-Analyse), dient bei (ii) die potenzielle Umweltrelevanz der Identifizierung der signifikanten Parameter.

<sup>60</sup> Die Analyse kann auch auf Energiebedarfsebene erfolgen, d. h. zur Ermittlung der Treiber muss nicht zwingend die Übersetzung in THG-Emissionen erfolgen.

<sup>61</sup> Die prozentuale Einordnung der Beiträge an der Gesamt-THG-Emissionsmenge in Tabelle 27 und Tabelle 28 wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 14044:2020 gewählt, kann aber auch durch das Unternehmen entsprechend der eigenen Gegebenheiten festgelegt werden.

Wurden die Treiber des Energiebedarfs identifiziert, so ist zur Einschätzung der Unsicherheiten entsprechend der normativen Vorgaben eine Sensitivitätsprüfung dieser Parameter durchzuführen. Dies dient nicht nur der transparenten Einordnung der Unsicherheiten, sondern ebenso der Prüfung des Einflusses alternativer Anwendungsprofile auf das Endergebnis (vgl. Kapitel 2.1.2). Für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand wird darauf aufbauend empfohlen, eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Maschinenauslastung durchzuführen und somit unterschiedliche Auslastungsszenarien der Werkzeugmaschine zu prüfen. Die Maschinenauslastung kann hierbei bspw. zwischen 50 und 100 % variiert werden. Hierdurch kann sowohl der Einfluss der unproduktiven Betriebszustände als auch des Betriebszustands A (Bearbeitung) auf den Gesamtenergiebedarf in Form des  $TED_P$  bzw. des  $TED_M$  dargestellt und bewertet werden (s. Tabelle 29, [7.2]).

Zur Prüfung der Datenqualität, u. a. hinsichtlich der Aktualität und Repräsentativität der Datengrundlage, sei an dieser Stelle auf Kapitel 5.3.2 verwiesen (s. Tabelle 29, [7.2]).

Tabelle 29 fasst die einzelnen Abfragen sowie die damit einhergehenden Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [7] des systematischen Verfahrensansatzes für das unternehmensinterne Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zusammen.

Tabelle 29: Abfrage und Handlungsempfehlungen für Hauptschritt [7] Ergebnisauswertung

**[7] Ergebnisauswertung**

[Nr.]	Abfrage	Handlungsempfehlung
[7.1]	Welche Treiber des TED können identifiziert werden?	Ableitung der wesentlichen Treiber des $TED_M$ bzw. des $TED_P$ im Rahmen einer Hot-Spot-Analyse
[7.2]	Welche Unsicherheiten liegen in den sensitiven Parametern und wie ist die Datengrundlage zu bewerten?	Durchführung einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich dem Parameter Maschinenauslastung sowie der Prüfung der Datenqualität (Empfehlung: Anwendung des Verfahrens zur Prüfung der Datenqualität entsprechend Kapitel 5.3.1)
[7.3]	Wie können die eigenen Ergebnisse beurteilt werden und welche Limitationen, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen können abgeleitet werden?	Darstellung und Beschreibung der Ergebnisbeurteilung, möglicher Limitationen und Schlussfolgerungen sowie Handlungsempfehlungen

**5.3.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Datenqualität**

Der systematische Verfahrensansatz zum Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen wurde auf Grundlage der Bedingungen 1) Ganzheitlichkeit, 2) Transparenz, 3) Praxisnähe sowie 4) Übertragbarkeit entwickelt (vgl. Kapitel 3). Damit wird auch gleichzeitig eine größtmögliche Modellierungsgenauigkeit bei der Datengenerierung angestrebt. Die Umsetzung des Verfahrens liegt in der Verantwortung der Unternehmen. Es ist hierbei denkbar, dass der Verfahrensansatz durch ein Unternehmen „vereinfacht“ durchgeführt wird. Ein mögliches Szenario wäre bspw., dass ein Unternehmen an einem Standort keine standortspezifischen Daten erheben kann und stattdessen nur Sekundärdaten bzw. Schätzwerte für die PKV oder durch einen Dritten verifizierte PKV eines anderen Standorts verwendet. Derartige Vereinfachungen führen aber zwangsläufig zu einer Abnahme der Datengenauigkeit und somit der Qualität der generierten Ergebnisse der standortspezifischen THG-Bilanz, was die Notwendigkeit von Prüfverfahren zur Sicherung der Verfahrens- und Datenqualität, wie in den Ausführungen der DIN EN ISO 14067:2019 gefordert, begründet.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, dient die angestrebte Systematisierung des Verfahrensansatzes einer erleichterten und effizienteren Durchführung des unternehmensinternen Carbon Accounting. Dies beinhaltet für Unternehmen auch den Umgang mit nachgelagerten Prüf- und

Qualitätssicherungsverfahren, die durch die Systematisierung für nachgelagerte Untersuchungen vereinfacht oder zusammengefasst werden können (Vermeidung von Redundanzen) (DIN EN ISO 14067:2019). Neben der Maßnahme der Kritischen Prüfung, deren Ausführung ausführlich in den Standards DIN EN ISO 14040:2020, DIN EN ISO 14044:2020 sowie DIN CEN ISO/TS 14071:2016 beleuchtet wird, wird unabhängig davon ein Vorgehen zur qualitativen Prüfung der Datenqualität innerhalb der vorliegenden Arbeit vorgeschlagen. Zur Erfüllung der Aufgabe (3) (vgl. Kapitel 5.3) dient dieser eigens entwickelte Maßnahmenvorschlag zum Erkennen von Schwächen in Bezug auf die Datenqualität und gründet sich auf die Rahmenvorgaben der DIN EN ISO 14044:2020 sowie der DIN EN ISO 14067:2019.

Hierbei sei darauf hingewiesen, dass das Prüfverfahren angewendet werden muss, wenn Unternehmen von der eigentlichen Verfahrensbeschreibung (s. Kapitel 5.3.1) aus organisationsinternen Gründen abweichen und/oder sie dieses als initiales und regelmäßiges Kontrollinstrument nutzen möchten. Mögliche Beispiele, wann das Prüfverfahren notwendig wird, sind,

- wenn ein Unternehmen die PKV der Verbrauchergruppen und/oder Betriebszustände nicht vollständig und disaggregiert durch eine Primärdatenerhebung erfasst, sondern Schätzwerte für einzelne PKV annimmt;
- wenn ein Unternehmen die PKV der konstanten Verbrauchergruppen einer spezifischen Werkzeugmaschine A an Standort A ohne Kontrollmessung für eine Werkzeugmaschine B gleichen Bautyps an Standort B verwendet;
- wenn die für die THG-Bilanzierung angenommenen Betriebsintervalle oder die Maschinenauslastung nicht anhand von realen Produktionsdaten festgelegt werden;
- wenn keine regelmäßige Kontrollmessung der Leistungsbedarfe und Überprüfung der PKV erfolgt.

Das Prüfverfahren untersucht dabei die Dimensionen Datenvollständigkeit (i), Datenquellen und -genauigkeit (ii), Datenaktualität (iii) sowie Datenrepräsentativität (iv).

Innerhalb der Dimension (i) Datenvollständigkeit wird geprüft, ob bei der Erfassung der Daten alle Elemente (Verbrauchergruppen, Betriebszustände, Betriebsintervalle) entsprechend des EEMA berücksichtigt und in welchem Detailgrad diese aufgenommen wurden. Die Dimension (ii) Datenquellen und -genauigkeit fragt ab, mit welcher Methode die Daten erfasst bzw. bestimmt wurden (z. B. Messungen, Annahmen auf Basis von Sekundärquellen, Schätzungen) und ob die Einschätzung der Unsicherheit bei der Bestimmung der PKV (v. a. in Bezug auf die PKV auf Ebene der Betriebszustände und den Gesamtenergiebedarf) mit ausgewiesen wurde. In der Dimension (iii) Datenaktualität wird der zeitbezogene Erfassungsbereich überprüft und ob die verwendeten Daten für die Bestimmung der THG-Emissionen, v. a. in Bezug auf die Wahl der Lebenszyklusdaten bzw. EF, vor dem Hintergrund der Anforderungen der DIN EN ISO 14067:2019 Gültigkeit besitzen. Hierbei spielt nicht nur das Alter der Daten eine Rolle, sondern es sollte auch darauf geachtet werden, dass ein möglichst kurzes Zeitintervall, innerhalb welchem die Daten gesammelt werden, angestrebt wird. Eine adäquate Dauer der Datensammlung sollte entsprechend der organisationsspezifischen Gegebenheiten festgelegt werden. Die Dimension (iv) Datenrepräsentativität dient der „*qualitative[n] Bewertung des Grades, mit dem der Datensatz die wahre, interessierende Grundgesamtheit widerspiegelt*“ (DIN EN ISO 14067:2019). Dabei wird die Wahl der Lebenszyklusdaten bzw. EF, genauso wie die Nutzung spezifischer Daten und die evtl. Annahme bzgl. der Maschinenauslastung innerhalb des zeitlichen Betrachtungsrahmens untersucht. Zudem wird der zeitliche Gültigkeitsbereich der Daten bzw. der THG-Bilanz geprüft. Unter dem **zeitlichen Gültigkeitsbereich** wird „*der Zeitrahmen, für den der quantifizierte Wert für den [partiellen] CFP repräsentativ ist*“ (DIN EN ISO 14067:2019) verstanden.

Ein repräsentativer zeitlicher Gültigkeitsbereich (z. B. sechs Monate, ein Jahr) muss dabei von der Organisation resp. dem Unternehmen sowohl individuell festgelegt als auch begründet werden. Empfohlen wird hierbei, dass die Wahl nicht nur die jährlichen und jahresübergreifenden Veränderungen bzw. Schwankungen berücksichtigt, sondern auch, dass durch die Wahl mögliche Trends sichtbar gemacht werden können.

Entsprechend der durchgeführten THG-Bilanz und der dahinterliegenden Datenerfassung und Datenverarbeitung kann der Anwendende des in Tabelle 30 dargestellten Prüfverfahrens die Qualität seiner zugrunde liegenden Daten mittels eines dreistufigen Bewertungsschemas einordnen. Der Qualitätsgrad der Daten kann nach Beantwortung der Abfrage als umso höher bewertet werden, je weiter links in der Tabelle die Abfrageauswahl (x zutreffend) getroffen werden kann. Wird in einer Dimension bzw. spezifisch in Bezug auf eine Abfrageoption die Datenqualität als niedrig eingestuft, sollte direkt ein Handlungsbedarf abgeleitet werden. Dieser Handlungsbedarf ist in der Tabelle zu kennzeichnen (J: Ja) und sollte im Nachgang ausführlich beschrieben und dokumentiert werden. Der Handlungsbedarf ist vor Durchführung der nächsten THG-Bilanz des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen umzusetzen. Nur so ist für die Verfahrensdurchführung eine kontinuierliche Verbesserung der Datenqualität und der daraus resultierenden Repräsentativität der Bilanzergebnisse erzielbar.

Tabelle 30: Abfrage zur qualitativen Prüfung der Datenqualität

QUALITÄTSGRAD + <-----> -							Handlungsbedarf <sup>1</sup>
<b>Datenvollständigkeit</b>							
- Verbrauchergruppen	Alle disaggregiert	x/-	Teilweise aggregiert	x/-	Aggregiert	x/-	J/N
- Betriebszustände	Alle	x/-	Ausgewählte	x/-	Einer	x/-	J/N
- Betriebsintervalle	Alle gemessen	x/-	Messwerte und Schätzungen	x/-	Schätzung	x/-	J/N
<b>Datenquellen und -genauigkeit</b>							
- Leistungskennwerte	Primärdaten (z. B. Messung)	x/-	Sekundärdaten (z. B. Literatur/Datenbank)	x/-	Schätzwert	x/-	J/N
- Programmbed. Betriebsintervalle	Primärdaten (z. B. Messung)	x/-	Sekundärdaten (z. B. Literatur/Datenbank)	x/-	Schätzwert	x/-	J/N
- Bestimmung der Abweichung	Für alle Werte	x/-	Für einzelne Werte	x/-	Nicht bestimmt	x/-	J/N
<b>Datenaktualität</b>							
- Leistungs-/Energiedaten	≤ 1 Jahr	x/-	> 1 Jahr ≤ 3 Jahre	x/-	> 3 Jahre	x/-	J/N
- EF	≤ 1 Jahr	x/-	> 1 Jahr ≤ 3 Jahre	x/-	> 3 Jahre	x/-	J/N
- Zeitintervall der Datensammlung	Kurz (z. B. ≤ ein Tag)	x/-	Mäßig (z. B. > 1 Tag ≤ 5 Tage)	x/-	Lang (z. B. > 5 Tage)	x/-	J/N
<b>Datenrepräsentativität</b>							
- Lebenszyklusdaten/ EF <sup>2</sup>	Option 1 bis 3	x/-	Option 4	x/-	Option 5	x/-	J/N
- Spezifität, Maschine	Prozess auf Maschine A	x/-	Ähnlicher Prozess auf Maschine A	x/-	Gleicher/ähnlicher Prozess auf Maschine B	x/-	J/N
- Maschinenauslastung	Primärdaten	x/-	Produktionsplan	x/-	Schätzwert	x/-	J/N
- Zeitlicher Gültigkeitsbereich	Repräsentativ	x/-	-	-	Nicht repräsentativ	x/-	J/N

x: zutreffend; -: nichtzutreffend; J: Ja; N: Nein

<sup>1</sup> Falls ein Handlungsbedarf zur Erhöhung der Datenqualität identifiziert wurde, ist dieser genauer zu beschreiben.

<sup>2</sup> Definition der Optionen entsprechend Tabelle 24.

Wie oft, zu welchem Zeitpunkt und von wem das Prüfungsverfahren zur Sicherung der Datenqualität durchgeführt werden soll, ist jeweils vom anzuwendenden Unternehmen innerhalb der Aufgabe (7)

und evtl. in der Aufgabe (5) entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.3 spezifisch für die eigene Organisation festzulegen.

## 6 Modellversuch des Carbon Accounting Ansatzes

Vor der Integration eines systematischen Verfahrensansatzes zur Ermittlung eines (partiellen) CFP in den organisationsinternen Carbon Accounting- und Reporting-Ablauf muss ein Unternehmen diesen zunächst entsprechend der Vorgaben der DIN EN ISO 14067:2019 innerhalb eines Modellversuchs testen. Der Modellversuch dient dabei der Validierung der Richtigkeit und der Repräsentativität des entwickelten systematischen Verfahrensansatzes für den partiellen CFP auf Prozessebene.<sup>62</sup>

Zur Validierung des in Kapitel 5.3 entwickelten systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen wurde der entsprechend geforderte Modellversuch anhand eines realen Praxisbeispiels durchgeführt. Dieser Modellversuch wird nach dem in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Ablaufplan entsprechend der sieben Hauptschritte nachfolgend erläutert.

### [1] Basisinformationen

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde eine Messkampagne auf einer Fräsmaschine der Prozesslernfabrik CiP am Standort Lichtwiese der TU Darmstadt durchgeführt. Hierbei wurde auf dem Bearbeitungszentrum Deckel Maho DMC 50H, Baujahr 2001, der Energiebedarf des Zerspanungsprozesses zur Fertigung eines Zylinderbodens ( $\varnothing 25$ ) für einen Pneumatik-Kompaktzylinder untersucht.<sup>63</sup> Die Werkzeugmaschine sowie das Endprodukt des Fertigungsprozesses werden in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 22: links: Horizontal-Bearbeitungszentrum Deckel Maho DMC 50H am Standort Prozesslernfabrik CiP der TU Darmstadt (Bild: Sybille Scheibner, PTW); rechts: Endprodukt des untersuchten Fräsprozesses – Zylinderboden eines Pneumatik-Kompaktzylinders (Bild: Julia Zeulner)

Die Basisinformationen zum Modellversuch sind in Tabelle 31 aufgelistet (vgl. Tabelle 14, [1.1] bis [1.8]).

<sup>62</sup> Das Unternehmen ist darüber hinaus in der Pflicht, den Ansatz in regelmäßigen Abständen durch solche Modellversuche zu überprüfen, „um dessen fortlaufende Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit sicherzustellen“ (DIN EN ISO 14067:2019).

<sup>63</sup> Die Primärdaten der Untersuchung wurden auch zur Gegenüberstellung der auf Basis des EEMA erzeugten und generischen LCI-Daten in Kapitel 5.2.1 herangezogen.

Tabelle 31: Dokumentation der Basisinformationen des Modellversuchs

[1.1]	<p>Unternehmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- TU Darmstadt</li> </ul> <p>Standort:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- TU Darmstadt, Institut PTW, Prozesslernfabrik CiP, Jovanka-Bontschits-Straße 10, 64287 Darmstadt</li> </ul> <p>Verantwortlicher Maschinenführer:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tobias Biegel</li> <li>- (Versuchsfeldtechniker: Christoph Schwarz)</li> </ul>
[1.2]	<p>Angaben zur Maschine:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deckel Maho DMC 50H</li> <li>- Baujahr: 2001</li> <li>- Hersteller: DECKEL MAHO Pfronten GmbH</li> <li>- Maschinen-Nr.: 400095</li> <li>- Nennleistung: 35 kW</li> <li>- Kurzbeschreibung: Das Horizontale Dreiachsige Bearbeitungszentrum Deckel Maho DMC 50H mit integriertem Palettenwechsler (zwei Paletten mit Palettenabmessungen von 400 x 400 mm) dient der Fräs- und Bohrbearbeitung von Serienteilen. Die Maschine hat ein Stahlgussgestell, ein lineares Führungssystem und einen automatischen Werkzeugwechsel mit 40 Magazinplätzen. Als CNC-Steuerungsprogramm kommt das Sinumerik 840D von Siemens zum Einsatz. Das Maschinengewicht, zzgl. des Gewichts des Späneförderers, des Werkzeugmagazins, des Schaltschranks sowie des Kühlmittel tanks beträgt 9,2 t. Die Maschine führt für die Bearbeitung des Werkstücks zur Herstellung des Zylinderbodens 18 Werkzeugwechsel durch (CiP 2021).</li> </ul>
[1.3]	<p>Ziel:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmung der THG-Emissionen und deren wesentliche Treiber bei der Fertigung eines Zylinderbodens (<math>\varnothing 25</math>) für einen Pneumatik-Kompaktzylinder auf der Werkzeugmaschine Deckel Maho DMC 50H</li> </ul> <p>Wahl der FU:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fertigung eines Zylinderbodens (<math>\varnothing 25</math>) für einen Pneumatik-Kompaktzylinder</li> </ul>
[1.4]	<p>Umgebungsbedingungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatur: 24°C</li> <li>- Luftfeuchtigkeit: 40 %</li> </ul>
[1.5]	<p>Datum und Dauer der Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 23.09.2020 und 10:00-14:00 Uhr</li> </ul>
[1.6]	<p>Zeitlicher Bezugsrahmen der THG-Bilanz/Berichterstattungszeitraum:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ein fiktives Betriebsjahr (365 Tage) mit 220 Produktions- bzw. Betriebstagen im Einschichtbetrieb (eine 8-h-Schicht pro Tag)</li> </ul> <p>Geografischer Bezugsrahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deutschland (DE)</li> </ul> <p>Bezugsrahmen innerhalb der Technosphäre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzungsphase der Werkzeugmaschine inkl. Aufwände für Wartungsarbeiten, ohne Herstellung oder EoL</li> </ul>
[1.7]	<p>Auswahl des THG-Emissionsfaktors:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ecoinvent (2021c): 0,516 kg CO<sub>2</sub>Äq / kWh – EF, des deutschen Stromverbrauchs, Niederspannung nach Scope 2 und Scope 3 inkl. Übertragungs- und Verteilungsverluste, alle THG (ecoinvent v3.8, Systemmodell allocation, cut-off, IPCC 2013 AR5 Report GWP 100a)</li> </ul>
[1.8]	<p>Informationen zum Messmittel:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mobiler Messkoffer zur elektrischen Leistungsmessung von Maschinen (bis zu sieben Komponenten 3-Phasig)</li> <li>- Hersteller: Eigenaufbau mit Messgeräten von Janitza durch ETA, TU Darmstadt</li> <li>- Modell: Janitza UMG20CM1</li> </ul> <p>Zeitliche Auflösung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0,5 Sekunden</li> </ul>

## [2] Referenzsystem

Zur genaueren Beschreibung des Referenzsystems werden alle energieverbrauchenden Aggregate der Werkzeugmaschine identifiziert und entsprechend den in Kapitel 4.2.1 festgelegten Verbrauchergruppen eingruppiert. Neben der Identifizierung relevanter Verbrauchergruppen der Deckel Maho DMC 50H erfolgt die Klassifizierung nach konstanten und variablen Verbrauchergruppen.

Die klassifizierten Verbrauchergruppen sind in Tabelle 32 dargestellt (vgl. Tabelle 16, [2.1]). Es werden keine externen Aggregate innerhalb des Referenzsystems berücksichtigt (vgl. Tabelle 16, [2.2]). Die Späneförderer sind fester Bestandteil des Werkzeugmaschinenmodells. Ein Kühl- bzw. Absaugaggregat ist in der Zerspanungsmaschine nicht verbaut.

Tabelle 32: Identifizierung und Klassifizierung relevanter Verbrauchergruppen der Deckel Maho DMC 50H

	Verbrauchergruppe	zugehörige Aggregate	Klassifizierung <sup>1</sup>
(1)	Hauptschalter und Steuerung	Schaltschrank, Computer	Ⓚ -
(2)	Hydraulik	Hydraulikpumpe	Ⓚ -
(3)	Kühlung	/	Ⓚ -
(4)	Absaugung	/	Ⓚ -
(5)	Beleuchtung	Beleuchtung (Arbeitsraum, Bildschirm)	Ⓚ -
(6)	Ventilation	Ventilation	Ⓚ -
(7)	Sonst. Nebenaggregate	Spindelkühlung	Ⓚ -
(8)	Späneförderer	Späneförderer (zwei)	Ⓚ -
(9)	Kühlschmiermittel	KSS-Pumpe	Ⓚ -
(10)	Achsenantriebe	Achsenantriebe	Ⓚ -
(11)	Spindel	Spindel	- Ⓟ
(12)	Werkzeug	Werkzeug, Revolver	- Ⓟ
(13)	Materialabtrag	/ (Luftschnitt)	- Ⓟ

<sup>1</sup> Zuordnung zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (Ⓚ)“ und „variable Verbrauchergruppe (Ⓟ)“. Hier sei zu beachten, dass die Zuordnung in Abhängigkeit der Werkzeugmaschine unterschiedlich ausfallen kann.

Des Weiteren werden die Betriebszustände definiert, die programmbedingt auf der Werkzeugmaschine ablaufen können. Diese sind in Tabelle 33 gelistet (vgl. Tabelle 16, [2.3]).

Tabelle 33: Betriebszustände des Referenzsystems der Deckel Maho DMC 50H

Betriebszustände	Kurzbeschreibung
A Bearbeitung	Programm zur Fertigung eines Zylinderbodens (Ø25) für einen Pneumatik-Kompaktzylinder; 18 Werkzeugwechsel; Programm ohne Palettenwechsel im Luftschnitt durchgeführt.
B Aufwärmen	Aufwärmprogramm, muss manuell angesteuert werden, Hydraulik wird währenddessen manuell zugeschaltet; inkl. Referenzieren der Achsen.
C Betriebsbereit	Alle Nebenaggregate sind eingeschaltet inkl. Späneförderer.
F Aus-Zustand	Alle Aggregate sind heruntergefahren und inaktiv.
G Sonstiges	Not-Aus: Antriebe, Spindel, Hydraulik und Hauptschalter werden nacheinander ausgeschaltet.

### [3] Messplan

Innerhalb des Modellversuchs sollen alle programmbedingt möglichen Betriebszustände auf der Werkzeugmaschine Deckel Maho DMC 50H durchlaufen werden (vgl. Tabelle 19, [3.1]). Innerhalb des Betriebszustandes A wird das Zerspanungsprogramm im Luftschnitt ausgeführt (A<sub>Air</sub>), um materialbedingte Einflüsse auf den Energiebedarf innerhalb dieser Untersuchung auszusparen.

Die dabei geplante Messdauer<sup>64</sup> sowie die Festlegung der Anzahl der Iterationen pro Betriebszustand wird in Tabelle 34 gelistet (vgl. Tabelle 19, [3.2] und [3.3]).

<sup>64</sup> Die unterschiedlich angelegten Messdauern (T<sub>C,1</sub> bis T<sub>G,3</sub>) innerhalb des durchlaufenen Betriebszyklus sollten initial zur Prüfung der Hypothese dienen, dass die Datengenauigkeit der generierten Mittelwerte bzw. Leistungskennwerte mit der Dauer der Messzyklen und damit mit der Anzahl der Datenpunkte korreliert. Dies wurde im Rahmen der Arbeit widerlegt und wurde bzw. wird daher nicht weiter thematisiert.



Tabelle 34: Geplante Messdauer und Anzahl der Durchläufe pro Betriebszustand innerhalb des Modellversuchs

Betriebszustände		Messdauer	Anzahl der Durchläufe
A <sub>Air</sub>	Bearbeitung	Bearbeitungsprogramm, Ø 6:35 min, ohne Palettenwechsel; Luftschnitt	4
B	Aufwärmen	Aufwärmprogramm, Ø 3:52 min	6
C	Betriebsbereit	$T_{C,1} \geq 120 \text{ s}^1$	4
		$T_{C,2} \geq 300 \text{ s}^2$	4
		$T_{C,3} \geq 60 \text{ s}^3$	4
F	Aus-Zustand	$T_{F,1} \geq 120 \text{ s}^1$	2
		$T_{F,2} \geq 300 \text{ s}^2$	2
		$T_{F,3} \geq 60 \text{ s}^3$	2
G	Sonstiges	$T_{G,1} \geq 120 \text{ s}^1$	2
		$T_{G,2} \geq 300 \text{ s}^2$	2
		$T_{G,3} \geq 60 \text{ s}^3$	2

<sup>1</sup> Eigene Festsetzung

<sup>2</sup> Empfehlung nach ISO 14955-3:2019

<sup>3</sup> eigene Festsetzung/Kontrollmessung

Zudem wird ausgewiesen, wie die Leistungsbedarfsermittlung innerhalb des Modellversuchs erfolgt. Hier ist zu unterscheiden, ob der Leistungsbedarf der Verbrauchergruppen direkt durch eine Messung oder durch Auslesen der relevanten Informationen aus der SPS ermittelt werden kann oder indirekt durch Rückrechnung. Tabelle 35 listet die Ermittlungsarten des Leistungsbedarfs nach Verbrauchergruppen innerhalb der Messkampagne an der Deckel Maho DMC 50H. Die Leistungsbedarfsaufnahme der Primärdaten erfolgt in einer zeitlichen Auflösung von 0,5 Sekunden innerhalb des Modellversuchs in der SI-Einheit [W]. Neben der Leistungsbedarfserfassung auf Aggregatsebene erfolgt zudem eine direkte Messung des Gesamtleistungsbedarfs der Werkzeugmaschine am Hauptanschluss (vgl. Tabelle 19, [3.4]).

Tabelle 35: Ermittlung des Leistungsbedarfs nach Verbrauchergruppen innerhalb des Modellversuchs

	Verbrauchergruppe	Ermittlung des Leistungsbedarfs
(1)	Hauptschalter und Steuerung	Indirekt durch Rückrechnung
(2)	Hydraulik	Direkte Messung
(3)	Kühlung	/
(4)	Absaugung	/
(5)	Beleuchtung	Indirekt durch Rückrechnung
(6)	Ventilation	Indirekt durch Rückrechnung
(7)	Sonst. Nebenaggregate	Direkte Messung
(8)	Späneförderer	Direkte Messung
(9)	Kühlschmiermittel	Direkte Messung
(10)	Achsenantriebe	Direkte Messung
(11)	Spindel	Direkte Messung
(12)	Werkzeug	Direkte Messung
(13)	Materialabtrag	/

Die Datenspeicherung während der Primärdatenmessung erfolgt in dem Microsoft Excel kompatiblen Dateiformat CSV. Die resultierenden Datensätze enthalten dabei folgende Informationen in Bezug auf jeden gemessenen Datenpunkt: Maschinename, Messzeitpunkt (Datum & Uhrzeit), Kennzeichen des Messpunktes, Leistungsbedarf in [W] je direkt vermessene Verbrauchergruppe, Gesamtleistungsbedarf in [W]. Die Speicherung der Daten erfolgt auf einem Computer (Laptop), auf dem die Primärdaten direkt von der Werkzeugmaschine bzw. vom mobilen Messequipment über eine passende Schnittstelle übertragen werden. Zudem erfolgt eine doppelte Sicherung dieser Daten auf einer betriebsinternen Cloud (vgl. Tabelle 19, [3.5]).

#### **[4] Leistungsmesskampagne**

Die Leistungsmesskampagne wurde entsprechend des zuvor vorgestellten Messplans und den darin enthaltenen Festlegungen am 23.09.2020 an der Werkzeugmaschine Deckel Maho DMC 50H umgesetzt.

Es wurden für die Verbrauchergruppen „Hydraulik“, „Sonst. Nebenaggregate“, „Späneförderer“, „Kühlschmiermittel“, „Achsenantriebe“, „Spindel“ und „Werkzeug“ die Leistungsbedarfsdaten der entsprechenden Aggregate direkt durch eine mobile temporäre Messung erfasst (vgl. Tabelle 20, [4.1]). Es erfolgte keine Datenerhebung über die SPS (vgl. Tabelle 20, [4.2]). Durch den ebenso direkt gemessenen Gesamtleistungsbedarf der Werkzeugmaschine abzüglich der aggregatsspezifischen Leistungsbedarfsdaten konnte der Leistungsbedarf der Verbrauchergruppen „Hauptschalter und Steuerung“, „Beleuchtung“ sowie „Ventilation“ in Form von aggregierten Leistungsbedarfswerten in der zeitlichen Auflösung von 0,5 Sekunden berechnet werden (vgl. Tabelle 20, [4.3]). Die Primärdatensammlung wurde in einer Microsoft Excel Arbeitsmappe mit den entsprechenden Zusatzinformationen entsprechend Schritt [3.5], Tabelle 19, gespeichert.

#### **[5] Leistungskennwerte**

Der Leistungsbedarf der in Tabelle 35 identifizierten Verbrauchergruppen wurde jeweils im 0,5 Sekunden Takt gemessen. Die gespeicherten Rohdaten werden wie folgt weiterbearbeitet:

- Gruppierung der Leistungsbedarfswerte nach den durchlaufenen Betriebszuständen;
- Ableitung der zugehörigen Messdauer;
- Mittelwertbildung des Leistungsbedarfs der jeweiligen Verbrauchergruppen innerhalb der einzelnen Betriebszustände;
- Identifizierung und Bereinigung des aufbereiteten Datensatzes von Ausreißern (z. B. negative mittlere Gesamtleistungskennwerte);
- Ermittlung der Anzahl der validen Durchläufe pro Betriebszustand;
- Ermittlung der gesamten Messdauer pro Betriebszustand im Hinblick auf die als valide eingestufteten Messdurchläufe;
- Berechnung der PKV pro Betriebszustand als Gesamtmittelwert der PKV der Verbrauchergruppen innerhalb eines Betriebszustandes.

Tabelle 36 zeigt die Ergebnisse der Datenaufbereitung (vgl. Tabelle 23, [5.1] und [5.2]).

Tabelle 36: Ermittelte PKV je Verbrauchergruppe und Betriebszustand innerhalb des Modellversuchs inkl. Ausweisung der jeweiligen Messdauer und der Anzahl valider Durchläufe

Deckel Maho DCM 50H (DECKEL MAHO GmbH, 2001); spez. Zerspanungsprozess: Zylinderboden, Luftschnitt										
Betriebszustand	Messdauer Gesamt [hh:mm:ss]	Anzahl valider Durchläufe	Leistungskennwerte je Verbrauchergruppe AM in [W]							Leistungskennwerte je Betriebszustand AM in [W]
			Hauptschalter, Steuerung; Beleuchtung; Ventilation	Hydraulik	Sonst. Nebenaggregate	Späneförderer	Kühlschmiermittel	Achsenantriebe	Spindel; Werkzeug	
A <sub>Air</sub>	00:19:18	3	834,7	553,3	464,7	291,6	150,5	1805,5	255,70	4.355,9 <sup>2</sup>
B	00:19:18	5	485,1	199,8	412,0	94,5	0,0	174,9	0,0	1.366,3
C	00:23:29	9	377,3	483,7	481,1	302,4	0,0	518,5	0,0	2.163,1
F	00:57:30	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G	00:20:38	6	557,8	0,0	444,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1.002,0
Zuordnung <sup>1</sup>			(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(V)	

<sup>1</sup> Zuordnung zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (K)“ und „variable Verbrauchergruppe (V)“

<sup>2</sup> Innerhalb der Messkampagne wurde zudem der PKV für den Zerspanungsprozess zur Fertigung des Zylinderbodens aus Edelstahl zum Vergleich mit dem PKV für den Luftschnitt für den Betriebszustand A ermittelt: PKV für A = 4.509,8 W. Der mittlere Leistungsbedarf des Betriebszustands A für das Spanen von Edelstahl liegt somit ca. 3 % über dem Leistungsbedarf für den Luftschnitt.

Zur Berechnung des Gesamtenergiebedarfs des durchlaufenen Betriebszyklus ( $TED_{M,BZ}$ ) wird die Formel 4 aus Kapitel 4.3 zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 23, [5.3]):

$$\begin{aligned}
 TED_{M,BZ} &= \left( \sum_{i=0} P_{A_{Air}} t_{A_{Air}} + \sum_{j=0} P_B t_B + \sum_{k=0} P_C t_C + \sum_{n=0} P_F t_F + \sum_{o=0} P_G t_G \right) \frac{1}{3600} \\
 &= (4.355,9 \text{ W} * 1.158 \text{ s} + 1.366,3 \text{ W} * 1.158 \text{ s} + 2.163,1 \text{ W} * 1.409 \text{ s} + 0,0 \\
 &\quad * 3.450 \text{ s} + 1.002,0 * 1.238 \text{ s}) * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 10.913.936,7 \text{ Ws} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \\
 &= 3.031,6 \text{ Wh} = 3,0 \text{ kWh}
 \end{aligned} \quad (11)$$

Hierbei sei zur Vollständigkeit anzumerken, dass ein  $TED_p$  basierend auf den Zeitanteilen des durchlaufenen Betriebszyklus aufgrund der langen Perioden innerhalb der unproduktiven Betriebszustände innerhalb der Messkampagne als nicht repräsentativ für den Zerspanungsvorgang des Zylinderbodens auf der Werkzeugmaschine Deckel Maho DMC 50H bewertet werden kann. Der Modellversuch hat grundsätzlich das Ziel, die Validität und die methodische Richtigkeit des systematischen Verfahrensansatzes zu prüfen. Zur Einordnung der Höhe eines möglichen repräsentativen  $TED_p$ , der Energiebedarfsanteile sowie der später daraus ableitbaren THG-Emissionen der unterschiedlichen Verbrauchergruppen soll daher ein Fallbeispiel aufgespannt werden. Da in der Prozesslernfabrik CiP am Standort Lichtwiese der TU Darmstadt keine Serienproduktion durchgeführt wird, sind keine realen Hintergrunddaten bzgl. bspw. der Betriebstage, der Zeitanteile der Betriebszustände o. ä. bekannt. Daher wird ein fiktives Fallbeispiel vorgestellt, innerhalb welchem eine Shopfloor-Produktion an 220 Betriebstagen/Jahr bei einem Einschichtbetrieb zu acht Stunden durchgeführt wird. Die Jahresproduktion an Zerspanungsprodukten (Zylinderböden) beträgt 13.000 Stück.

Die Hintergrundinformationen sowie die Berechnung eines repräsentativen  $TED_P$  für das zugrunde liegende fiktive Fallbeispiel sind in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Fiktives Fallbeispiel zur Berechnung eines repräsentativen  $TED_P$  basierend auf den PKV der Deckel Maho DCM 50H

- Shopfloor-Produktion an 220 Tagen/Jahr			
- Einschichtbetrieb (8-h-Schicht)			
- 16 h (= 2/3 eines Tages) ist die Werkzeugmaschine an Produktionstagen grundsätzlich ausgeschaltet sowie an 365-220=145 Tagen im Jahr			
- Die Jahresproduktion beträgt 13.000 Zylinderböden (Ausschussquote: 0 %)			
- Dauer des Betriebszustandes „Bearbeitung“ (A): 386 s			
- Dauer des Betriebszustandes „Aufwärmen“ (B): 232 s			
- Während der operativen Zeiten werden die Zeitanteile für die Betriebszustände A und B auf Basis der Informationen aus der durchgeführten Messkampagne abgeleitet. Die Zeitanteile für die Betriebszustände ohne fixe Programmdauer werden angenommen (C:F:G=2:1:1).			
- Die PKV pro Verbrauchergruppe und Betriebszustand sind Tabelle 36 zu entnehmen.			
Zeitanteile je Betriebszustand (pro 8-h-Schicht) [%]		Berechnung des Anteils der Betriebszustände am Betriebsjahr	Prozentualer Anteil der Betriebszustände am Betriebsjahr [%]
A <sub>Air</sub>	79	$1/3 * 0,79 * 220/365 = 0,1587$	15,9
B	1	$1/3 * 0,01 * 220/365 = 0,0020$	0,2
C	10	$1/3 * 0,1 * 220/365 = 0,0201$	2,0
F	5	$(2/3 + 1/3*0,05) * 220/365 + 145/365 = 0,8091$	80,9
G	5	$1/3 * 0,05 * 220/365 = 0,0100$	1,0
- Für das fiktive Fallbeispiel lässt sich ein $TED_{M_{FB}}$ für des Betriebsjahr sowie ein repräsentativer $TED_{P_{FB}}$ für den Zerspanungsvorgang eines Zylinderbodens auf Basis der in Tabelle 36 ausgewiesenen PKV berechnen zu:			
$TED_{M_{FB}} = 365 * 24 * (P_{A_{Air}} * 0,1587 + P_B * 0,0020 + P_C * 0,0201 + P_F * 0,8091 + P_G * 0,0100)$ $= \frac{365 * 24}{13.000} (4.355,9 * 0,1587 + 1.366,3 * 0,0020 + 2.163,1 * 0,0201 + 0,0 * 0,8091 + 1.002,0 * 0,0100) = 6.559.893,31 \text{ Wh} = 6.559,89 \text{ kWh (pro Betriebsjahr)}$			
$TED_{P_{FB}} = \frac{365 * 24}{z} (P_{A_{Air}} * 0,1587 + P_B * 0,0020 + P_C * 0,0201 + P_F * 0,8091 + P_G * 0,0100)$ $= \frac{365 * 24}{13.000} (4.355,9 * 0,1587 + 1.366,3 * 0,0020 + 2.163,1 * 0,0201 + 0,0 * 0,8091 + 1.002,0 * 0,0100) = 504,61 \text{ Wh} = 0,50 \text{ kWh (pro Zylinderboden)}$			

Innerhalb eines Kontrollschritts werden zudem die Abweichungen des berechneten  $TED_M$  bzw. den Energiebedarfen auf Betriebszustandsebene gegenüber den realen Energiebedarfswerten untersucht. Entsprechend dem Vorgehen aus Kapitel 4.4 werden diese Unsicherheiten des methodischen Vorgehens mittels der zwei Fehlerberechnungsvarianten relative Messabweichung (vgl. Kapitel 4.4, Formel 6) sowie NRMSE (vgl. Kapitel 4.4, Formel 7) bestimmt. Die Fehlerausweisung der berechneten Energiebedarfswerte in Bezug auf die unterschiedlichen Betriebszustände sowie auf den Gesamtenergiebedarf im Vergleich zu den entsprechenden gemessenen Realwerten der Werkzeugmaschine ist in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Fehlerausweisung im Modellversuch mittels der relativen Messabweichung und dem NRMSE

Betriebs- zustand	Gesamtenergiebedarf der Zerspanungsmaschine [Ws]		relative Messabweichung [%]	n	y <sub>max</sub> [W]	y <sub>min</sub> [W]	NRMSE
	y <sub>i</sub> (Berechnung) <sup>1</sup>	ŷ <sub>i</sub> (Messung)					
<b>A<sub>Air</sub></b>	5.044.105	5.048.043	<b>- 0,078</b>	2318	51.653	- 38.962	<b>0,00002</b>
<b>B</b>	1.581.157	1.586.521	<b>- 0,319</b>	2.315	3.568	0	<b>0,00061</b>
<b>C</b>	3.047.866	3.046.678	<b>0,039</b>	2.818	3.615	920	<b>0,00016</b>
<b>F</b>	0	0	<b>0,0</b>	6.203	0	0	-
<b>G</b>	1.240.509	1.181.495	<b>4,995</b>	2.484	1.162	0	<b>0,02045</b>
<b>Gesamt</b>	10.913.937	10.862.736	<b>0,471</b>	16.138	51.081	- 35.587	<b>0,00003</b>

<sup>1</sup> y<sub>i</sub> entspricht dem berechneten Energiebedarf der Zerspanungsmaschine für die Betriebszustände A<sub>Air</sub>, B, C, F oder G bzw. dem Gesamtenergiebedarf nach dem EEMA für den durchlaufenen Betriebszyklus, TED<sub>M</sub>.

Für den Gesamtenergiebedarf des untersuchten Betriebszyklus der Zerspanungsmaschine kann so eine relative Messabweichung von 0,471 % sowie ein NRMSE von 0,00003 berechnet werden (vgl. Tabelle 23, [5.4]).

## [6] THG-Emissionen

Zur Bestimmung der mit dem Zerspanungsprozess verbundenen THG-Emissionen müssen zunächst passende Lebenszyklusdaten für das bezogene Stromprodukt gewählt werden. Die Prozesslernfabrik CiP am Standort Lichtwiese der TU Darmstadt bezieht ihren Strom extern vom Stromnetz. Da hierbei weder spezifische Informationen bzgl. des bezogenen Stromprodukts noch bzgl. repräsentativer Lebenszyklusdaten vorliegen, muss ein passender EF aus einer anerkannten Datenbank zur Berechnung der THG-Emissionen ausgewählt werden.

Nach den Anforderungen der DIN EN ISO 14067:2019 muss der ausgewählte EF alle THG-Emissionen über den gesamten Produktlebensweg berücksichtigen inkl. der Aufwendungen für Erzeugung und Übertragung. Zudem muss der EF und die dadurch repräsentierten Auswirkungen auf die Klimaänderung auf den vom IPCC veröffentlichten GWP 100a fußen. Die zugrunde liegenden Lebenszyklusdaten müssen des Weiteren die Gegebenheiten der zugehörigen Region, in welcher der Strombezug aus dem jeweiligen Netz erfolgt, repräsentieren. Aus der bereits in Tabelle 25 vorgestellten Auswahl an EF aus anerkannten Datenbanken wird auf Basis der zuvor angeführten Anforderungen der EF von ecoinvent (2021c) für alle THG gewählt (0,516 kg CO<sub>2</sub>Äq / kWh). Dieser repräsentiert den deutschen Strommix und berücksichtigt die THG-Anteile, die einerseits aus der Erzeugung des Stroms (Niederspannung) resultieren (Scope-2-Emissionen nach WRI und WBCSD 2004) und die andererseits mit den Übertragungs- und Verteilungsverlusten einhergehen (Scope 3 Emissionen nach WRI und WBCSD 2004). Die Modellierung des EF erfolgte innerhalb der kommerziellen Datenbank ecoinvent (v3.8) auf Basis des Systemmodells „allocation, cut-off“, die Wirkungsabschätzung mittels der Vorgaben des IPCC 2013 AR5 Report (GWP 100a) (vgl. Tabelle 26, [6.1]).

Die THG-Emissionen können nun in Bezug auf verschiedene Betrachtungsebenen und zeitliche Bezugsrahmen durch die Multiplikation des jeweiligen Energiebedarfs mit dem ausgewählten EF berechnet werden. Nachfolgend werden einzelne Ausweisungsmöglichkeiten beispielhaft aufgelistet (vgl. Tabelle 26, [6.2]):

- THG-Emissionen des Gesamtenergiebedarfs der Deckel Maho DCM 50H innerhalb der Messkampagne bzw. des durchlaufenen Betriebszyklus (TED<sub>M, BZ</sub>):

$$THGE_{TED_{MBZ}} = TED_{MBZ} * EF = 3,0 \text{ kWh} * 0,516 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q}}{\text{kWh}} = 1,548 \text{ kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q} \quad (12)$$

- THG-Emissionen des in Tabelle 37 berechneten und für das fiktive Fallbeispiel repräsentativen  $TED_{P\_FB}$ :

$$THGE_{TED_{PFB}} = TED_{PFB} * EF = 0,50 \text{ kWh} * 0,516 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q}}{\text{kWh}} = 0,260 \text{ kg CO}_2\ddot{\text{A}}\text{q} \quad (13)$$

- Spezifische THG-Emissionen der für das fiktive Fallbeispiel relevanten Betriebszustände unter Berücksichtigung des zeitlichen Bezugsrahmens von einem Betriebsjahr (Tabelle 37) sowie der gesamten THG-Emissionen, nachfolgend dargestellt in Tabelle 39.

Tabelle 39: Disaggregierte THG-Emissionen des fiktiven Fallbeispiels nach Betriebszuständen

Betriebszustand	Prozentualer Anteil am Betriebsjahr [%]	Leistungskennwerte je Betriebszustand [W]	THGE <sup>1</sup> pro Betriebsjahr [kg CO <sub>2</sub> Äq]
A <sub>Air</sub>	15,9	4.355,9	3.132,9
B	0,2	1.366,3	10,0
C	2,0	2.163,1	196,4
F	80,9	0	0
G	1,0	1.002,0	45,5
<b>Gesamt</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>3.384,9</b>

<sup>1</sup> Die Berechnung der THGE erfolgt durch die Formel  $THGE = 365 * 24 * \text{Zeitanteil am Betriebsjahr} * \text{PKV je Betriebszustand} * EF$ .

- Spezifische THG-Emissionen der für das fiktive Fallbeispiel relevanten Verbrauchergruppen unter Berücksichtigung des zeitlichen Bezugsrahmens von einem Betriebsjahr (Tabelle 37) und der berechneten PKV der Deckel Maho DCM 50H (Tabelle 36), nachfolgend dargestellt in Tabelle 40.

Tabelle 40: Disaggregierte THG-Emissionen des fiktiven Fallbeispiels nach Verbrauchergruppen

Betriebszustand Anteil der Betriebszustände	Prozentualer Anteil am Betriebsjahr [%]	THGE <sup>1</sup> pro Verbrauchergruppe und Betriebszustand [kg CO <sub>2</sub> Äq]						
		Hauptschalter, Steuerung; Beleuchtung; Ventilation	Hydraulik	Sonst. Nebenaggregate	Späneförderer	Kühlschmiermittel	Achsenantriebe	Spindel; Werkzeug
Zuordnung <sup>2</sup>		(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(V)
A <sub>Air</sub>	15,9	600,3	397,9	334,2	209,8	108,2	1.298,6	183,9
B	0,2	3,5	1,5	3,0	0,7	0	1,3	0
C	2,0	34,3	43,9	43,7	27,5	0	47,1	0
F	80,9	0	0	0	0	0	0	0
G	1,0	25,3	0	20,2	0	0	0	0
<b>THGE pro Betriebsjahr [kg CO<sub>2</sub>Äq]</b>		<b>663,5</b>	<b>443,3</b>	<b>401,1</b>	<b>237,9</b>	<b>108,2</b>	<b>1.347,0</b>	<b>183,9</b>

<sup>1</sup>  $THGE = 365 * 24 * \text{Zeitanteil am Betriebsjahr} * \text{PKV je Verbrauchergruppe} * EF$ .

<sup>2</sup> Zuordnung zu den Kategorien „konstante Verbrauchergruppe (K)“ und „variable Verbrauchergruppe (V)“.

## [7] Ergebnisauswertung

Die Auswertung von Einzelwerten wie bspw. dem  $TED_{M\_BZ}$  innerhalb des durchlaufenen Betriebszyklus bzw. der Messkampagne oder dem  $TED_{P\_FB}$  des fiktiven Fallbeispiels, weist Grenzen hinsichtlich einer tiefergehenden Analyse auf. Daher soll die disaggregierte Untersuchung der THG-Emissionen auf Ebene der Betriebszustände und der Verbrauchergruppen des fiktiven Fallbeispiels im Rahmen

- einer Beitrags- und Einflussanalyse,
- einer Sensitivitätsprüfung sowie
- der Prüfung der Datenqualität

zur Beurteilung der eigenen Ergebnisse im Folgenden zur Identifizierung von Limitationen und der Ableitung von Schlussfolgerungen dienen, aus welchen wiederum Handlungsempfehlungen formuliert werden.

### Beitrags- und Einflussanalyse

Zur Auswertung der berechneten Ergebnisse des fiktiven Fallbeispiels aus Hauptschritt [5] (Tabelle 37) wird jeweils eine Beitrags- bzw. Hotspotanalyse der THG-Emissionen der Betriebszustände sowie der Verbrauchergruppen in Bezug auf die Gesamt-THG-Emissionsmenge durchgeführt (vgl. Hauptschritt [6]). Die jeweiligen Beitrags- bzw. Einflussanalysen sind in Tabelle 41 und Tabelle 42 dargestellt und dienen der Identifizierung der wesentlichen Treiber der THG-Emissionen (Hotspotanalyse).

Die Beitragsanalyse auf Ebene der Betriebszustände bzgl. der Gesamt-THG-Emissionsmenge eines Betriebsjahres zeigt die Dominanz des Betriebszustandes  $A_{Air}$  in Bezug auf die Gesamt-THG-Emissionsmenge. Hierbei entfallen 92,5 % auf den genannten Betriebszustand. Die Betriebszustände B, F und G weisen einen Beitrag von unter 1,5 % auf, der Betriebszustand C hält einen Anteil von 5,8 % (Tabelle 41).

Tabelle 41: Beitrags- und Einflussanalyse des fiktiven Fallbeispiels auf Betriebszustandsebene

Betriebszustand	THGE, absolut [kg CO <sub>2</sub> -Äq]	Anteil an Gesamt-THG-Menge [%]	Einordnung der Anteile an der Gesamt-THG-Emissionsmenge Rangfolge
A   Bearbeitung	3.132,95	92,56	
B   Aufwärmen	10,00	0,30	15 bis 20 %
C   Betriebsbereit	196,45	5,80	10 bis 15 %
F   Aus	0	0	5 bis 10 %
G   Sonstige	45,50	1,34	0 bis 5 %
<b>Gesamt</b>	3.384,89	100	

Innerhalb der Beitragsanalyse auf Ebene der Verbrauchergruppen ist als wesentlicher Treiber der Gesamt-THG-Emissionsmenge eines Betriebsjahres die Verbrauchergruppe Achsenantriebe mit 39,79 % identifizierbar. Zudem weisen die Verbrauchergruppen Hauptschalter und Steuerung, Beleuchtung sowie Ventilation einen relevanten Einfluss von 19,60 % auf. Ein gewisser Einfluss entsteht durch die Verbrauchergruppe Hydraulik mit 13,10 %. Ein geringer Einfluss kommt durch die Verbrauchergruppen sonst. Nebenaggregate mit 11,85 %, Späneförderer mit 7,03 % und den variablen Verbrauchergruppen Spindel und Werkzeug mit 5,43 % zustande. Die Verbrauchergruppe Kühlschmiermittel hat in dem untersuchten Fallbeispiel mit 3,2 % einen vernachlässigbaren Einfluss (Tabelle 42).

Tabelle 42: Beitrags- und Einflussanalyse des fiktiven Fallbeispiels auf Verbrauchergruppenebene

Verbrauchergruppe		THGE, absolut [kg CO <sub>2</sub> -Äq]	Anteil an Gesamt-THG-Menge [%]
Hauptschalter, Steuerung; Beleuchtung; Ventilation	(k)	663,47	19,60
Hydraulik	(k)	443,33	13,10
Sonst. Nebenaggregate	(k)	401,08	11,85
Späneförderer	(k)	237,91	7,03
Kühlschmiermittel	(k)	108,22	3,20
Achsantriebe	(k)	1.347,97	39,79
Spindel; Werkzeug	(v)	183,91	5,43
<b>Gesamt</b>		<b>3.384,89</b>	<b>100</b>

**Einordnung der Anteile an der Gesamt-THG-Emissionsmenge Rangfolge**

- > 20 %
- 15 bis 20 %
- 10 bis 15 %
- 5 bis 10 %
- 0 bis 5 %

Um zusätzlich noch die Frage zu beantworten, welchen Einfluss die Verbrauchergruppen innerhalb der unterschiedlichen Betriebszustände auf die Gesamt-THG-Emissionsmengen haben, zeigt Tabelle 43 eine kombinierte Einflussanalyse auf Ebene der Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände des fiktiven Fallbeispiels.

Hier bestätigen sich die wesentlichen Treiber auf Ebene der Betriebszustände (Betriebszustand A) und auf Ebene der Verbrauchergruppen (Achsantriebe sowie Hauptschalter und Steuerung, Beleuchtung, Ventilation). Es ist aber darüber hinaus klar ersichtlich, welche Verbrauchergruppen auf Ebene der Betriebszustände den THG-Beitrag bestimmen und welchen Anteil sie jeweils in Bezug auf die Gesamt-THG-Emissionsmenge halten. Besonders hervorzuheben sind hier wiederum die Achsantriebe, die alleine im Betriebszustand A<sub>Air</sub> 38,36 % der Gesamt-THG-Emissionsmenge verantworten. Zudem kann festgehalten werden, dass die variablen Anteile in Form der Verbrauchergruppen Spindel und Werkzeug nur 5,43 % an der Gesamt-THG-Emissionsmenge halten (s. Tabelle 29, [7.1]).

Tabelle 43: Einflussanalyse des fiktiven Fallbeispiels auf Verbrauchergruppenebene in Abhängigkeit der Betriebszustände

Betriebszustand	Anteil der Betriebszustände am Betriebsjahr [%]	THGE pro Verbrauchergruppe und Betriebszustand [%]						
		Hauptschalter, Steuerung; Beleuchtung; Ventilation	Hydraulik	Sonst. Nebenaggregate	Späneförderer	Kühlschmiermittel	Achsantriebe	Spindel; Werkzeug
		(k)	(k)	(k)	(k)	(k)	(k)	(v)
A <sub>Air</sub>	15,9	17,74	11,76	9,87	6,20	3,20	38,36	5,43
B	0,2	0,10	0,04	0,09	0,02	0	0,04	0
C	2,0	1,01	1,30	1,29	0,81	0	1,39	0
F	80,9	0	0	0	0	0	0	0
G	1,0	0,75	0	0,60	0	0	0	0
<b>Anteil an Gesamt-THG-Menge [%]</b>		<b>19,60</b>	<b>13,10</b>	<b>11,85</b>	<b>7,03</b>	<b>3,20</b>	<b>39,79</b>	<b>5,43</b>

**Einordnung der Anteile an der Gesamt-THG-Emissionsmenge Rangfolge**

- > 20 %
- 15 bis 20 %
- 10 bis 15 %
- 5 bis 10 %
- 0 bis 5 %

Zu berücksichtigen ist allerdings hierbei, dass die Ergebnisse immer im Kontext der zugrunde liegenden Rahmenbedingungen interpretiert werden müssen. Im Falle des fiktiven Fallbeispiels dominiert die Betriebsphase A die Produktionstage. Erfolgt bspw. eine Veränderung der Maschinenauslastung (Erhöhung oder Verringerung der Zeitanteile, in welchen die Werkzeugmaschine Produkte fertigt und im Betriebszustand A ist) oder der jährlichen Betriebszeit (Änderung der Betriebszeiten von einer auf zwei 8-h-Schichten pro Produktionstag), verändert dies die ausgestoßene Gesamt-THG-Emissionsmenge. Um den Einfluss der Maschinenauslastung als sensibler Parameter auf das Gesamtergebnis zu prüfen, wird daher eine Sensitivitätsprüfung durchgeführt.



Sensitivitätsprüfung: Maschinenauslastung

Die Maschinenauslastung wurde im vorangegangenen Abschnitt als sensibler Parameter identifiziert. Im untersuchten Fallbeispiel (s. Tabelle 37) wird die Maschinenauslastung durch die produzierte Anzahl an Produkten (Zylinderböden) bestimmt und mit 13.000 Teilen pro Jahr angenommen. Die Jahresproduktion soll um 3.000 Teile nach oben und nach unten variiert werden ( $\pm 23\%$  der jährlich produzierten Stückzahl), um dadurch den Einfluss auf die THG-Emissionen bemessen zu können. Abbildung 23 zeigt die berechneten Ergebnisse innerhalb der Sensitivitätsprüfung.

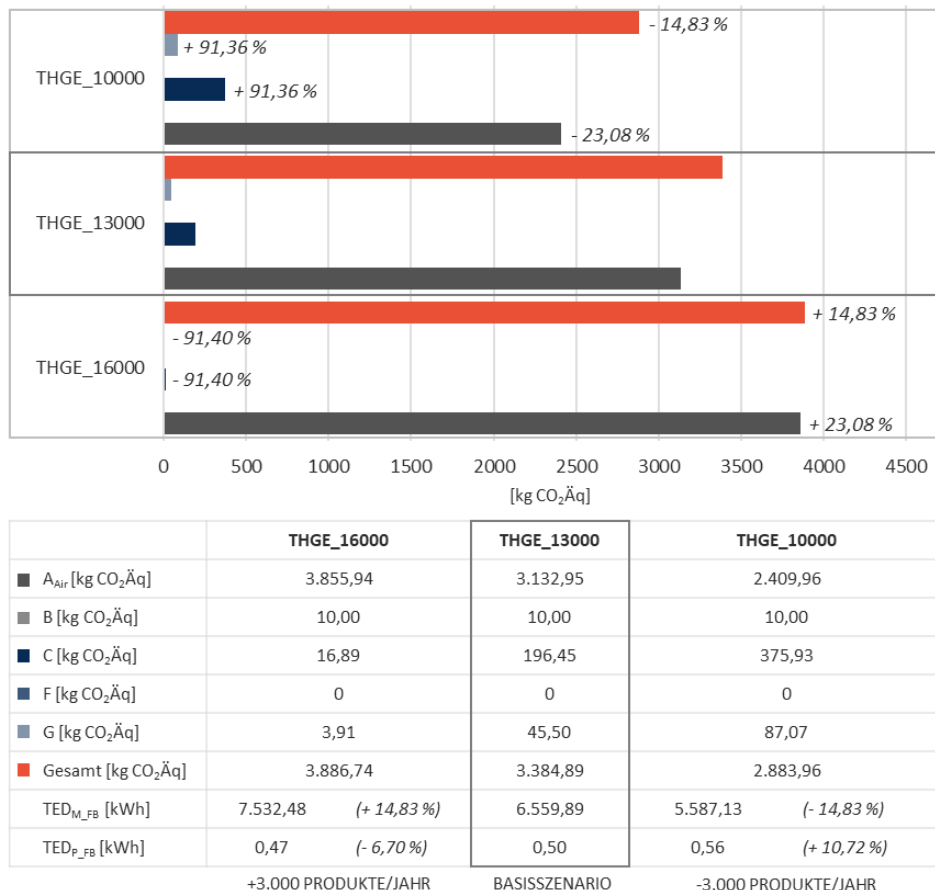


Abbildung 23: Ergebnisse der Sensitivitätsprüfung zur Maschinenauslastung bzw. zur jährlich produzierten Stückzahl (eigene Darstellung)

Hierbei wird das Basisszenario (fiktives Fallbeispiel aus Tabelle 37 mit einer Maschinenauslastung von 79 % und einer produzierten Stückzahl von 13.000 Teilen pro Jahr) den Szenarien „THGE\_10000“ (fiktives Fallbeispiel aus Tabelle 37 mit einer Maschinenauslastung von 61 % und einer produzierten Stückzahl von 10.000 Teilen pro Jahr) sowie „THGE\_16000“ (fiktives Fallbeispiel aus Tabelle 37 mit einer Maschinenauslastung von 97 % und einer produzierten Stückzahl von 16.000 Teilen pro Jahr) gegenüber gestellt (Abbildung 23). Bzgl. der Gesamt-THG-Emissionsmenge lässt sich durch die Variation der produzierten Stückzahl eine Zunahme von 14,83 % bei Erhöhung der Maschinenauslastung feststellen und eine Abnahme von 14,83 % bei deren Verringerung. Dies bedingt sich maßgeblich durch den Betriebszustand A<sub>Air</sub> der zu einer Steigerung der THG-Emissionen innerhalb des THGE\_16000 von 23,08 % führt bzw. zu einer Reduktion von 23,08 % innerhalb des THGE\_10000. Die Veränderung der Maschinenauslastung bzw. produzierten Stückzahl hat einen direkten Einfluss auf die THG-Beiträge der unproduktiven Betriebszustände. Bei der Erhöhung der Produktionsrate verringern sich die Beiträge der Betriebszustände C und G um jeweils 91,40 %, bei der Verringerung

erhöhen sich diese um 91,36 %. Da der Betriebszustand B programmbedingt seine festen Aufwärmperiode hat und die Maschine unabhängig von der Produktionsrate an jedem Produktionstag einmal anfährt, ändern sich die diesbezüglichen THG-Beiträge in Abhängigkeit der unterschiedlichen Szenarien nicht. Während sich der  $TED_{M\_FB}$  im THGE\_16000 um 14,83 % gegenüber dem Basisszenario erhöht, verringert sich der  $TED_{P\_FB}$  um 6,70 %. Im THGE\_10000 hingegen fällt der  $TED_{M\_FB}$  um 14,83 % gegenüber dem Basisszenario und der  $TED_{P\_FB}$  steigt um 10,72 % (s. Tabelle 29, [7.2]).

### Datenqualitätsprüfung

Zur Kontrolle der Datenqualität innerhalb des Modellversuchs wird das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren aus Kapitel 5.3.2 herangezogen. Das erarbeitete Prüfverfahren ist anzuwenden, wenn die für die THG-Bilanzierung angenommenen Betriebsintervalle oder die Maschinenauslastung nicht anhand von realen Produktionsdaten festgelegt werden konnten. Bei dem vorgestellten fiktiven Fallbeispiel ist dies, wie vorher erläutert, der Fall. Tabelle 44 fasst die Ergebnisse der qualitativen Datenqualitätsprüfung zusammen.

Tabelle 44: Abfrage zur qualitativen Prüfung der Datenqualität innerhalb des Modellversuchs

QUALITÄTSGRAD + <-----> -							Handlungsbedarf <sup>1</sup>
<b>Datenvollständigkeit</b>							
- Verbrauchergruppen	Alle disaggregiert	-	Teilweise aggregiert	x	Aggregiert	-	N
- Betriebszustände	Alle	x	Ausgewählte	-	Einer	-	N
- Betriebsintervalle	Alle gemessen	x	Messwerte und Schätzungen	-	Schätzung	-	N
<b>Datenquellen und -genauigkeit</b>							
- Leistungskennwerte	Primärdaten (z. B. Messung)	x	Sekundärdaten (z. B. Literatur/Datenbank)	-	Schätzwert	-	N
- Programmbed. Betriebsintervalle	Primärdaten (z. B. Messung)	x	Sekundärdaten (z. B. Literatur/Datenbank)	-	Schätzwert	-	N
- Bestimmung der Abweichung	Für alle Werte	x	Für einzelne Werte	-	Nicht bestimmt	-	N
<b>Datenaktualität</b>							
- Leistungs-/Energiedaten	≤ 1 Jahr	-	> 1 Jahr ≤ 3 Jahre	x	> 3 Jahre	-	N
- EF	≤ 1 Jahr	x	> 1 Jahr ≤ 3 Jahre	-	> 3 Jahre	-	N
- Zeitintervall der Datensammlung	Kurz (z. B. ≤ ein Tag)	x	Mäßig (z. B. > 1 Tag ≤ 5 Tage)	-	Lang (z. B. > 5 Tage)	-	N
<b>Datenrepräsentativität</b>							
- Lebenszyklusdaten / EF <sup>2</sup>	Option 1 bis 3	-	Option 4	-	Option 5	x	J
- Spezifität, Maschine	Prozess auf Maschine A	x	Ähnlicher Prozess auf Maschine A	-	Gleicher/ähnlicher Prozess auf Maschine B	-	N
- Maschinenauslastung	Primärdaten	-	Produktionsplan	-	Schätzwert	x	J
- Zeitlicher Gültigkeitsbereich	Repräsentativ	x	-	-	Nicht repräsentativ	-	N

x: zutreffend; -: nichtzutreffend; J: Ja; N: Nein

<sup>1</sup> Falls ein Handlungsbedarf zur Erhöhung der Datenqualität identifiziert wurde, ist dieser genauer zu beschreiben.

<sup>2</sup> Definition der Optionen entsprechend Tabelle 24.

Mittels der Prüfung der Datenqualität wurde für das zugrunde liegende fiktive Fallbeispiel ein Handlungsbedarf hinsichtlich der (i) Lebenszyklusdaten/EF sowie der angesetzten (ii) Maschinenauslastung identifiziert. Diese werden nachfolgend beschrieben:

- (i) Da innerhalb des Modellversuchs keine spezifischen Informationen bzgl. dem verwendeten Stromprodukt und infolgedessen keine spezifischen Lebenszyklusdaten vorlagen, wurde

ein passender EF aus der Datenbank ecoinvent v3.8 zur Berechnung der THG-Emissionen herangezogen. Da hierdurch der unternehmensspezifische Strombezug nicht genau abgebildet werden kann, sollte die Datenlage hinsichtlich spezifischer Lebenszyklusdaten für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand nachgebessert werden. Da der Strombezug in der Prozesslernfabrik CiP von einem externen Anbieter erfolgt, sollten mindestens vom Erzeuger bereitgestellte EF und/oder lieferantenspezifische Lebenszyklusdaten (vgl. Tabelle 24, Optionen 2 und 3) zur Abbildung des Strombezugs innerhalb weiterer THG-Bilanzen verwendet werden.

- (ii) Durch den Modellversuch wurden Primärdaten an der Werkzeugmaschine Deckel Maho DCM 50H erhoben und in die PKV überführt. Da die Prozesslernfabrik CiP den Charakter einer Lernfabrik hat und dadurch keine regelmäßige Produktion stattfindet, wurden diese Leistungskennwerte in ein fiktives Fallbeispiel integriert, welches ein reales Produktionsszenario abbilden soll. Zur Herleitung dieses Produktionsszenarios wurden u. a. Annahmen hinsichtlich der Maschinenauslastung getroffen. Da der Energiebedarf des Zerspanungsprozesses, sowohl hinsichtlich des  $TED_M$  als auch hinsichtlich des  $TED_P$ , genauso wie die damit verbundenen THG-Emissionen sehr stark von diesem sensitiven Parameter abhängen (s. Sensitivitätsprüfung), sollte die Maschinenauslastung für Unternehmensbilanzen möglichst spezifisch anhand von Realdaten oder mindestens Produktionsplanungs- sowie Produktionssteuerungskenndaten festgelegt werden (s. Tabelle 29, [7.2]).

### Ergebnisauswertung

Für die endgültige Ergebnisauswertung erfolgen nun die nachfolgenden Schritte (1) Beurteilung der eigenen Ergebnisse, als Grundlage für Schritt (2) Dokumentation der Limitationen und Schlussfolgerungen sowie Schritt (3) Ableitung von Handlungsempfehlungen.

#### (1) Beurteilung der eigenen Ergebnisse

Auf Basis des in Hauptschritt [5] durchgeführten Kontrollschrittes konnte die Validität der LCI-Ergebnisse für den Inputfluss „Strom“ abgeleitet werden. Die geringe berechnete Abweichung des berechneten  $TED_M$  auf Betriebszustandsebene gegenüber den realen Energiebedarfswerten in Form der relativen Messabweichung und des NRMSE zeigt die hohe Modellierungsgenauigkeit. Diese bedingt wiederum nachhaltig die Güte der daraus abgeleiteten LCIA-Ergebnisse, welche durch die Verrechnung der LCI-Daten mit einem Charakterisierungsfaktor in Form des in Hauptschritt [6] gewählten EF bestimmt wurden. Allerdings ist hier die Wahl des EF kritisch zu beurteilen. Dieser generische Wert wurde aus der LCA-Datenbank ecoinvent (v3.8) entnommen und bildet den tatsächlichen Strombezug der CiP Lernfabrik am Standort Lichtwiese nur ungenau ab. Die ermittelten LCIA-Ergebnisse für den Standort innerhalb des fiktiven Fallbeispiels weisen daher die gleichen Schwächen auf. Zudem ist die Aussagegüte der Ergebnisse für den Standort ebenfalls limitiert, da diese auf Basis von Annahmen (z. B. Maschinenauslastung) getroffen wurden, die für das Aufspannen des fiktiven Fallbeispiels festgelegt wurden.

#### (2) Dokumentation der Limitationen und Schlussfolgerungen

Als wichtige Limitation der Ergebnisse ist zu benennen, dass die Ergebnisse des Modellversuchs zwar auf primärdatenbasierten PKV beruhen, diese aber in ein fiktives Produktionsszenario integriert wurden. Dieses fiktive Produktionsszenario basiert auf unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Produktionstage, dem Schichtbetrieb, der Maschinenauslastung und damit verbunden der Jahresproduktion, der zeitlichen Aufteilung der unproduktiven Betriebszustände sowie des

verwendeten EF. Dieser Umstand begründet, dass nachfolgende Empfehlungen als erste Tendenz verstanden und hinsichtlich ihrer tatsächlichen Wirkung im realen Produktionsfeld vor einer festen Implementierung geprüft werden müssen.

Darüber hinaus können zusammenfassend nachfolgende Schlussfolgerungen auf Basis der Beitrags- und Einflussanalyse, der Sensitivitätsprüfung sowie der Datenqualitätsprüfung getroffen werden.

Mittels der Beitrags- bzw. Einflussanalyse konnte die Dominanz des Betriebszustandes A (93 %) auf die Gesamt-THG-Emissionsmenge innerhalb des zugrunde liegenden Fallbeispiels aufgezeigt werden. Hierbei ist v. a. die konstante Verbrauchergruppe Achsantriebe für einen Großteil der THG-Emissionen verantwortlich (38 % des Betriebszustandes A und 40 % der Gesamt-THG-Emissionsmenge). Daneben tragen direkt die konstanten Verbrauchergruppen Hauptschalter und Steuerung; Beleuchtung; Ventilation mit 20 % zu den Gesamt-THG-Emissionen bei. Der durch die variablen Verbrauchergruppen (Spindel; Werkzeug) bedingte Anteil an den Gesamt-THG-Emissionen liegt bei lediglich 5 % trotz der relativ hohen Maschinenauslastung von fast 80 %.

Zudem wurde die Sensitivität der berechneten Ergebnisse auf Basis der PKV der Deckel Maho DCM 50H in Verbindung mit den Annahmen des Produktionsszenarios hinsichtlich des sensitiven Parameters Maschinenauslastung geprüft. Bei einer Variation der Maschinenauslastung und infolgedessen der Produktionsrate um ca. 23 % reagiert der  $TED_{M\_FB}$  sowie die Gesamt-THG-Emissionsmenge mit einer Schwankung von  $\pm 15\%$  und der  $TED_{P\_FB}$  mit  $+11\%$  bei einer Verringerung und mit  $-7\%$  bei einer Erhöhung der Maschinenauslastung bzw. Produktionsrate. Damit sind die berechneten Gesamt-THG-Emissionen wesentlich von der zugrunde liegenden Maschinenauslastung abhängig.

Die Datenqualität konnte hinsichtlich der 13 abgefragten Kriterien zu ca. 70 % als sehr gut und zu 15 % als gut bewertet werden. Hinsichtlich der zwei Kriterien Lebenszyklusdaten/EF sowie Maschinenauslastung wurde ein Handlungsbedarf, wie oben beschrieben, aufgrund der geringeren Datenqualität identifiziert. Zur Verbesserung der Datenqualität und damit zur Präzisierung der aus dem Zerspanungsprozess berechneten Emissionsintensität, sollten diese Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Wahl des EF und der Repräsentativität der Maschinenauslastung spätestens vor der nächsten Bilanzierung umgesetzt werden.

### (3) Ableitung von Handlungsempfehlungen

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Ergebnisbeurteilung sowie der Dokumentation der Limitationen und Schlussfolgerungen können nachfolgend zwei grundsätzliche Empfehlungen für das fiktive Fallbeispiel zur Reduzierung der Gesamt-THG-Emissionsmenge abgeleitet werden:

- Erhöhung der Maschinenauslastung innerhalb des fiktiven Produktionsszenarios zur Verringerung von Leerzeiten und zur Reduzierung des spezifischen Carbon Footprint je gefertigtem Produkt;
- Bereinigung der Datenunsicherheiten hinsichtlich der Wahl der Lebenszyklusdaten bzw. des EF des Stromproduktes sowie der Maschinenauslastung zur Steigerung der Robustheit und Aussagegüte der Ergebnisse (s. Tabelle 29, [7.3]).

## 7 Weitere unternehmensinterne Anwendungsmöglichkeiten

Um die Bedeutung des entwickelten EEMA bzw. des darauf aufbauenden systematischen Verfahrensansatzes für das lebenszyklusorientierten Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen für Unternehmen zu unterstreichen, werden weitere Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Methodiken sowie deren Mehrwert in der unternehmerischen Praxis dargestellt. Die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten liegen dabei in den Bereichen der Prozesssteuerung und -optimierung sowie dem Energie- bzw. Umweltmanagement und lassen sich wie folgt benennen:

- Benchmarking und Vergleich des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen auf Basis des EEMA
- Ableitung von Energieeffizienzindikatoren aus dem EEMA
- Integration des systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen in den PDCA-Zyklus eines unternehmensinternen Umweltmanagementsystems

Die aufgeführten Anwendungsmöglichkeiten werden im Folgenden näher erläutert.

### 7.1 Benchmarking und Vergleich des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen

Ein innerbetriebliches **Benchmarking**<sup>65</sup> des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen kann für Unternehmen dann sinnvoll, wenn es bspw. um Vergleichsstudien geht, wie zu der Fragestellung: ist unter gleichen Rahmenbedingungen (z. B. Betriebsdauer, Standort, Maschinenauslastung) der Zerspanungsprozess auf Maschine A oder auf Maschine B energieeffizienter? Derartige Gegenüberstellungen und daraus ableitbare Erkenntnisse können wiederum als Steuerungsgrößen in die Prozessplanung eingegliedert werden, um bspw. innerhalb von Produktionsnetzwerken den energieeffizientesten Produktionspfad zu identifizieren (vgl. Erläuterungen zum Transferprojekt ArePron in Anhang A.2). Eine andere Maßnahme, die aus der Analyse abgeleitet werden könnte, ist die technische Anpassung energieintensiverer Werkzeugmaschinen zur Verbesserung der Energieperformanz (z. B. Einbau von energieeffizienteren Einzelaggregaten, wie Pumpen oder Motoren). In jedem Fall dienen derartige Analysen der Entscheidungsunterstützung. Sie bilden eine wesentliche Grundlage für den Wissensaufbau innerhalb des produktionsintegrierten Umweltschutzes (PIUS) und können dabei helfen, den Carbon Footprint eines Unternehmens nachhaltig zu senken.

Die Kernidee des Benchmarkings ist zu ermitteln, welche Unterschiede zwischen zwei oder mehreren Objekten existieren, wie die Unterschiede zustanden kommen und welche Möglichkeiten es gibt, das Produkt, die Dienstleistung bzw. die Prozesse und Methoden hin zum Bestmöglichen zu verbessern (Wübbenhorst 2020). Jedem Benchmarking-Vorhaben liegt somit ein Vergleich zweier oder mehrerer Objekte zugrunde. Unter Vergleichbarkeit wird hierbei verstanden, dass der Energiebedarf von unterschiedlichen Zerspanungsprozessen bzw. Werkzeugmaschinen sowie die zugrunde liegenden Charakteristiken (PKV pro Verbrauchergruppe und Betriebszustand, Betriebszeit der Werkzeugmaschine je Betriebszustand) so transparent für jedes Vergleichsobjekt dargestellt werden

---

<sup>65</sup> Unter Benchmarking versteht man eine Methode der Wettbewerbsanalyse, welche den „kontinuierlichen Vergleich von Produkten, Dienstleistungen sowie Prozessen und Methoden mit (mehreren) Unternehmen [fokussiert], um die Leistungslücke zum sog. Klassenbesten (Unternehmen, die Prozesse, Methoden etc. hervorragend beherrschen) systematisch zu schließen“ (Wübbenhorst 2020).

(vgl. DWDS n. d.), dass eine vergleichende Gegenüberstellung ermöglicht wird, aus welcher die Ursachen für Abweichungen direkt ableitbar sind.

Nach Kara und Li (2011) haben Gegenüberstellungen des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen, welche durch generische Berechnungsmodelle auf Grundlage empirischer Untersuchungen bestimmt wurden, klare Schwächen. Diese sehen die Autoren v. a. in den signifikanten Unsicherheiten, die durch Parameter wie die getesteten Materialtypen, die Kapazität der Werkzeugmaschine, sowie die Varianz der Prozessparameter entstehen (Kara und Li 2011). Weitere Unsicherheiten liegen bspw. im Festlegen des adäquaten Bezugsrahmens, auf welchem die Berechnung des Energiebedarfs fußt, sowie in der Wahl der Lebenszyklusdaten bzw. EF, insofern ein Vergleich der resultierenden THG-Emissionen von Prozess- oder Maschinenalternativen erfolgen soll. Um derartigen Schwächen zu begegnen und Unsicherheiten möglichst gering zu halten, sollte aus diesem Grund ein Unternehmen bei einem betriebsinternen Benchmarking-Vorhaben des Energiebedarfs und/oder der THG-Emissionen verschiedener Zerspanungsprozesse bzw. Zerspanungsmaschinen nachfolgende Punkte berücksichtigen:

#### (1) Festlegung eines einheitlichen Bezugsrahmens

Ebenso wie bei der Bewertung von unterschiedlichen Prozessalternativen (Reinhardt 2013) ist die richtige Wahl des Bezugsrahmens sowie der Bezugsgröße (FU) bei der Gegenüberstellung unterschiedlicher Zerspanungsprozesse entscheidend. Ein Vergleich verschiedener Zerspanungsprozesse bzw. Zerspanungsmaschinen hinsichtlich des Energiebedarfes oder der THG-Emissionen ist nur möglich, wenn bei der Berechnung der jeweiligen Bedarfs- bzw. Emissionsdaten der gleiche Bezugsrahmen sowie die gleiche Bezugsgröße gewählt wurde. Wird der EEMA nach Kapitel 4.3 bzw. der systematische Verfahrensansatz nach Kapitel 5.3 zur Bestimmung der Bedarfsdaten zugrunde gelegt, ist bei einem Vergleich unterschiedlicher Prozess- oder Maschinenalternativen darauf zu achten,

- dass die gleichen Betriebszustände innerhalb der Bedarfsberechnung berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.2.2),
- dass bei einem Vergleich auf Verbrauchergruppenebene die spezifischen Aggregate der jeweiligen Maschinen konsistent entsprechend der vorgestellten Kategorien (vgl. Kapitel 4.2.1 sowie Kapitel 5.3.1, Hauptschritt [2]) klassifiziert werden,
- dass bei einem Vergleich auf Ebene einer bestimmten Bezugsgröße bzw. einer definierten FU, eine gemeinsame Bezugsgröße bzw. FU bei der Ergebnisgenerierung für alle Alternativen zugrunde gelegt wird,
- dass der gleiche zeitliche Bezugsrahmen für die Ergebnisse gilt (Kapitel 5.3.1, Hauptschritt [1]),
- dass möglichst gleiche technische Voraussetzungen bei der Datengenerierung geschaffen werden (s. nachfolgenden Punkt (2) und (3)),
- dass von der anteilig gleichen Maschinenauslastung und -kapazität innerhalb des zeitlichen Bezugsrahmens ausgegangen wird (s. nachfolgenden Punkt (4)) sowie
- dass bei einem anvisierten Vergleich der mit den unterschiedlichen Zerspanungsprozessen verbundenen THG-Emissionen die Anforderungen nach DIN EN ISO 14067:2019 zu berücksichtigen sind (s. nachfolgenden Punkt (5)).

#### (2) Wahl eines vergleichbaren Zerspanungsprogramms

Auf der Werkzeugmaschine sollte bei der Leistungsmesskampagne möglichst für den Betriebszustand „Bearbeitung“ ein vergleichbares Zerspanungsprogramm ablaufen. Für die Fertigung eines Produktes

gibt es unterschiedliche Maschinenprogrammierungsmöglichkeiten, wie die Werkzeugmaschine die Zerspanungsaufgabe ausführt. Maschinenprogrammierer achten dabei in der Regel auf die Implementierung eines möglichst effizienten Programms (z. B. möglichst kurzer Fahrweg, eine auf das Material, das Werkzeug und die Zerspanungsaufgabe abgestimmte Spindelgeschwindigkeit) (Metternich et al. 2021). Aber auch ein solches effizientes Programm kann für unterschiedliche Werkzeugmaschinen aufgrund der spezifischen Maschinenkonfiguration unterschiedlich ausfallen. Daher ist bei einem innerbetrieblichen Vergleichsvorhaben des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen und/oder Zerspanungsmaschinen und den evtl. damit verbundenen THG-Emissionen darauf zu achten, dass auf allen zu vergleichenden Maschinen ein möglichst ähnliches Bearbeitungsprogramm (Referenzprozess) durchgeführt wird. Jegliche Unterschiede der Bearbeitungsprogramme sind bei einem Vergleichsvorhaben zu beschreiben und zu dokumentieren, da sie zur Erklärung möglicher Abweichungen dienen können.

Die Norm ISO 14955-3:2019 „Machine tools — Environmental evaluation of machine tools, Part 3: Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency“ stellt eine Handlungsanweisung zur Erstellung eines Referenzprozesses zur standardisierten Ermittlung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen zur Verfügung. Ein derartiger Referenzprozess, der auf den zu vergleichenden Werkzeugmaschinen implementiert wird, kann Unternehmen eine valide Gegenüberstellung unterschiedlicher Werkzeugmaschinen ermöglichen.

### (3) Zerspanen im Luftschnitt

Die Werkzeugmaschine sollte während der Bearbeitungsphase im Luftschnitt arbeiten, d. h., dass während der eigentlichen Bearbeitung kein Material zerspannt wird. Bei einem Luftschnitt sind wie auch bei der normalen Zerspanung alle Verbrauchergruppen aktiv; die Energiebedarfswerte liegen dabei sehr nah an den Verbrauchswerten, die durch die Bearbeitung eines realen Werkstücks hervorgerufen werden (Denkena et al. 2020; Diaz et al. 2010). Yoon et al. (2014) beziffern den Unterschied des Energiebedarfs zwischen dem Spanen im Luftschnitt und einem tatsächlichen Spanen von Material zwischen 2 bis 3 % bezogen auf den Betriebszustand „Bearbeitung“. Der Vorteil, den die Berücksichtigung des Luftschnitts bringt, ist, dass es keinen Einfluss auf den Leistungsbedarf durch das zu spanende Material (Art und abgespanntes Volumen) oder die Werkzeugwahl gibt. Bei Vergleichsvorhaben mehrere Zerspanungsprozesse oder -maschinen entfallen also diesbezügliche Unsicherheiten.

### (4) Adäquates Ansetzen der Maschinenauslastung

Die angenommene Kapazität bzw. Auslastung der Werkzeugmaschinen sollte unter anteilig gleicher Berücksichtigung der unterschiedlichen Betriebszustände angesetzt werden. Genaue Zeiträume können unter Umständen wenig aussagekräftig sein, da je nach Maschinenkonfiguration und Maschinenprogrammierung die Betriebszustände unterschiedlich lang ausfallen können. So kann bspw. die Aufwärmphase bei Maschine A konfigurations- und programmbedingt eine Minute und bei Maschine B drei Minuten lang sein. Daher werden in Anlehnung an die Empfehlungen der ISO 14955-3:2019 nur die Anteile der zu durchlaufenden Betriebszustände bei der Festlegung der Maschinenkapazität berücksichtigt und ins Verhältnis zu einem definierten Betrachtungszeitraum (z. B. ein Jahr, eine 8-h-Schicht) gesetzt. Wie in Kapitel 5.3.1 bereits erwähnt, werden für die in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Betriebszustände Standardzeitanteile für einen definierten Betriebszyklus bzw. Betrachtungszeitraum in Anlehnung an die ISO 14955-3:2019 angeführt (s. Tabelle 21). Hierbei sei zu beachten, dass ein Unternehmen je nach organisations- bzw. prozessspezifischen Rahmenbedingungen eine fundierte Festlegung der Zeitanteile auf Grundlage der individuellen Produktionsplanung und -

steuerung durchführen sollte. Die vorgeschlagenen Zeitanteile in Tabelle 21 sind nur anzuwenden, wenn kein entsprechendes Wissen beim Anwender vorliegt (vgl. ISO 14955-3:2019). Die festgelegten Zeitanteile müssen in jedem Fall gleichermaßen für die Berechnungen der jeweiligen Energiebedarfe aller Zerspanungsprozesse angewendet werden, die miteinander verglichen werden sollen.

#### (5) Vergleich partieller Carbon Footprints

Ein Vergleich partieller Carbon Footprints des Energiebedarfs unterschiedlicher Zerspanungsprozesse ist gültig, wenn die entsprechenden Anforderungen der DIN EN ISO 14067:2019 (Anhang B) für Vergleichsvorhaben berücksichtigt werden. Demnach ist eine Gegenüberstellung der entsprechenden THG-Emissionen zulässig, insofern

- identische Anforderungen an die jeweilige THG-Quantifizierung gestellt wurden,
- die gleiche FU und die gleichen Systemgrenzen gewählt wurden,
- die Beschreibung, die Kriterien zur Aufnahme und die Erfassung der Daten gleichwertig ist,
- die Anforderungen an die Datenqualität identisch sind,
- die Einheiten identisch sind sowie
- das verwendete GWP zur Berechnung der THG-Emissionen gleich gewählt wurde (DIN EN ISO 14067:2019).

*„Für den Carbon Footprint spielt eine entscheidende Rolle, wie die verwendete Energie erzeugt wird (Strommix). Deshalb ist bei Vergleichen darauf zu achten, dass derselbe oder der jeweils relevante Strommix zugrunde gelegt wird“* (Holzbaur 2020). Die Verwendung des relevanten Strommix ist mit der Wahl der repräsentativen Lebenszyklusdaten bzw. des möglichst passgenauen EF gleichzusetzen (vgl. Kapitel 5.3.1). Sollen die mit einem Zerspanungsprozess resultierenden THG-Emissionen gegenübergestellt werden, ist ein Vergleich ebendann auch nur valide, wenn zur Berechnung der jeweiligen THG-Emissionen die gleichen Lebenszyklusdaten bzw. derselbe EF herangezogen wurde.

Bei der Kommunikation der Vergleichsergebnisse an Dritte, sofern sie den Anforderungen der DIN EN ISO 14067:2019 entsprechen sollen, müssen Unternehmen die Konformität mit dem Standard ISO 14026:2017 wahren.

## **7.2 Ableitung von Energieeffizienzindikatoren**

Zur Verbesserung der unternehmerischen Leistung werden durch ein Unternehmen Ziele gesetzt, die mit zugrunde liegenden Strategien und Maßnahmen verknüpft sind. Zur Messung des damit verbundenen Fortschritts sowie für interne und externe Vergleichsvorhaben werden in der Praxis viele verschiedene Leistungskennzahlen (engl. Key Performance Indicator, KPI) herangezogen, die entweder innerbetrieblich, zwischenbetrieblich, zeitbezogen oder Soll-Ist-bezogen die Situation eines Zustandes oder eine Prognose eines möglichen Zustandes quantifiziert abbilden (Müller 2020; Lin-Hi 2019). Äquivalent zu konventionellen, betriebswirtschaftlichen Leistungskennzahlen, wie bspw. Erfolgskennzahlen (z. B. Umsatz, Gewinn, EBIT – Earnings Before Interest and Taxes) oder Rentabilitätskennzahlen (z. B. Rentabilität, ROI) (Müller 2020), werden im Bereich des Umweltmanagements Umweltkennzahlen zur Erfassung und zum Vergleich der Umweltleistung eines Unternehmens herangezogen (Beermann und Wick 2019).

Eine **Umweltkennzahl bzw. ein Umweltindikator** spiegelt eine *„Information über einen betrieblichen Umwelttatbestand in konzentrierter, stark verdichteter Form“* (Berwanger et al. 2019) wider und dient somit der Messung und Bewertung von umweltrelevanten Vorgängen und Prozessen in einer Organisation. Die Umweltkennzahlen werden dabei bspw. aus Messgrößen zu Energie- oder



Ressourcen-/Materialverbräuchen abgeleitet und können als absolute Werte oder als Verhältnisgrößen (Quotienten aus Werten mit sachlich sinnvoller Beziehung) dargestellt werden. Sie beschreiben je nach Unternehmens- und Betriebsstruktur Sachverhalte in unterschiedlichen Umweltbereichen, wie Wasser, Abfall, Energie, Emissionen oder Material (Berwanger et al. 2019) und können sich auf unterschiedliche Organisationsebenen beziehen (z. B. Prozessebene, Maschinenebene, Standortebene, Organisationsebene). Beispiele für Umweltkennzahlen auf Organisationsebene in spezifischen Umweltbereichen sind nach BMU und UBA (2013):

- Umweltbereich Energie: Gesamter direkter Energieverbrauch [MWh oder GJ],
- Umweltbereich Wasser: Gesamter jährlicher Wasserverbrauch [ $m^3$ ],
- Umweltbereich Abfall: Gesamtes jährliches Abfallaufkommen [t] oder
- Umweltbereich Emissionen: Jährliche Gesamtemission von Treibhausgasen [ $t\ CO_2\text{Äq}$ ].

Die Vorteile, die sich durch die Leistungsmessung auf Organisationsebene ergeben, liegen einerseits in der relativ einfachen Erfassung der Leistungskennzahlen. Da diese oft bereits durch bestehende Informationssysteme standardmäßig aufgezeichnet werden, hält sich der administrative und operative Aufwand deren Erhebung in Grenzen. Andererseits besitzen Leistungskennzahlen auf Organisationsebene einen objektiven Charakter und lassen sich gut im zeitlichen Verlauf interpretieren (z. B. Wasserverbrauch im Zeitverlauf). Ein weiterer Vorteil liegt in der Steuerungsfähigkeit auf Organisationsebene unter der Voraussetzung, dass die jeweiligen Einflussfaktoren auf die Leistungskennzahlen bekannt sind (z. B. Senkung der THG-Emissionen durch vermehrten Bezug von Strom aus regenerativen Energien) (Lin-Hi 2019).

In Bezug auf die Messung der Umweltperformanz von Zerspanungsprozessen sind organisationsbezogene Leistungskennzahlen aber nur bedingt zur Steuerung der Unternehmensleistung zweckdienlich. Da die Ursachen der Umweltwirkung auf dieser Betrachtungsebene nicht immer direkt erkennbar sind, wie am Bsp. der THG-Emissionsreduktion durch die Änderung des Strombezugs, sollten entsprechende Leistungskennzahlen die Prozessebene adressieren. So ist aus einer Leistungskennzahl für den Strombedarf von Zerspanungsprozessen auf Organisationsebene nicht ableitbar, wie sich der Strombedarf zusammensetzt und welche Treiber die Höhe des Strombezugs verantworten. Zudem ist dadurch nicht erkennbar, wo im Prozessverlauf Optimierungsmaßnahmen ansetzen müssten, um die Umweltperformanz zu erhöhen.

Ausgehend vom EEMA und der PKV auf Ebene der Verbrauchergruppen können drei Umweltleistungskennzahlen in Form von Energieeffizienzindikatoren (EEI) hergeleitet werden, die der Erfassung der Energieperformanz von Zerspanungsprozessen dienen:  $EEI_{Basic}$ ,  $EEI_{Ready}$  und  $EEI_{Cutting}$ . Die EEI fokussieren dabei den Betriebszustand A (Bearbeitung) und orientieren sich an den von Balogun und Mativenga (2013) eingeführten Maschinenzuständen (Basic, Ready und Cutting) und der Aktivität der dazugehörigen Maschinenaggregate (vgl. Kapitel 4.1). Die einzelnen PKV der Verbrauchergruppen werden nach der Clustering-Idee von Balogun und Mativenga aufsummiert und ergeben die aggregierten PKV  $P_{Basic}$ ,  $P_{Ready}$  und  $P_{Cutting}$ . In Anlehnung an die Empfehlung der ISO 14955-1:2017 werden diese aggregierten PKV zur Normierung durch den Gesamtleistungsbedarf des Betriebszustandes geteilt und ergeben somit die EEI. Die EEI und deren Dokumentation sind in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 45: Energieeffizienzindikatoren und deren Dokumentation

Zerspanungsmaschine XY (Hersteller, Baujahr), Zerspanungsprozess YZ																
Betriebszustand	Messdauer Gesamt [hh:mm:ss]	Anzahl	Leistung, Verbrauchergruppe AM [W]												Leistung, Betriebszustand AM [W]	
			Hauptschalter, Steuerung	Beleuchtung	Hydraulik	Kühlung	Ventilation	sonst. Nebenaggregate	Absaugung	Achsenantrieb	Spänerförderer	Spindel	Werkzeug	Kühlschmiermittel		Materialabtrag
Zuordnung <sup>1</sup>			Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	Ⓚ	
A	t <sub>A</sub>	# <sub>A</sub>	P <sub>A-HS</sub>	P <sub>A-B</sub>	P <sub>A-H</sub>	P <sub>A-K</sub>	P <sub>A-V</sub>	P <sub>A-N</sub>	P <sub>A-A</sub>	P <sub>A-AA</sub>	P <sub>A-SF</sub>	P <sub>A-S</sub>	P <sub>A-W</sub>	P <sub>A-KS</sub>	P <sub>A-M</sub>	P <sub>A</sub>
Σ [W]			P <sub>Basic</sub>					P <sub>Ready</sub>					P <sub>Cutting</sub>			
EEI [%]			EEI <sub>Basic</sub>					EEI <sub>Ready</sub>					EEI <sub>Cutting</sub>			

<sup>1</sup> Zuordnung zu den Kategorien konstante Ⓚ und variable Ⓛ Verbrauchergruppe.

Die normierten EEI können unter Berücksichtigung der PKV auf Ebene der Verbrauchergruppen im Betriebszustand A<sup>66</sup> wie folgt berechnet werden:

$$EEI_{Basic} = \frac{P_{A-HS} + P_{A-B} + P_{A-H} + P_{A-K} + P_{A-V} + P_{A-N}}{P_A} = \frac{P_{Basic}}{P_A} \quad (14)$$

$$EEI_{Ready} = \frac{P_{A-A} + P_{A-AA} + P_{A-SF} + P_{A-S} + P_{A-W}}{P_A} = \frac{P_{Ready}}{P_A} \quad (15)$$

$$EEI_{Cutting} = \frac{P_{A-KS} + P_{A-M}}{P_A} = \frac{P_{Cutting}}{P_A} \quad (16)$$

Der Vorteil der EEIs und ihrer Dokumentation (Tabelle 45) ist eindeutig in der Entscheidungshilfe für die Endnutzer zu sehen. Dies können entweder die (i) Maschinenbetreiber oder das Unternehmen selbst sein, die ihre prozessspezifische Energieleistung ermitteln, vergleichen oder optimieren wollen, oder (ii) Werkzeugmaschinenhersteller, die die EEIs für Verkaufszwecke nutzen können. In jedem Fall lassen sich die vier zentralen Stärken der EEIs wie folgt beschreiben:

1. Die EEIs lassen sich schnell auf Basis des EEMA und der PKV des Betriebszustandes A berechnen.
2. Der Leistungsbedarf des Zerspanungsprozesses wird ganzheitlich auf Maschinenebene betrachtet.
3. Anhand des EEI ist direkt ersichtlich, wo der Hauptleistungsbedarf der Werkzeugmaschine innerhalb des Betriebszustandes A zu finden ist. Durch eine nachgelagerte Hotspot-Analyse auf der Ebene der Verbrauchergruppen kann der Hauptverbraucher direkt identifiziert werden. Je nachdem, ob es sich um konstante oder variable Verbraucher handelt, ist für den Maschinenbetreiber klar, ob Energieeffizienzmaßnahmen z. B. durch Maschineneinstellungen eigenständig initiiert werden können oder ob das Verbesserungspotenzial auf der Konstruktionsebene der Werkzeugmaschine zu finden ist.
4. Die absoluten aggregierten PKV P<sub>Basic</sub>, P<sub>Ready</sub> und P<sub>Cutting</sub> können als Benchmarking-Parameter der Leistung oder, unter Berücksichtigung der Bearbeitungszeit t<sub>A</sub>, des Energiebedarfs zur

<sup>66</sup> Die genaue Beschreibung der einzelnen Parameter kann den Ausführungen zu den Formeln 2 bis 4 aus Kapitel 4.3 entnommen werden.

Gegenüberstellung mehrerer Zerspanungsprozesse und/oder Werkzeugmaschinen herangezogen werden. Für eine solide Vergleichsbasis sind die angeführten Punkte aus Kapitel 7.1 zu berücksichtigen.

### 7.3 Integration in den PDCA-Zyklus des Umweltmanagementsystems

Wie eingangs erwähnt, kann das Carbon Accounting im Unternehmen entweder als Ausgangsbasis und Steuerungsinstrument der organisationinternen Klimaschutzmaßnahmen herangezogen werden oder es wird auf strategischer Ebene als fester Bestandteil in das unternehmenseigene Umweltmanagement integriert (vgl. Peverali und Ullrich 2021).

Das grundsätzliche Ziel von Managementsystemen innerhalb einer Organisation ist die Erfüllung von extern gesetzten oder selbst definierten Vorgaben, die zu einer stetigen Verbesserung der Unternehmensleistung und damit der Wettbewerbsfähigkeit führen (Förtsch und Meinholz 2018). Die stetige Verbesserung der Unternehmensleistungen soll auf strategischer Unternehmensebene dabei mit einer Systematisierung von Kontroll- und Steuerungsmechanismen sowie zielgerichteter Optimierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung etwaiger Wechselwirkungen im Sinne des PDCA-Modells garantiert werden (Ahrens 2016). Das **PDCA-Modell** hilft einer Organisation bei einer adäquaten Ressourcenplanung für die unternehmenseigenen Prozesse, bei der Steuerung dieser Prozesse, der Identifizierung von Verbesserungspotenzialen sowie der Definition von entsprechenden Optimierungsmaßnahmen (DIN EN ISO 9001:2015). Die vier Phasen eines prozessorientierten PDCA-Zyklus können wie folgt beschrieben werden:

- Plan – Planung des anvisierten Prozesses resp. der Maßnahme (inkl. Festlegung von Zielen auf Ebene des Systems sowie auf Ebene von Teilprozessen, Festlegung von Ressourcen zur Erreichung der gesetzten Ziele, Ermittlung und Umgang mit Chancen und Risiken);
- Do – Umsetzung des Prozesses resp. der Maßnahme entsprechend der vorherigen Planung;
- Check – Überprüfung und ggf. Vermessung des Prozessablaufs sowie daraus resultierender Ergebnisse in Form von Produkten und Dienstleistungen hinsichtlich der gesetzten Ziele, der Planung, der Unternehmenspolitik und weiterer relevanter Anforderungen (inkl. Berichterstattung der Ergebnisse);
- Act – Ggf. Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Leistung (DIN EN ISO 9001:2015).

Standardisierte Umweltmanagementsysteme, wie die ISO 14001 auf nationaler und das Eco-Management and Audit Scheme (EMAS) auf europäischer Ebene oder in Bezug auf die Ressource Energie, das Energiemanagementsystem nach ISO 50001, inkludieren den beschriebenen universell einsetzbaren PDCA-Zyklus (Forin et al. 2019). **Umweltmanagementsysteme** sind dabei gezielt auf die Einhaltung von intern oder extern gesetzten Vorgaben im Umweltbereich ausgerichtet und fokussieren eine kontinuierliche Verbesserung organisationsspezifischer Prozesse hinsichtlich der Minimierung von Umweltbelastungen (u. a. in Form von THG-Emissionen), der Erhöhung des Stellenwertes der unternehmensweiten Umweltpolitik sowie der Erhöhung der Ressourceneffizienz unter gleichzeitiger Senkung von in diesem Zusammenhang stehenden Kosten (Baumast et al. 2019). Gerade im Hinblick auf ein **offensives Umweltmanagement**, bei dem es Unternehmen nicht nur um die Pflichterfüllung staatlich gesetzter Vorgaben geht, sondern vielmehr um die intrinsische Motivation die Umweltperformanz des Unternehmens zu steigern und sich der betrieblichen Herausforderung zu stellen, neue Technologien in den Betriebsablauf zu integrieren, schafft die Anwendung des PDCA-Zyklus einen soliden Rahmen zur stetigen Verbesserung der organisationsbezogenen Prozesse (Berwanger et al. 2019).

Der systematische Verfahrensansatz für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen kann genau zu dieser Absicht in den PDCA-Zyklus von Umweltmanagementsystemen (oder auch spezifisch in ein **Energiemanagementsystem**<sup>67</sup>) integriert werden. Durch die Grundlage des EEMA auf Basis der PKV können nicht nur Optimierungspotenziale innerhalb von Zerspanungsprozessen oder dem Betrieb der Werkzeugmaschinen schnell identifiziert, sondern vielmehr auch Verbesserungsmaßnahmen im Betriebs- oder Prozessablauf schnell angestoßen und kontrolliert umgesetzt werden. Abbildung 24 zeigt grafisch die Integration des systematischen Verfahrensansatzes in den PDCA-Zyklus.

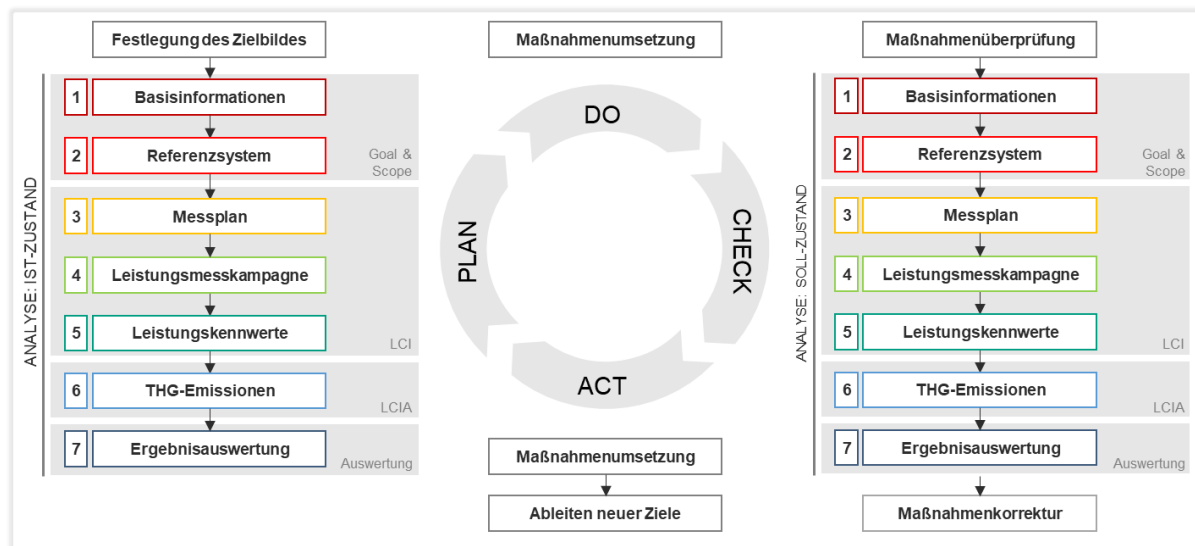


Abbildung 24: Integration des systematischen Verfahrensansatzes des Carbon Accountings des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen in den PDCA-Zyklus (eigene Darstellung)

Zum Zwecke eines Ist-Soll-Vergleichs, also dem Vergleich eines Prozesses vor Implementierung einer Maßnahme mit dem Zustand nach der Implementierung, wird der systematische Verfahrensansatz in die Phasen „Plan“ und „Check“ eingegliedert. In der Phase „Plan“ erfolgt nach der Festlegung des Zielbildes, z. B. Reduzierung des Energiebedarfs resp. der THG-Emissionen des Zerspanungsprozesses XY, die systematische Erfassung der Ausgangssituation. Dies wird mittels der Bestimmung des Energiebedarfs bzw. der THG-Emissionen des Zerspanungsprozesses bzw. des TED innerhalb eines definierten zeitlichen Bezugsrahmens entsprechend des in Kapitel 5.3.1 vorstellten Verfahrensansatzes durchgeführt. In der Phase „Do“ erfolgt die Umsetzung der zuvor definierten Maßnahme. Mögliche direkte Maßnahmen<sup>68</sup> zur Reduzierung des Energiebedarfs bzw. der THG-Emissionen in Verbindung mit Zerspanungsprozessen bzw. dem Betrieb von Werkzeugmaschinen können dabei bspw. sein:

- Tausch einzelner für den jeweiligen Anwendungsfall überdimensionierter Aggregate;
- Minimierung der Leerzeiten (Nebenzeiten);
- Vermeidung von spezifischen unproduktiven Betriebszuständen;
- Anpassung der Maschinenprogrammierung, um bspw. die Dauer von Aufwärm- und Standby-Phasen, insofern möglich, zu reduzieren;

<sup>67</sup> „Managementsystem [...] zur Festlegung einer Energiepolitik [...], von Zielen [...], Energiezielen [...], Aktionsplänen und Prozessen [...] zum Erreichen der Ziele und Energieziele“ (DIN EN ISO 50001:2018), wobei das eigentliche Energiemanagement als die „Kombination aller Maßnahmen [verstanden werden kann], die bei einer geforderten Leistung einen minimalen Energieeinsatz sicherstellen“ (Berwanger et al. 2019).

<sup>68</sup> Eine ausführliche Darstellung von Energieeffizienzmaßnahmen auf Haupt- und Nebenaggregatebene liefern Denkena et al. (2020).

- Direktes Abschalten von Nebenaggregaten, die in spezifischen Betriebszuständen keinen direkten Zweck erfüllen (z. B. Späneförderer im Betriebszustand „Betriebsbereit“).

Dabei ist grundsätzlich darauf zu achten, dass die anvisierte Maßnahme zu keinen Verschlechterungen in anderen Betriebszuständen (z. B. größere Lastspitzen), in Bezug auf die gesamte Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine oder innerhalb des übergreifenden Produktionsablaufes führt (Stichwort aus dem Bereich des PIUS „Verschlimmbessern“). Nach Umsetzung der Maßnahme innerhalb der Phase „Do“ ist in der Phase „Check“ zu kontrollieren ob das Ergebnis, welches durch die Maßnahmenintegration anvisiert wurde, erreicht werden konnte und ob es dadurch zu keinen Verschlimmverbesserungen innerhalb des Betriebsablaufs kommt. Dieser Kontrollschritt wird dabei erneut auf Basis des systematischen Verfahrensansatzes (Kapitel 5.3.1) durchgeführt. Auf Basis der transparenten Ergebnisdarstellung auf Ebene der Verbrauchergruppen und der Betriebszustände können die Abweichungen vom aufgenommenen Ist-Zustand sowie der Erfolg bzw. Misserfolg der Maßnahmenumsetzung direkt sichtbar gemacht werden.<sup>69</sup> Wird eine Schwäche der implementierten Maßnahme identifiziert, ist diese vom Unternehmen nachzubessern und der Soll-Vergleich muss im Rahmen der Phase „Check“ erneut durchgeführt werden. Wird die Maßnahme als erfolgreich bewertet, erfolgt im Rahmen der Phase „Act“ die Verstetigung der Maßnahme (bspw. im Rahmen einer kontinuierlichen Umstellung von Maschinenbelegungszeiten oder der Umprogrammierung einer Werkzeugmaschine dahingehend, dass spezifische Aggregate, die in bestimmten Betriebszuständen nicht gebraucht werden, abgeschaltet werden). Nach erfolgreicher Maßnahmenumsetzung können neue Ziele inkl. der Definition neuer Optimierungsmaßnahmen definiert werden und der PDCA-Zyklus beginnt von vorne (Abbildung 24).

---

<sup>69</sup> Hier sei erwähnt, dass zur Quantifizierung der Netto-Umweltwirkung, die aus der reinen Veränderung des Ist-Zustandes resultiert, die Modellierungslogik des CLCA verfolgt werden muss.

## 8 Diskussion

Nachfolgend werden die vorgestellten Ergebnisse diskutiert, indem vornehmlich die Grenzen der entwickelten Methodiken kritisch beleuchtet werden. Begrenzungen lassen sich hierbei im EEMA selbst finden (1), in Bezug auf die Integration des EEMA in das LCA und den daraus resultierenden Ergebnissen (2) sowie im entwickelten systematischen Verfahrensansatz für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen (3). Die Grenzen entsprechend der jeweiligen Bereiche werden im Folgenden vorgestellt.

### (1) Grenzen des EEMA

Mittels des praxisorientierten Energiemodellierungsansatzes von Zerspanungsprozessen, dem EEMA, lässt sich der TED disaggregiert in Abhängigkeit der Verbrauchergruppen einer Werkzeugmaschine und deren programmbedingten Betriebszuständen darstellen. Im Rahmen der Entwicklung des EEMA wurden dabei generische Kategorien für Verbrauchergruppen definiert, welche auf Basis von Literaturangaben abgeleitet wurden. Die energieverbrauchenden Aggregate (z. B. Pumpen, Motoren) einer spezifischen Werkzeugmaschine sollen durch den Anwender des EEMA den definierten Verbrauchergruppen entsprechend ihrer Aufgabe sinnvoll zugeordnet werden. Der Zweck der Verbrauchergruppen liegt darin, die Individualität einer Werkzeugmaschine und somit die Komplexität der Modellierungsaufgabe zu entschärfen und generische Kategorien im Sinne einer modularen Modellierung vorzuhalten. Damit wird eine Vergleichsbasis zwischen verschiedenen Werkzeugmaschinen hergestellt. Den einzelnen Verbrauchergruppen können mehrere maschinenspezifische Aggregate zugeordnet werden, d. h., dass die jeweils berechneten PKV für einen aggregierten Leistungsbedarfswert für mehrere Maschinenaggregate stehen können. Dies bedingt die Notwendigkeit einer klaren Dokumentation der zuvor stattgefundenen Zuordnung der maschinenspezifischen Aggregate zu den generischen Verbrauchergruppen, um entsprechende Untersuchungsergebnisse richtig interpretieren zu können. Bei Hotspotanalysen auf Verbrauchergruppenebene oder bei Vergleichsstudien mehrerer Zerspanungsprozesse bzw. Werkzeugmaschinen haben allerdings diese Ergebnisse immer die Limitation der Verbrauchergruppen. Für Aussagen darüber, welche spezifischen Maschinenaggregate für welchen Leistungsbedarf verantwortlich sind, bedarf es detailliertere (Nachfolge-)Analysen.

Kritisch hinterfragt werden kann auch die Festlegungsweise sowie die Klassifizierung der generischen Verbrauchergruppen. Hierbei wurden Literaturangaben zu Aggregaten von spanenden Werkzeugmaschinen genauso wie Angaben hinsichtlich ihrer konstanten und variablen Energiebedarfscharakteristik gegenübergestellt, um hieraus die in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Verbrauchergruppen sowie deren Unterscheidung hinsichtlich konstanter und variabler Verbrauchergruppen festzulegen. Eine anders gelagerte Kategorisierung von Verbrauchergruppen oder eine andere Klassifizierung hinsichtlich der konstanten und variablen Anteile kann in der Praxis gegebenenfalls sinnvoller sein, da diese am Ende von der Konstruktionscharakteristik einer spezifischen Werkzeugmaschine bzw. einer Werkzeugmaschinenreihe (z. B. eines Herstellers) abhängen können. Die in dieser Arbeit vorgestellte Festlegung der Verbrauchergruppen kann vom anzuwendenden Unternehmen vorher kritisch überprüft werden und ist gegebenenfalls entsprechend der eigenen, unternehmensinternen Rahmenbedingungen anzupassen. Bei einer Anpassung ist allerdings darauf zu achten, dass die Kategorisierungs- und Klassifizierungslogik innerhalb einer Organisation konsistent angewandt wird, um bspw. nachfolgende Vergleichsvorhaben zwischen Werkzeugmaschinen der gleichen Organisation zu gewährleisten oder Zeitreihenauswertungen bzw. Analysen des Energiebedarfs im historischen Verlauf zu ermöglichen.

Die gleichen Begrenzungen können auch in Bezug auf die Definition der Betriebszustände einer Werkzeugmaschine gesehen werden. Auch hier ist in der Organisation bzw. im Unternehmen zu überprüfen, ob eine betriebsnähere Definition der möglichen Betriebszustände der eingesetzten Werkzeugmaschinen sinnvoller erscheint.

Zudem ist bei der Aussagegüte des durch den EEMA ermittelten  $TED_M$  und  $TED_P$  immer zu bedenken, dass diese Ergebnisse sehr stark von dem zugrunde gelegten Betriebszyklus und der zugrunde gelegten Maschinenauslastung abhängen. Neben den in Kapitel 4.5 vorgestellten Hintergrundinformationen sollten für die beiden Ergebnisgrößen diese Bezugsinformationen immer mit ausgewiesen werden. Gerade bei einer Aussage über den  $TED_P$  eines Zerspanungsprozesses und einem (adäquaten) Vergleichsvorhaben mit anderen Zerspanungsprozessen auf der gleichen, oder auch auf anderen Werkzeugmaschinen, ist dieses Hintergrundwissen essentiell, um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können.

## (2) Grenzen des LCA basierend auf der Integration des EEMA in das LCI

Das LCA nach DIN EN ISO 14040:2020 und DIN EN ISO 14044:2020 weist inhärente Grenzen und Zielkonflikte in der Methodik auf, die einen direkten Einfluss auf die generierten Ergebnisse haben. Die Ergebnisse einer LCA-Studie bedingen sich u. a. durch die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Wahl der FU und der Systemgrenzen, die Auswahl und Eingliederung der Daten innerhalb des LCI und die angewendeten Allokationsmethoden sowie Annahmen hinsichtlich der unterschiedlichen Lebenszyklusphasen. Diese Festlegungen werden durch den jeweiligen LCA-Anwendenden (begründet) getroffen. Dies kann allerdings zur Folge haben, dass durch verschiedene LCA-Anwendende für die gleiche Untersuchungsabsicht unterschiedliche Ergebnisse generiert werden können, welche auf unterschiedliche Modellierungsentscheidungen zurückzuführen sind. Hinzu kommt, dass die statische Methode dynamische Veränderungen, bzw. hinsichtlich einer Veränderung bestimmter Daten aufgrund von saisonalen Schwankungen, nicht abbilden kann (vgl. Kapitel 1.2) und Input-Daten häufig auf spezifische geographische Bereiche beschränkt sind (z. B. Daten bzgl. der Stromversorgung – regionaler Energiemix). Durch die klare Systematisierung innerhalb des EEMA sowie auch durch den systematischen Verfahrensansatz für das Carbon Accounting und dem Aussprechen von direkten Empfehlungen wird versucht, diesen Variationsmöglichkeiten in der Modellierung entgegenzusteuern. Die später auf Basis der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik durchgeführten LCA-Studien bzw. THG-Bilanzierungen werden daher Ergebnisse liefern können, die durch

- die Abbildung des TED,
- der Disaggregation in definierte Verbrauchergruppen und Betriebszustände,
- der Unterscheidung in konstante sowie variable Anteile,
- der Wahl des zeitbezogenen Referenzflusses zur linearen Abbildung des TED in Bezug auf die FU,
- der präzisen Darstellung des Nutzungsprofils der Werkzeugmaschine (Maschinenauslastung, Zeitanteile der Betriebszustände, Betriebszyklus) und
- der transparenten Dokumentation

nach den gleichen Regeln erzeugt und dadurch objektiv miteinander vergleichbar sein werden.

Bei der Beurteilung der LCA- (bzw. Carbon-Accounting-) Ergebnisse sowie darauf fußender Schlussfolgerungen und Empfehlungen im Rahmen der Auswertung ist allerdings unbedingt die zugrunde liegende Modellierungsart zu berücksichtigen. Da die vorgestellte Methodik auf dem ALCA-Ansatz beruht, sind die damit verbundene Ergebnisse nicht für die Quantifizierung von Optimierungspotenzialen geeignet. Eine methodisch korrekte Quantifizierung wäre nur auf Basis einer

Modellierung entsprechend des CLCA möglich, da es sich bei der Bemessung des Optimierungspotenzials um die Bestimmung einer möglichen Veränderung handelt. Auch ist bei Hotspotanalysen der LCIA-Ergebnisse darauf zu achten, dass hieraus entsprechend keine Schlüsse darüber möglich sind, welche Einsparungspotenziale vorliegen. Hieraus ist lediglich ableitbar, in welchen Bereichen (z. B. in Bezug auf die Verbrauchergruppen oder Betriebszustände) die berechneten Umweltwirkungen zu verorten sind.

Eine Schwäche der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik zur Ableitung einer Aussage hinsichtlich der Umweltperformanz (in Form der THG-Intensität) von Zerspanungsprozessen ist die alleinige Berücksichtigung des Energiebedarfs und der gleichzeitigen Vernachlässigung weiterer materieller betrieblicher Ressourcen (z. B. Kühlschmierstoffe, Schmierfette, Filter, Druckluft, Hydrauliköl oder Späne). Für eine transparente und praxisorientierte Modellierung im Sinne des EEMA wäre für die weiteren materiellen betrieblichen Ressourcen durch weitere Forschungsanstrengungen u. a. zu prüfen,

- ob die Verbräuche konstant sind, d. h. unabhängig vom eigentlichen Zerspanungsprozess benötigt werden, oder variabel,
- ob es ausreichend ist, deren Bedarf auf Maschinenebene zu bilanzieren oder ob eine disaggregierte Modellierung entsprechend des EEMA anhand von Verbrauchergruppen und Betriebszuständen sinnvoll wäre,
- ob durch eine Parametrisierung des jeweiligen Ressourcenbedarfs eine Übertragung und dadurch Wiederverwendung von Primärdaten auf andere Zerspanungsprozesse auf der jeweiligen Werkzeugmaschine möglich ist.

Die jeweiligen Stoffflüsse der sonstigen relevanten materiellen betrieblichen Ressourcen sollten dann entsprechend in das LCA bzw. in das Carbon Accounting einfließen. Nur durch die Berücksichtigung aller materiellen betrieblichen Ressourcen, die zur Erfüllung der Zerspanungsaufgabe notwendig sind bzw. damit im direkten Zusammenhang stehen, kann ein vollständiges Bild der eigentlichen Umweltwirkung bzw. Emissionsintensität des Zerspanungsprozesses dargestellt werden, auf welche strategie- oder investitionsrelevante Entscheidungen innerhalb eines Unternehmens fußen sollten.

### (3) Grenzen des Carbon Accounting Ansatzes

Mit dem durchgeführten Modellversuch konnte die Anwendbarkeit sowie die Plausibilität des systematischen Verfahrensansatzes für das Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozesse demonstriert werden. Dies lässt sich quantitativ an den Ergebnissen des Kontrollschritts inkl. der Fehlerausweisung belegen (vgl. Kapitel 4.4 und Kapitel 6). Durch die klare Systematisierung, die sich im festgelegten Ablaufplan sowie der strukturierten Handlungsanweisung widerspiegelt (Kapitel 5.3), wird der Verfahrensansatz als anwenderfreundlich und praxisorientiert bewertet. Durch die Integration des EEMA können die maschinenspezifischen konstanten Leistungskennwerte für Nachfolgeuntersuchungen an der jeweiligen Werkzeugmaschine leicht wiederverwendet werden. Die PKV für die variablen Verbrauchergruppen können wie in Kapitel 4.5 aufgezeigt, aus der SPS der Werkzeugmaschine bzw. durch eine Berechnung für die Verbrauchergruppe Materialabtrag abgeleitet werden. Diese Praxisorientierung schafft eine erhebliche Effizienzsteigerung gegenüber dem konventionellen Carbon Accounting (bzw. LCA), bei dem die Primärdaten für jeden Zerspanungsvorgang bzw. jede Werkzeugmaschine und Untersuchung immer wieder neu erhoben werden müssen. Dies bringt zudem den Vorteil mit sich, dass die periodisch neu generierten Daten im historischen Verlauf gut miteinander vergleichbar sind sowie Ursachen und Trends hinsichtlich des Verbrauchs durch die transparente Datendokumentation sehr gut sichtbar gemacht werden können.



Die eingeführten und entwickelten Prüfinstrumente (Ermittlung der Unsicherheiten innerhalb des Kontrollschrittes, Prüfverfahren der Datenqualität nach Kapitel 5.3.1) sichern nicht nur kontinuierlich die Validität (Richtigkeit und Repräsentativität) der generierten Ergebnisse, sie führen auch dazu, die Belastbarkeit und Glaubwürdigkeit des ermittelten partiellen CFP zu erhöhen und direkte Handlungsempfehlungen, u. a. hinsichtlich der Verbesserung der Datenqualität, auszuweisen.

Allerdings betrachtet der Carbon Accounting Ansatz als inhärente Charakteristik nur die Wirkungskategorie Klimawandel. Beim produktorientierten Carbon Accounting liegen i. d. R. der gesamte Lebenszyklus eines Produktes, von der Rohstoffgewinnung bis zum EoL, und die damit implizierten THG-Emissionen im Fokus der Untersuchung (vgl. DIN EN ISO 14067:2019; WRI und WBCSD 2011). Bezogen auf die Gesamtumweltperformanz eines Produktes oder eines Prozesses, kann durch die Wirkungskategorie Klimawandel meist ein wesentlicher Beitrag der Umweltleistung innerhalb dieses Lebenszyklus oder auch in Bezug auf einzelne Lebenszyklusabschnitte abgeschätzt werden. Allerdings kann die gesamtheitliche Umweltperformanz eines Produktes, eines Prozesses oder einer Dienstleistung nur durch die Einbeziehung aller Wirkungskategorien und den Einfluss auf die verschiedenen Umweltkompartimente abgebildet werden, da die einbegriffenen Lebenswegabschnitte auch Auswirkungen auf andere Problembereiche haben können (z. B. Eutrophierung, Ressourcenverknappung, Landnutzungsänderung). Dies bedeutet, dass der Carbon Footprint nur einen Teilausschnitt der tatsächlichen Umweltwirkung widerspiegelt und darauf basierende Optimierungsmaßnahmen ggf. Problemverschiebungen zu anderen Wirkungskategorien verursachen könnten. Wenn es einem Unternehmen tatsächlich um die ganzheitliche Ermittlung der mit den eigenen Prozessen oder Produkten in Verbindung stehenden Umweltwirkungen geht, sollte anstelle des reinen Carbon Accounting ein klassisches LCA des Untersuchungsgegenstandes durchgeführt werden. Da die produktorientierten Carbon Accounting Ansätze auf der Methodik des LCA fußen, ist die Bewertung weiterer Umweltkategorien im Rahmen des LCIA, die i. d. R. softwaregestützt abläuft, weniger herausfordernd hinsichtlich des Aufwandes als hinsichtlich der vorhandenen Expertise, um die Ergebnisse richtig zu interpretieren. Eine fundierte Bewertung ist gerade dann essentiell, wenn bspw. Maßnahmen zur Verringerung der Umweltwirkungen in einem Wirkungsbereich zu Verschlechterungen in anderen Bereichen führen können oder eine Entscheidung bspw. bedingt, dass zwischen potenziellen Umweltschäden im Hinblick auf unterschiedliche Wirkungskategorien oder Umweltthemen abzuwägen ist. In jedem Fall führt eine ganzheitliche Umweltbewertung im Rahmen des LCA zu einer fundierteren Entscheidungsgrundlage als die reine Betrachtung des Carbon Footprint. Auch nach dem Standard DIN EN ISO 14067:2019 sollte der „[...] CFP oder partielle CFP [...] nicht der ausschließliche Bestandteil des Entscheidungsfindungsprozesses sein“ (DIN EN ISO 14067:2019).

Des Weiteren ist das Ergebnis des Carbon Accounting bzw. die Quantifizierung in Form einer spezifischen Menge an CO<sub>2</sub>-Äq begrenzt hinsichtlich der Aussagegenauigkeit. Die Wahl der zugrunde liegenden Lebenszyklusdaten für die Abbildung des jeweiligen Stromprodukts bzw. die Wahl des entsprechenden EF hat, wie Kapitel 5.3.1 beschrieben, einen erheblichen Einfluss auf das Endresultat. Die Beurteilung einer bestimmten CO<sub>2</sub>-Äq-Menge bezogen auf einen zeitlichen Bezugsrahmen ist somit schwierig und ermöglicht eher tendenzielle Aussagen. Daher kann, je nach Absicht der anvisierten Untersuchung, ein anderer Ansatz, wie bzw. die Analyse des reinen Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen, zielführender sein, als die Ressourcenaufwendungen erst in eine Menge an CO<sub>2</sub>-Äq pro Bezugseinheit umzurechnen (DIN EN ISO 14067:2019).

Da der Fokus auf dem Standard DIN EN ISO 14067:2019 und auf der Erstellung eines partiellen CFP bzw. Carbon Footprint auf Prozessebene liegt, scheint darüber hinaus die Übertragbarkeit der dadurch generierten Ergebnisse begrenzt. Durch die separate Modellierung des Energiebedarfs auf Basis des

EEMA und erst die daran anschließende mögliche faktorielle Berechnung der THG-Emissionen auf Basis von EF, können allerdings auch die mit dem Energiebedarf verbundenen Scope 2 und Scope 3 Emissionen nach dem Bilanzierungsansatz des GHG Protocols (WRI und WBCSD 2004) berechnet werden. Voraussetzung für eine derartige Ausweisung von THG-Emissionen auf Organisationsebene ist die Verwendung passender EF, welche die Emissionsintensität entsprechend des Scope 2 und des Scope 3 für das verwendete Stromprodukt (von einem externen Erzeuger) separat bereitstellen. Solche EF stellt bspw. die LCA-Datenbank ecoinvent (v3.8) zur Verfügung (vgl. Tabelle 25). Die Ergebnisse können dann als Teilergebnisse in THG-Bilanzierung nach dem GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (WRI und WBCSD 2004) integriert werden. Der klare Vorteil dieser Teilergebnisse liegt in der zuvor mehrfach erwähnten Transparenz auf Prozessebene, welche in der Modellierung des Energiebedarfs auf Basis des EEMA begründet liegt. Anders als aggregierte Werte auf Organisationsebene ohne detaillierten Modellierungshintergrund, die i. d. R. in derartige Carbon Accounting Ansätze eingehen, lassen die auf Basis des EEMA erzeugten Daten eine Erkennung der Treiber der THG-Bilanz zu.

## 9 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit untersucht die zentrale Forschungsfrage: *Wie gelingt eine praxisorientierte Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen zur Unterstützung des lebenszyklusorientierten Carbon Accounting in Unternehmen?* Hierfür wurden in einer Voruntersuchung des Themenfeldes, basierend auf einer Analyse der Anforderungen des Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019, der Zusammensetzung des Energiebedarfs und der Festlegung von Systemgrenzen zur Modellierung des TED sowie bestehender LCI-Datensätze aus konventionellen LCA-Datenbanken und themenrelevanten LCA-Studien nachfolgende Erkenntnisse abgeleitet:

- Das lebenszyklusorientierte Carbon Accounting des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen bedarf der Modellierung eines partiellen CFP auf Basis der Grundlagenmethodik des LCA und entsprechender Anforderung nach DIN EN ISO 14040:2020 und DIN EN ISO 14044:2020.
- Der TED eines Zerspanungsprozesses ist im Wesentlichen auf den Energiebedarf der Werkzeugmaschine zurückzuführen und wird durch konstante und variable Verbrauchergruppen beeinflusst. Während die konstanten Verbrauchergruppen den größten Anteil am TED halten, fällt nur ein geringer Anteil auf die variablen Verbrauchergruppen, welche den Energiebedarf des eigentlichen Spanabtrags innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“ repräsentieren.
- Die eigentliche Zerspanungsaufgabe ist nur durch den geregelten Betrieb der Werkzeugmaschine inkl. dem Durchlaufen der unterschiedlichen Betriebszustände möglich. Bei der ganzheitlichen Modellierung des Energiebedarfs in Form des TED müssen somit auch Energiebedarfsanteile unproduktiver Betriebsphasen innerhalb eines definierten Betriebszyklus berücksichtigt werden.
- Der TED in Abhängigkeit der Maschinenauslastung steht nicht in linearer Relation zum Energiebedarf des eigentlichen Spanabtrags.
- Durch die Entwicklung des dreigliedrigen Kategorisierungssystems bestehender Modellierungsansätze konnte gezeigt werden, dass nur Modellierungsansätze der Kategorie 3 die technischen Systemgrenzen so setzen, dass der TED abgebildet werden kann.
- Neben Unzulänglichkeiten hinsichtlich der Modellierungs- und Datenqualität sowie der Transparenz resp. Plausibilität können generische LCI-Datensätze von Zerspanungsprozessen aus konventionellen LCA-Datenbanken (ecoinvent v3.8, GaBi 2019) aufgrund der Wahl des Referenzflusses nicht den TED abbilden. Es ist kein linearer Zusammenhang zwischen der FU und dem TED herstellbar.
- Die analysierten LCA-Studien stellen oft nur vergleichende LCA-Studien dar oder nutzen die Methode nur zur Ermittlung der damit verbundenen Umweltwirkungen. Zudem werden die Prozesse i. d. R. als Blackbox-Prozesse modelliert, die sich vorwiegend auf die eigentliche Zerspanung oder den Betriebszustand A (Bearbeitung) konzentrieren. Unter den wenigen methodischen Arbeiten hebt sich die Arbeit der CO<sub>2</sub>PE!-Initiative (Kellens et al. 2012b) ab, welche den TED berücksichtigt und einen zeitbezogenen Referenzfluss definiert, welcher eine lineare Relation zwischen der FU und dem TED zulässt. Durch die Nichtberücksichtigung der konstanten und variablen Energiebedarfsanteile auf Ebene der Verbrauchergruppen, sind allerdings die für den Ansatz notwendigen und aufwendig zu erhebenden Primärdaten nicht für Nachfolgeuntersuchungen wiederverwendbar.

Aus diesen Erkenntnissen wurden wiederum zwei wesentliche Anforderungen für den anvisierten Energiemodellierungsansatz abgeleitet, welche durch bisherige lebenszyklusorientierte Modellierungsansätze nicht erfüllt werden:

- (1) Zur praxisorientierten und ganzheitlichen Modellierung des TED bedarf es eines disaggregierten Ansatzes, der die konstanten und variablen Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände berücksichtigt und somit eine Wiederverwendung von Primärdaten für Nachfolgeuntersuchungen an der Werkzeugmaschine zulässt.
- (2) Zur lebenszyklusorientierten und transparenten Modellierung des TED im Rahmen des LCA und des Carbon Accounting bedarf es einen prozessorientierten, modularen und parametrisierten Ansatz im Sinne eines Whitebox-Modells, welcher durch die adäquate Wahl des Referenzflusses einen linearen Zusammenhang zwischen dem TED und der FU ermöglicht.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde auf Basis von ausgewählten Grundlagenmodellen (Balogun und Mativenga 2013; Kellens et al. 2012b) sowie definierter Verbrauchergruppen und Betriebszuständen einer Werkzeugmaschine der anvisierte praxisorientierte Energiemodellierungsansatzes von Zerspanungsprozessen, der EEMA, entwickelt. Durch die Berücksichtigung der konstanten und variablen Energiebedarfsanteile mittels der auf Primärdaten basierenden PKV der Verbrauchergruppen in Anhängigkeit der Betriebszustände können die konstanten PKV für Nachfolgeuntersuchungen an der Werkzeugmaschine wiederverwendet und die variablen PKV einfach aus Maschinenparametern abgeleitet werden.

Dies charakterisiert den EEMA zunächst als ein praxisorientiertes Berechnungsmodell, welches zudem in die Methode des LCA zur modularen und parametrisierten Modellierung des Inputflusses „Strom“ von Zerspanungsprozessen integriert werden kann. Zur Herstellung des linearen Zusammenhangs zwischen dem TED und der FU wurde, in Anlehnung an Kellens et al. (2012b), ein zeitbezogener Referenzfluss gewählt, welcher nicht nur den Energiebedarf des Betriebszustandes A berücksichtigt, sondern auch anteilig den Energiebedarf für die unproduktiven Betriebszustände. Zudem ist bei der Erstellung von entsprechenden LCI-Datensätzen eine transparente Dokumentation sowie Ausweisung von Hintergrundinformationen essentiell, um ein Systemverständnis entsprechend eines Whitebox-Modells zu generieren.

Durch die Verbindung des EEMA mit dem LCI bieten sich Potenziale, um die themenbezogene Datenlandschaft im Bereich des LCA deutlich zu verbessern. Die Vorschläge zur Ableitung von plausiblen generischen LCI-Datensätzen, welche in konventionelle LCA-Datenbanken eingegliedert werden könnten, würden die Modellierungsgenauigkeit sowie die Aussagegüte entsprechender LCA-Ergebnisse von v. a. produktorientierten LCA-Studien innerhalb des verarbeitenden Gewerbes erheblich verbessern.

Daneben bildet die Integration des EEMA in das LCI die methodische Grundlage für den lebenszyklusorientierten Carbon Accounting Ansatz für Unternehmen. Hierfür wurde ein systematischer Verfahrensansatz für die Bestimmung des partiellen CFP auf Prozessebene entwickelt und dessen Anwendbarkeit im Rahmen eines Modellversuchs bestätigt. Es wurde Unternehmen in diesem Zuge eine strukturierte und detaillierte Anleitung zum Carbon Accounting des Energiebedarfs ihrer Zerspanungsprozesse zur Verfügung gestellt, welche eine transparente Datenerfassung im Sinne der PKV zur direkten Identifizierung von Effizienzpotenzialen sowie ein Prüfverfahren zur kontinuierlichen Verbesserung der Datenqualität bereithält.

Daran anschließend wurden weitere organisationsinterne Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Methodiken aufgezeigt, die eine methodische Konsistenz in das unternehmensinterne Energie- und

Umweltmanagement bringen können. Neben der Möglichkeit zum Benchmarking und zum Vergleich des Energiebedarfs verschiedener Zerspanungsprozesse auf Basis des EEMA, können Energieeffizienzindikatoren für Zerspanungsprozesse für den Betriebszustand A aus dem Energiemodellierungsansatz abgeleitet werden. Zudem kann der systematische Verfahrensansatz für das Carbon Accounting in bestehende Umweltmanagementansätze im Rahmen des PDCA-Modells integriert werden.

Aufgrund der ökonomischen und ökologischen Relevanz der Ressource Energie ist es für das verarbeitende Gewerbe heute mehr und mehr notwendig, das eigene Energienutzungsverhalten zu monitoren. Die vorgestellte Methodik zur Prognostizierung und Bewertung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen auf Basis des EEMA ist daher vor allem für Unternehmen, die keine volldigitalisierte Produktion aufweisen und dadurch nicht in der Lage sind, alle Energiedaten in Echtzeit aufzunehmen und auszuwerten, eine wertvolle Grundlage für Entscheidungsfindungsprozesse sowie für die Umweltberichterstattung. Durch die voranschreitende Digitalisierung im verarbeitenden Gewerbe ist es auch denkbar, den EEMA in Verbindung mit dem systematischen Carbon Accounting Ansatz in das organisationsinterne betriebliche Umweltinformationssystem (BUIS) zu integrieren. Hierbei könnte die im BUIS hinterlegte EEMA-Berechnungsmethodik mit Energiebedarfsdaten, die in Echtzeit durch eine sensorgestützte Datenerfassung an der Werkzeugmaschine erfolgen, bedient werden. Das BUIS kann dann automatisiert nicht nur den TED (in Form des TED<sub>M</sub> oder des TED<sub>P</sub>) in Echtzeit ausweisen, sondern auch relevante Kennzahlen bspw. in Form der PKV, der THG-Emissionen in Bezug auf einen ausgewählten Bezugsrahmen oder auch die EEl's. Diese Daten können wiederum einfach für die innerbetriebliche Prozessplanung und -steuerung, für Monitoring-Zwecke, zur Entscheidungsfindung innerhalb von Managementprozessen (Stichwort: Green Business Process Management) oder für die Umweltberichterstattung herangezogen werden.

Ein weiterer Vorteil der disaggregierten THG-Bilanzierung auf Prozessebene liegt in der möglichen Hochskalierung der THG-Emissionen auf Produkt- oder auch Organisationsebene. Durch den entwickelten systematischen Verfahrensansatz können die mit dem Energiebedarf der Zerspanungsprozesse verbundenen THG-Emissionen aggregiert auf Unternehmensebene ausgewiesen und auch als Baustein in weitere Carbon Accounting Ansätze, wie z. B. dem GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard als Scope 2 und Scope 3 Emissionen integriert werden. Des Weiteren gewinnt mit der Corporate Social Responsibility (CSR) Richtlinie auch das Thema „Klimaneutralität innerhalb der Lieferketten“ immer mehr an Bedeutung. Ist ein Zulieferer (z. B. Original Equipment Manufacturer, OEM) für die Herstellung bestimmter Zerspanungsprodukte verantwortlich, können die mit den Zerspanungsprozessen verbundenen THG-Emissionsdaten an das auftraggebende Unternehmen einfach und transparent für dessen THG-Bilanz weitergegeben werden.

Schon dem Green Deal vorangegangene politische Programme und Regulative (z. B. Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2016 und Agenda 2030, CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz) und ein stetig steigendes Umweltbewusstsein der Kunden sowie die daraus resultierende Erwartungshaltung führen zunehmend dazu, dass Unternehmen die mit ihrer Tätigkeit verbundenen Umweltwirkungen hinsichtlich ihrer Organisation, ihrer Produkte, ihrer Prozesse oder ihrer Dienstleistungen bewerten und verbessern müssen. Ein offensives Umweltmanagement zur Identifizierung von Risiken und Chancen (Stichwort: Carbon Risk Management) wird bzw. ist daher für Unternehmen wettbewerbsentscheidend. Der praxisorientierte EEMA und der damit verbundene lebenszyklusorientierte Carbon Accounting Ansatz sollen ein Unternehmen genau dabei unterstützen, die eigenen oder auch fremd gesetzte Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele effizient zu erreichen, um so die organisationseigene Umweltperformanz stetig zu verbessern.

Die Innovation der vorliegenden Forschungsarbeit liegt zusammenfassend in der ganzheitlichen und praxisorientierten Energiebedarfsmodellierung von Zerspanungsprozessen unter Berücksichtigung der konstanten und variablen Verbrauchergruppen einer Werkzeugmaschine in Abhängigkeit der Betriebszustände. Der parametrisierte Ansatz ermöglicht, in Konformität mit den Anforderungen der zugrunde liegenden Rahmenmethoden (LCA nach DIN EN ISO 14040:2020 und DIN EN ISO 14044:2020 sowie Carbon Accounting nach DIN EN ISO 14067:2019) ein effizientes LCA, wodurch nicht nur Verbesserungspotenziale für die Datenlandschaft im entsprechenden Forschungsbereich, sondern auch ein zeit- und kosteneffizienter, lebenszyklusorientierter Carbon Accounting Ansatz für Unternehmen durch die Wiederverwendungsmöglichkeit von Primärdaten zur Verfügung gestellt werden konnte. Durch die Ausweisung der PKV und weiterer Hintergrundinformationen wird ein transparentes Systemverständnis geschaffen, welches nicht zuletzt zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen zur THG-Emissionsminderung im unternehmensinternen Prozessablauf herangezogen werden kann. Das Erkennen solcher Potenziale ist ein erster Baustein in der systematischen und nachhaltigen Reduzierung des Energiebedarfs und damit verbunden der THG-Emissionen im verarbeitenden Gewerbe und liefert somit einen Beitrag zu den Klimazielen auf nationaler und europäischer Ebene auf dem Weg hin zu einer „sauberen Produktion“.

## 10 Literaturverzeichnis

- AGEB (2021): Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2020. Energieverbrauch nach Sektoren. Hg. v. AG Energiebilanzen e. V. (AGEB). Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2021, zuletzt geprüft am 15.02.2022.
- Ahrens, Volker (2016): Interpretation des PDCA-Zyklus nach DIN EN ISO 9001:2015 als Meta-Vorgehensmodell. In: Arbeitspapiere der Nordakademie. Online verfügbar unter <https://d-nb.info/1096367769/34>, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Ahsen, Anette von (2019): Einführung in die Nachhaltigkeitsleistungsmessung in Unternehmen. In: Annett Baumast, Jens Pape und Simon Weihofen (Hg.): Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern. Grundlagen und Praxisbeispiele. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, S. 31–41.
- Aramcharoen, Ampara; Mativenga, Paul T. (2014): Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy. In: Journal of Cleaner Production 78, S. 63–74. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.04.065.
- ArePron (2020): Agiles ressourceneffizientes Produktionsnetzwerk - ArePron. Transferprojekt. Projektförderung im Rahmen des operationellen Programms für die Förderung von Investitionen in Wachstum und Beschäftigung in Hessen aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014 bis 2020 (IWB-EFRE-Programm Hessen). Unter Mitarbeit von Julia Zeulner, Phillip Bausch, Cordula Czwick, Lukas Hartmann, Stefan Kugler, Markus Schreiber et al. Hg. v. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. Online verfügbar unter <https://www.arepron.com/>, zuletzt geprüft am 01.11.2022.
- Armstrong, J. Scott; Collopy, Fred (1992): Error Measures For Generalizing About Forecasting Methods: Empirical Comparisons. In: International Journal of Forecasting 1992, S. 69–80.
- Bach, Vanessa; Berger, Markus; Henßler, Martin; Kirchner, Martin; Leiser, Stefan; Mohr, Lisa et al. (2016): Messung von Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Balogun, Vincent Aizebeoje; Mativenga, Paul Tarisai (2013): Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. In: Journal of Cleaner Production 41, S. 179–186. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.015.
- Barnes, R. S. (1976): The Energy Involved in Producing Materials. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, S. 153–161.
- Bauerdick, Christoph J.H.; Helfert, Mark; Menz, Benjamin; Abele, Eberhard (2017): A Common Software Framework for Energy Data Based Monitoring and Controlling for Machine Power Peak Reduction and Workpiece Quality Improvements. In: Procedia CIRP 61, S. 359–364. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.226.
- Baumast, Annett; Pape, Jens; Weihofen, Simon (Hg.) (2019): Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern. Grundlagen und Praxisbeispiele. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- Beermann, Marina; Wick, Kordula (2019): Erweiterte Input-Output-Analyse (EEIO). In: Annett Baumast, Jens Pape und Simon Weihofen (Hg.): Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern. Grundlagen und Praxisbeispiele. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, S. 251–268.
- Berwanger, Jörg; Feess, Eberhard; Günther, Edeltraud; Krumme, Jan-Hendrik; Voigt, Kai-Ingo (2019): 250 Keywords Umweltmanagement: Grundwissen für Manager. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- BMU (2021): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. 1. Auflage. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Berlin. Online

- verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_zahlen\\_2021\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf), zuletzt geprüft am 03.10.2022.
- BMU; UBA (2013): Umweltkennzahlen in der Praxis. Ein Leitfaden zur Anwendung von Umweltkennzahlen in Umweltmanagementsystemen mit dem Schwerpunkt auf EMAS. 1. Auflage. Unter Mitarbeit von Reinhard Peglau, Daniel Weiß, Roman Müller und Saskia Lössl. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Umweltbundesamt (UBA). Berlin. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/umweltkennzahlen\\_in\\_der\\_praxis\\_leitfaden\\_barrierefrei.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/umweltkennzahlen_in_der_praxis_leitfaden_barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Brecher, Christian; Weck, Manfred (2019): Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1. Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 9. Auflage. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Brondi, C.; Carpanzano, E. (2011): A modular framework for the LCA-based simulation of production systems. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (3), S. 305–312. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.06.006.
- Bundesregierung (2021): Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. KSG. Online verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Glaeserne\\_Gesetze/19.\\_Lp/ksg\\_aendg/Entwurf/ksg\\_aendg\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/ksg_aendg/Entwurf/ksg_aendg_bf.pdf), zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Buxmann, Kurt; Kistler, Paola; Rebitzer, Gerald (2009): Independent information modules—a powerful approach for life cycle management. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 14 (1), S. 92–100. DOI: 10.1007/s11367-009-0075-7.
- Campitelli, Alessio; Cristóbal, Jorge; Fischer, Julia; Becker, Beatrix; Schebek, Liselotte (2019): Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining processes using life cycle assessment methodology. In: *Journal of Cleaner Production* 222, S. 464–475. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.073.
- Cerutti, Alessandro K.; Calvo, Angela; Bruun, Sander (2014): Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. In: *Journal of Cleaner Production* 64, S. 396–403. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.09.027.
- Choi, A.C.K.; Kaebernick, H.; Lai, W. H. (1997): Manufacturing processes modelling for environmental impact assessment. In: *Journal of Materials Processing Technology* 70 (1-3), S. 231–238. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00067-8.
- CiP (2021): Deckel Maho - DMC 50H. Maschinenkurzbeschreibung. Unter Mitarbeit von Tobias Biegel.
- COM (2021): „Fit für 55“: auf dem Weg zur Klimaneutralität – Umsetzung des EU-Klimaziels für 2030. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Hg. v. Europäische Kommission (COM). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>, zuletzt aktualisiert am 14.07.2021, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Cooper, Joyce Smith; Noon, Michael; Kahn, Ezra (2012): Parameterization in Life Cycle Assessment inventory data: review of current use and the representation of uncertainty. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (6), S. 689–695. DOI: 10.1007/s11367-012-0411-1.
- Cowie, Annette; Eckard, Richard; Eady, Sandra (2012): Greenhouse gas accounting for inventory, emissions trading and life cycle assessment in the land-based sector: a review. In: *Crop and Pasture Science* 63 (3), S. 284. DOI: 10.1071/CP11188.



- Curran, Mary Ann (2006): US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice. EPA 600/R-06/060. Hg. v. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati. Online verfügbar unter <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF>, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- DeBoer, Benjamin; Nguyen, Nam; Diba, Fereydoon; Hosseini, Ali (2021): Additive, subtractive, and formative manufacturing of metal components: a life cycle assessment comparison. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 115 (1-2), S. 413–432. DOI: 10.1007/s00170-021-07173-5.
- Degner, W.; Wolfram, F. (1990): Energetisch rationelle Fertigung im Maschinenbau. In: Werkstechnik und Maschinenbau (80), S. 311–315.
- Degner, Werner; Lutze, Hans; Smejkal, Erhard (2019): Spanende Formung. Theorie - Berechnung - Richtwerte. 18., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Denkena, Berend; Abele, Eberhard; Brecher, Christian; Dittrich, Marc-André; Kara, Sami; Mori, Masahiko (2020): Energy efficient machine tools. In: CIRP Annals. DOI: 10.1016/J.CIRP.2020.05.008.
- Diaz, Nancy; Helu, Moneer; Jayanathan, Stephen; Chen, Yifen; Horvath, Arpad; Dornfeld, David (2010): Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, S. 1–6. DOI: 10.1109/ISSST.2010.5507763.
- Diaz, Nancy; Redelsheimer, Elena; Dornfeld, David (2011): Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use. In: Jürgen Hesselbach und Christoph Herrmann (Hg.): Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Bd. 53. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 263–267.
- Dietmair, A.; Verl, A. (2009): Energy consumption forecasting and optimisation for tool machines. In: MM Science Journal 2009 (01), S. 63–67. DOI: 10.17973/MMSJ.2009\_03\_20090305.
- Dietmair, Anton; Verl, Alexander (2008): Energy consumption modeling and optimization for production machines. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hg.): IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). Singapore, Singapore: IEEE, S. 574–579.
- DIN 8580:2003, 09.2003: Fertigungsverfahren.
- DIN 8589-0:2003-09, 09.2003: Fertigungsverfahren Spanen.
- DIN CEN ISO/TS 14027:2018: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen.
- DIN CEN ISO/TS 14071:2016: Umweltmanagement - Ökobilanz.
- DIN EN ISO 9001:2015: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen.
- DIN EN ISO 14001:2015: Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung.
- DIN EN ISO 14040:2020: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN EN ISO 14044:2020: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.
- DIN EN ISO 14064-1:2019: Treibhausgase – Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene.
- DIN EN ISO 14067:2019: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten.
- DIN EN ISO 50001:2018: Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung.

- Draganescu, F.; Gheorghe, M.; Doicin, C. V. (2003): Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. In: *Journal of Materials Processing Technology* 141 (1), S. 9–15. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00930-5.
- Duflou, J. R.; Kellens, K.; Dewulf, W. (2011): Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: A state of the art. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2), S. 129–135. DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.01.008.
- DWDS (n. d.): Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (DWDS). Stichwort: Vergleichbarkeit. Hg. v. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (BBAW). Online verfügbar unter <https://www.dwds.de/wb/Vergleichbarkeit>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.
- Eberspächer, Philipp (2017): Zustandsmodellbasierte, steuerungsnaher Energieverbrauchsoptimierung von Werkzeugmaschinen. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 62).
- ecoinvent (2021a): Datenbank ecoinvent v3.8. Unter Mitarbeit von Katrin Treyer.
- ecoinvent (2021b): Documentation of Scope 2 and 3 separation of electricity GHG emissions in ecoinvent v3.8. Available in the Reports section of ecoQuery. Unter Mitarbeit von Minas N. Bourgault G. Hg. v. ecoinvent Association.
- ecoinvent (2021c): electricity emission factors - scope 2 - 3 in ecoinvent v3.8.xlsx. Available in the reports section of ecoQuery. Unter Mitarbeit von Minas N. Bourgault G. Hg. v. ecoinvent Association, zuletzt geprüft am 13.05.2022.
- Eisenträger, Sandra; Schiefer, Ekkehard (2019): Eco-indicators of Machining Processes. In: Liselotte Schebek, Christoph Herrmann und Felipe Cerdas (Hg.): *Progress in Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing (Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management), S. 17–25.
- Ericsson, Anna; Erixon, Gunnar (1999): *Controlling design variants. Modular product platforms*. New York: Society of Manufacturing Engineers; ASME Press.
- ETA (2022): Messmittel in der ETA-Fabrik. Hg. v. ETA Fabrik. Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW). Online verfügbar unter <https://eta-fabrik.de/aktuell/news/maschinenausstattung/messmittel-in-der-eta-fabrik/>, zuletzt aktualisiert am 2020, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- European Commission; Joint Research Centre; Institute for Environment and Sustainability (2010): *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. General guide for life cycle assessment: detailed guidance*. Luxembourg: Publications Office of the European Union (Scientific and technical research series, EUR 24708).
- eurostat (2022): Electricity prices by type of user (online data code: TEN00117). Hg. v. eurostat. European Union. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=en>, zuletzt aktualisiert am 21.10.2022, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Faludi, Jeremy; Bayley, Cindy; Bhogal, Suraj; Iribarne, Myles (2015): Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. In: *Rapid Prototyping Journal* 21 (1), S. 14–33. DOI: 10.1108/RPJ-07-2013-0067.
- Fibich, Andreas (2022): Klimaschutz: Auswirkungen auf Unternehmen. Aktuelle Gesetze & Studien. Nr. 4446838. Hg. v. Industrie- und Handelskammer Nordschwarzwald (IHK). Online verfügbar unter <https://www.ihk.de/nordschwarzwald/innovationn/umweltschutz-umwelt-akademie/energie-und-klimaschutz/news-energie-ressourcen-klimaschutz/klimaschutz-auswirkungen-auf-unternehmen-4446838>, zuletzt geprüft am 23.10.2022.

- Filleti, Remo Augusto Padovezi; Silva, Diogo Aparecido Lopes; Da Silva, Eraldo Jannone; Ometto, Aldo Roberto (2017): Productive and environmental performance indicators analysis by a combined LCA hybrid model and real-time manufacturing process monitoring: A grinding unit process application. In: *Journal of Cleaner Production* 161, S. 510–523. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.158.
- Finkbeiner, Matthias (2012): *Umweltmanagement für kleine und mittlere Unternehmen: die Normenreihe ISO 14000 und ihre Umsetzung. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage.* Berlin.
- Forin, Siliva; Martinez-Blanco, Julia; Finkbeiner, Matthias (2019): Die organisationsbezogene Ökobilanz (OLCA). In: Annett Baumast, Jens Pape und Simon Weihofen (Hg.): *Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern. Grundlagen und Praxisbeispiele.* Stuttgart: Eugen Ulmer KG, 127-157.
- Förtsch, Gabi; Meinholz, Heinz (2018): *Handbuch Betriebliches Umweltmanagement. 3. Auflage.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Fratila, Domnita (2010): Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. In: *Journal of Cleaner Production* 18 (10-11), S. 1031–1039. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.01.017.
- Fraunhofer ISI; Waide Strategic Efficiency (2017): Technical assistance study for the assessment of the feasibility of using "points system" methods in the implementation of Ecodesign Directive (2009/125/EC). Task 4. Machine Tools Case Study. Hg. v. Europäische Kommission (COM). Brüssel, Belgien.
- Furberg, Anna; Fransson, Kristin; Zackrisson, Mats; Larsson, Mikael; Arvidsson, Rickard (2020): Environmental and resource aspects of substituting cemented carbide with polycrystalline diamond: The case of machining tools. In: *Journal of Cleaner Production* 277, S. 123577. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123577.
- GaBi (2019): GaBi LCA Datenbanken. Extension database X: Manufacturing processes.
- Gabrisch, Chris; Cerdas, Felipe; Herrmann, Christoph (2019): Product System Modularization in LCA Towards a Graph Theory Based Optimization for Product Design Alternatives. In: Liselotte Schebek, Christoph Herrmann und Felipe Cerdas (Hg.): *Progress in Life Cycle Assessment.* Cham: Springer International Publishing (Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management), S. 37–44.
- GHG Protocol (n. d.): Quantifying the greenhouse gas emissions of products. PAS 2050 & the GHG Protocol Product Standard. Online verfügbar unter [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards\\_supporting/GHG%20Protocol%20PAS%202050%20Factsheet.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/GHG%20Protocol%20PAS%202050%20Factsheet.pdf), zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Ginting, Yogie Rinaldy; Boswell, Brian; Biswas, Wahidul; Islam, Nazrul (2015): Advancing Environmentally Conscious Machining. In: *Procedia CIRP* 26, S. 391–396. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.087.
- Grünebaum, Timm; Hermann, Lennard; Trauth, Daniel; Bergs, Thomas (2019): Towards sustainable production: a methodology to assess influences between life cycle phases in tool manufacturing. In: *Procedia CIRP* 80, S. 376–381. DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.001.
- Günther, Edeltraud (2022): *Umweltleistung.* Gabler Wirtschaftslexikon. Hg. v. Springer Gabler. Heidelberg. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/umweltleistung-52346/version-275484>, zuletzt aktualisiert am 14.02.2018, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Guo, Yansong; Duflou, Joost R.; Qian, Jun; Tang, Hao; Lauwers, Bert (2015): An operation-mode based simulation approach to enhance the energy conservation of machine tools. In: *Journal of Cleaner Production* 101, S. 348–359. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.097.

- Gupta, Munish Kumar; Song, Qinghua; Liu, Zhanqiang; Pruncu, Catalin Iulian; Mia, Mozammel; Singh, Gurraj et al. (2020): Machining characteristics based life cycle assessment in eco-benign turning of pure titanium alloy. In: *Journal of Cleaner Production* 251, S. 119598. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119598.
- Gutowski, Timothy; Dahmus, Jeffrey; Thiriez, Alex (2006): Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. In: *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2006)*, S. 623–628.
- Haupt, Melanie; Kägi, Thomas; Hellweg, Stefanie (2018): Life cycle inventories of waste management processes. In: *Data in brief* 19, S. 1441–1457. DOI: 10.1016/j.dib.2018.05.067.
- Hauschild, M.; Jeswiet, J.; Alting, L. (2005): From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. In: *CIRP Annals* 54 (2), S. 1–21. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60017-1.
- He, Y.; Liu, F.; Wu, T.; Zhong, F-P; Peng, B. (2012): Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226 (2), S. 255–266. DOI: 10.1177/0954405411417673.
- Heidenhain (2010): *Aspekte der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen*. Technische Information. Hg. v. Dr. Johannes Heidenhain GmbH, zuletzt aktualisiert am 09/2010.
- Heijungs, R. (1998): Towards eco-efficiency with LCA's prevention principle: an epistemological foundation of LCA using axioms. In: Judith E. M. Klostermann (Hg.): *Product Innovation and Eco-efficiency. Twenty-three Industry Efforts to reach the Factor 4*. Dordrecht: Springer Netherlands (Eco-efficiency and Industry).
- Ingarao, Giuseppe (2017): Manufacturing strategies for efficiency in energy and resources use: The role of metal shaping processes. In: *Journal of Cleaner Production* 142, S. 2872–2886. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.182.
- ISO 14026:2017: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen.
- ISO 14955-1:2017, 11.2017: Machine tools — Environmental evaluation of machine tools.
- ISO 14955-3:2019, 19.07.2019: Machine tools — Environmental evaluation of machine tools.
- Kafara, M.; Süchting, M.; Kemnitzer, J.; Westermann, H.-H.; Steinhilper, R. (2017): Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and Additive Manufacturing in Mold Core Making for CFRP Production. In: *Procedia Manufacturing* 8, S. 223–230. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.028.
- Kaltschmitt, Martin; Schebek, Liselotte (2015): *Umweltbewertung für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kara, S.; Bogdanski, G.; Li, W. (2011): Electricity Metering and Monitoring in Manufacturing Systems. In: Jürgen Hesselbach und Christoph Herrmann (Hg.): *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–10.
- Kara, S.; Li, W. (2011): Unit process energy consumption models for material removal processes. In: *CIRP Annals* 60 (1), S. 37–40. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.018.
- Kellens, Karel; Dewulf, Wim; Duflou, Joost R. (2010): The CO2PE!-Initiative (Cooperative Effort on process emissions in manufacturing). In: *Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation ERSCP-EMSU conference*. Online verfügbar unter file:///C:/Users/j.zeulner/Downloads/391\_Kellens.pdf, zuletzt geprüft am 21.10.2022.
- Kellens, Karel; Dewulf, Wim; Overcash, Michael; Hauschild, Michael Z.; Duflou, Joost R. (2012a): Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part

- 2: case studies. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2), S. 242–251. DOI: 10.1007/s11367-011-0352-0.
- Kellens, Karel; Dewulf, Wim; Overcash, Michael; Hauschild, Michael Z.; Duflou, Joost R. (2012b): Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (1), S. 69–78. DOI: 10.1007/s11367-011-0340-4.
- Khanna, Navneet; Shah, Prassan; Lacalle, Luis Noberto López de; Rodríguez, Adrián; Pereira, Octavio (2021): In pursuit of sustainable cutting fluid strategy for machining Ti-6Al-4V using life cycle analysis. In: *Sustainable Materials and Technologies* 29, e00301. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00301.
- Khanna, Navneet; Wadhwa, Jwalant; Pitroda, Anjali; Shah, Prassan; Schoop, Julius; Sarıkaya, Murat (2022): Life cycle assessment of environmentally friendly initiatives for sustainable machining: A short review of current knowledge and a case study. In: *Sustainable Materials and Technologies* 32, e00413. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00413.
- König, Wilfried; Klocke, Fritz (1996): *Fertigungsverfahren Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Lademann, Tobias (2020): *Aufwands-Nutzenbewertung von Ansätzen des Nonintrusive Load Monitorings an industriellen Produktionsmaschinen und Produktionslinien*. Bachelorarbeit. Studiengang: Maschinenbau - Mechanical and Process Engineering (B.Sc.), Technische Universität Darmstadt. Unter Mitarbeit von Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold, M.Sc. Dipl.-Ing. Johannes Sossenheimer und M.Sc. Bastian Dietrich, 16.09.2020.
- Lehmann, Martin (2020a): cable production, connector for computer, without plugs - GLO. ecoinvent v3.7.1 dataset documentation. Hg. v. ecoinvent. Eidgenössische Materialprüf- und -forschungsanstalt (EMPA).
- Lehmann, Martin (2020b): cladding production, crossbar-pole, aluminium - RER. ecoinvent v3.7.1 dataset documentation. Hg. v. ecoinvent. Eidgenössische Materialprüf- und -forschungsanstalt (EMPA).
- Lewandowski, Stefanie; Ullrich, André; gronau, Norbert (2021): Normen zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. In: *Industrie 4.0 Management 2021* (4), S. 17–20. DOI: 10.30844/I40M\_21-4\_S17-20.
- Li, W.; Kara, S. (2011): An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 225 (9), S. 1636–1646. DOI: 10.1177/2041297511398541.
- Lin-Hi, Nick (2019): Messung der wahrgenommenen CSR-Leistung durch Stakeholder – Ein fragebogenbasierter Ansatz. In: Annett Baumast, Jens Pape und Simon Weihofen (Hg.): *Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern. Grundlagen und Praxisbeispiele*. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, S. 209–221.
- Liu, Tiantian; Wang, Qunwei; Su, Bin (2016): A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, S. 68–79. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.050.
- Lozano-Medina, Alexis; Pérez-Báez, Sebastián Ovidio; Alamo, Antonio Luis; Blanco-Marigorta, Ana María (2018): A parametric environmental life cycle assessment of newspaper making in Spain. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23 (6), S. 1240–1260. DOI: 10.1007/s11367-017-1366-z.
- Lu, Tao; Kudaravalli, Ravikumar; Georgiou, George (2018): Cryogenic Machining through the Spindle and Tool for Improved Machining Process Performance and Sustainability: Pt. II, Sustainability

- Performance Study. In: *Procedia Manufacturing* 21, S. 273–280. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.121.
- Mashhadi, Ardeshir Raihanian; Behdad, Sara (2017): Ubiquitous Life Cycle Assessment (U-LCA): A Proposed Concept for Environmental and Social Impact Assessment of Industry 4.0. In: *Manufacturing Letters*. DOI: 10.1016/j.mfglet.2017.12.012.
- May, Gökan; Stahl, Bojan; Taisch, Marco; Kiritsis, Dimitris (2017): Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. In: *Journal of Cleaner Production* 167, S. 1464–1489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.191.
- Metternich, Joachim; Zeulner, Julia; Schreiber, Markus; Bausch, Phillip; Sossenheimer, Johannes; Weyand, Astrid et al. (2021): Fit für die Zukunft - Ressourceneffizienz in Produktionsprozessen. 1. Aufl. Hg. v. Hessen Trade & Invest GmbH. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2021/3442\\_ArePron\\_Ressourceneffizienz-Produktion\\_2021\\_web.pdf](https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2021/3442_ArePron_Ressourceneffizienz-Produktion_2021_web.pdf), zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Mia, Mozammel; Gupta, Munish Kumar; Lozano, Jose Adolfo; Carou, Diego; Pimenov, Danil Yu.; Królczyk, Grzegorz et al. (2019): Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V. In: *Journal of Cleaner Production* 210, S. 121–133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.334.
- Millet, D.; Bistagnino, L.; Lanzavecchia, C.; Camous, R.; Poldma, Tiiu (2007): Does the potential of the use of LCA match the design team needs? In: *Journal of Cleaner Production* 15 (4), S. 335–346. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.07.016.
- Moradnashad, Mariyeh; Unver, Hakki Ozgur (2017): Energy efficiency of machining operations: A review. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 231 (11), S. 1871–1889. DOI: 10.1177/0954405415619345.
- Mori, M.; Fujishima, M.; Inamasu, Y.; Oda, Y. (2011): A study on energy efficiency improvement for machine tools. In: *CIRP Annals* 60 (1), S. 145–148. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.099.
- Mourtzis, D.; Doukas, M.; Bernidaki, D. (2014): Simulation in Manufacturing. Review and Challenges. In: *Procedia CIRP* 25, S. 213–229. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.032.
- Mourtzis, Dimitris; Vlachou, Ekaterini; Milas, Nikolaos; Dimitrakopoulos, George (2016): Energy Consumption Estimation for Machining Processes Based on Real-time Shop Floor Monitoring via Wireless Sensor Networks. In: *Procedia CIRP* 57, S. 637–642. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.110.
- Müller, David (2020): Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. 3., wesentlich überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1785583>.
- Narita, Hirohisa; Desmira, Nelfa; Fujimoto, Hideo (2008): Environmental Burden Analysis for Machining Operation Using LCA Method. In: Mamoru Mitsuishi, Kanji Ueda und Fumihiko Kimura (Hg.): *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. London: Springer London, S. 65–68.
- Panagiotopoulou, Vasiliki Christina; Stavropoulos, Panagiotis; Chrystolouris, George (2022): A critical review on the environmental impact of manufacturing: a holistic perspective. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118 (1-2), S. 603–625. DOI: 10.1007/s00170-021-07980-w.
- Papula, Lothar (1999): *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Vektoranalysis Wahrscheinlichkeitsrechnung Mathematische Statistik Fehler- und Ausgleichsrechnung*. 3., verbesserte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Viewegs Fachbücher der Technik).

- PAS 2050:2011: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. Online verfügbar unter <https://biolatina.com/wp-content/uploads/2018/08/PAS2050.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Pavanaskar, Sushrut; McMains, Sara (2015): Machine Specific Energy Consumption Analysis for CNC-Milling Toolpaths. In: Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 2015. DOI: 10.1115/DETC2015-48014.
- Pehnt, Martin (2006): Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. In: Renewable Energy 31 (1), S. 55–71. DOI: 10.1016/j.renene.2005.03.002.
- Pereira, O.; Rodríguez, A.; Fernández-Abia, A. I.; Barreiro, J.; López de Lacalle, L. N. (2016): Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. In: Journal of Cleaner Production 139, S. 440–449. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.08.030.
- Peverali, François; Ullrich, André (2021): Umweltorientiertes Prozessmanagement: Integration von Standards des Umweltmanagements und der Nachhaltigkeitsberichterstattung in eine betriebliche Prozessarchitektur. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 58 (1), S. 181–196. DOI: 10.1365/s40702-020-00698-5.
- Rebitzer, Gerald (2005): Enhancing the Application Efficiency of Life Cycle Assessment for Industrial Uses. Dissertation (N° 3307). Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Online verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/147902423.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Recchioni, Marco; Mandorli, Ferruccio; Germani, Michele; Faraldi, Paolo; Polverini, Davide (2007): Life-Cycle Assessment simplification for modular products. In: Shozo Takata und Yasushi Umeda (Hg.): Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses. London, 2007: Springer London, S. 53–58.
- Reinhardt, Saskia Katrin Christina (2013): Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Technische Universität München, Dissertation, 2013. München: Utz (Forschungsberichte IWB, 278).
- Schebek, Liselotte; Campitelli, Alessio; Fischer, Julia; Kannengießer, Jan; Abele, Eberhard; Bauerdick, Christoph et al. (2017): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0. Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. Berlin.
- Schiefer, Ekkehard (2001): Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2000. Aachen: Shaker (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung).
- Schiefer, Ekkehard; Eisenträger, Sandra; Steinberg, Iris; Kutschmann, Jana (2017): EcoScreen – Ökobilanzierung von Fertigungsverfahren. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (11), S. 727–730. DOI: 10.3139/104.111815.
- Serres, Nicolas; Tidu, Dorian; Sankare, Simon; Hlawka, Françoise (2011): Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. In: Journal of Cleaner Production 19 (9-10), S. 1117–1124. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.12.010.
- Shah, Prassan; Bhat, Prathamesh; Khanna, Navneet (2021a): Life cycle assessment of drilling Inconel 718 using cryogenic cutting fluids while considering sustainability parameters. In: Sustainable Energy Technologies and Assessments 43, S. 100950. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100950.
- Shah, Prassan; Khanna, Navneet; Maruda, Radoslaw W.; Gupta, Munish Kumar; Krolczyk, Grzegorz M. (2021b): Life cycle assessment to establish sustainable cutting fluid strategy for drilling Ti-6Al-4V. In: Sustainable Materials and Technologies 30, e00337. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00337.

- Sihag, Nitesh; Sangwan, Kuldip Singh (2020): A systematic literature review on machine tool energy consumption. In: Journal of Cleaner Production 275, S. 123125. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123125.
- Sonnemann, Guido; Vigon, Bruce (2011): Global guidance principles for life cycle assessment databases. A basis for greener processes and products - 'Shonan Guidance Principles'. Paris, France: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. Online verfügbar unter <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Global%20Guidance%20Principles.pdf>, zuletzt geprüft am 11.10.2022.
- Sossenheimer, Johannes (2020): Messkampagne EMAG VLC 100Y für die Qualifikationsarbeit von Tobias Lademann (2020). Darmstadt, 07.10.2020. E-Mail an Julia Zeulner. Expertenbefragung.
- Sossenheimer, Johannes; Vettera, Oliver; Abele, Eberhard; Weigold, Matthias (2020): Hybrid virtual energy metering points – a low-cost energy monitoring approach for production systems based on offline trained prediction models. In: Procedia CIRP 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Sossenheimer, Johannes; Walther, Jessica; Fleddermann, Jan; Abele, Eberhard (2019): A Sensor Reduced Machine Learning Approach for Condition-based Energy Monitoring for Machine Tools. In: Procedia CIRP 81, S. 570–575. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.157.
- statista (2020): Definition Root Mean Square Error (RMSE; dt.: Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme). Lexikon. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Berlin. Online verfügbar unter [https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/303/root\\_mean\\_square\\_error/](https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/303/root_mean_square_error/), zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- statista (2022): Umsatz im deutschen Maschinenbau nach ausgewählten Sektoren in den Jahren 2020 und 2021. Hg. v. statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173637/umfrage/branchenumsatz-des-maschinenbaus-in-deutschland-nach-sektoren/>, zuletzt aktualisiert am 03.2021, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Stechemesser, Kristin; Guenther, Edeltraud (2012): Carbon accounting: a systematic literature review. In: Journal of Cleaner Production 36, S. 17–38. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.02.021.
- Steiner, Roland; Frischknecht, Rolf (2007): Metals Processing and Compressed Air Supply. Data v2.0 (2007). ecoinvent report No. 23, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- Steubing, Bernhard; Mutel, Christopher; Suter, Florian; Hellweg, Stefanie (2016): Streamlining scenario analysis and optimization of key choices in value chains using a modular LCA approach. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 21 (4), S. 510–522. DOI: 10.1007/s11367-015-1015-3.
- thinkstep (2018a): Process data set: Steel high-alloyed machining (0.47 kg shavings per 1 kg part); single route, at plant; 0.47 kg shavings per 1 kg part (en). GaBi LCA Datenbank Dokumentation. Hg. v. Sphera Solutions GmbH. Online verfügbar unter <http://gabi-documentation-2019.gabi-software.com/xml-data/processes/a5d69385-bea1-4152-8361-597ff4f45ce7.xml>, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- thinkstep (2018b): Process data set: Steel turning (adjustable); single route, at plant; adjustable (en). GaBi LCA Datenbank Dokumentation. Hg. v. Sphera Solutions GmbH. Online verfügbar unter <http://gabi-documentation-2019.gabi-software.com/xml-data/processes/d2aee344-beba-40bf-ab71-938be91aaad3.xml>, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Triebe, M. J.; Mendis, G. P.; Zhao, F.; Sutherland, J. W. (2018): Understanding Energy Consumption in a Machine Tool through Energy Mapping. In: Procedia CIRP 69, S. 259–264. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.041.



- UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- UBA (2021a): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Unter Mitarbeit von Petra Icha, Thomas Lauf und Gunter Kuhs. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA).
- UBA (2021b): Nationales Treibhausgasinventar 2021, 12/2020; Presseinformation 07/2021 vom 15.03.2021; Jährliche Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Nach Kategorien. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedi en%2F361%2Fdokumente%2F2022\\_03\\_15\\_trendtabellen\\_thg\\_nach\\_sektoren\\_v1.0.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedi en%2F361%2Fdokumente%2F2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK), zuletzt aktualisiert am 15.03.2021, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- VDI 4800-1:2016: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien.
- VDW (2021): Marktbericht 2020. Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie und ihre Stellung im Weltmarkt. Hg. v. Verband Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V. (VDW). Online verfügbar unter <https://vdw.de/publikationen/>, zuletzt aktualisiert am 06.2021, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Vukelic, Djordje; Simunovic, Katica; Simunovic, Goran; Saric, Tomislav; Kanovic, Zeljko; Budak, Igor; Agarski, Boris (2020): Evaluation of an environment-friendly turning process of Inconel 601 in dry conditions. In: Journal of Cleaner Production 266, S. 121919. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121919.
- Weihofen, Simon (2019): Carbon-, Water-, Land-Footprinting Ansätze. In: Annett Baumast, Jens Pape und Simon Weihofen (Hg.): Betriebliche Nachhaltigkeitsleistung messen und steuern. Grundlagen und Praxisbeispiele. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, S. 83–95.
- WRI; WBCSD (2004): The Greenhouse Gas Protocol – A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised Edition. Online verfügbar unter <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>, zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- WRI; WBCSD (2011): Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. Online verfügbar unter [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard\\_041613.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf), zuletzt geprüft am 23.10.2022.
- Wübbenhorst, Klaus (2020): Benchmarking. Definition: Was ist "Benchmarking"? Hg. v. Gabler Wirtschaftslexikon. Springer Nature. Wiesbaden. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/benchmarking-29988>, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- Yoon, Hae-Sung; Kim, Eun-Seob; Kim, Min-Soo; Lee, Jang-Yeob; Lee, Gyu-Bong; Ahn, Sung-Hoon (2015): Towards greener machine tools – A review on energy saving strategies and technologies. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 48, S. 870–891. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.100.
- Yoon, Hae-Sung; Lee, Jang-Yeob; Kim, Min-Soo; Ahn, Sung-Hoon (2014): Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling. In: Journal of Cleaner Production 78, S. 54–62. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.061.
- Zhang, Yingjie (2015): Review of recent advances on energy efficiency of machine tools for sustainability. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 229 (12), S. 2095–2108. DOI: 10.1177/0954405414539490.
- Zhong, Qianqian; Tang, Renzhong; Lv, Jingxiang; Jia, Shun; Jin, Mingzhou (2016): Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 82 (9-12), S. 2087–2099. DOI: 10.1007/s00170-015-7477-4.

- Zhou, Lirong; Li, Fangyi; Wang, Yue; Wang, Liming; Wang, Geng (2022): A new empirical standby power and auxiliary power model of CNC machine tools. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technolog* 120 (5-6), S. 3995–4010. DOI: 10.1007/s00170-021-08274-x.
- Zhou, Lirong; Li, Jianfeng; Li, Fangyi; Meng, Qiang; Li, Jing; Xu, Xingshuo (2016): Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. In: *Journal of Cleaner Production* 112, S. 3721–3734. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093.
- Zimmermann, Till (2013): Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (1), S. 49–60. DOI: 10.1007/s11367-012-0467-y.
- Zschieschang, Eva; Pfeifer, Peter; Schebek, Liselotte (2012): Modular Server – Client – Server (MSCS) Approach for Process Optimization in Early R&D of Emerging Technologies by LCA. In: David A. Dornfeld und Barbara S. Linke (Hg.): *Leveraging technology for a sustainable world. Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012, Bd. 32. Berlin: Springer, S. 119–124.

## Anhang

### A.1 Gegenüberstellung etablierter Standards zur THG-Bilanzierung und THG-Berichterstattung

Tabelle 46 zeigt die Gegenüberstellung der THG-Bilanzierungsstandards GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (WRI und WBCSD 2004), THG-Quantifizierung und Berichterstattung nach DIN EN ISO 14064-1:2019, Quantifizierung des CFP nach DIN EN ISO 14067:2019 sowie Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard (WRI und WBCSD 2011). Die Standards werden hinsichtlich ihrer Angaben zu nachfolgenden Punkten verglichen: Untersuchungsebene; Anforderungen; Untersuchungsrahmen; zu berichtende Emissionen; THG-Daten: Auswahl, Erfassung und Quantifizierung; zeitlicher Gültigkeitsbereich; Kritische Prüfung; Bewertung und Berücksichtigung von THG-Minderungsprojekten (engl. Offsetting).

Tabelle 46: Gegenüberstellung etablierter THG-Bilanzierungs-Standards

	<b>GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (WRI und WBCSD 2004)</b>	<b>THG-Quantifizierung und Berichterstattung nach DIN EN ISO 14064-1:2019</b>	<b>Quantifizierung des CFP nach DIN EN ISO 14067:2019</b>	<b>Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard (WRI und WBCSD 2011)</b>
<b>Untersuchungsebene</b>	Organisationsebene	Organisationsebene	Produktebene (bzw. Ebene der FU)	Produktebene
<b>Anforderungen</b>	Relevanz, Vollständigkeit, Konsistenz, Transparenz, Genauigkeit		Lebenswegbetrachtung, relativer Ansatz und funktionelle oder deklarierte Einheit, iterativer Ansatz, Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes, Relevanz, Vollständigkeit, Konsistenz, Transparenz, Genauigkeit, Kohärenz, Keine Doppelzählungen	Relevanz, Vollständigkeit, Konsistenz, Transparenz, Genauigkeit sowie sonstige Anforderungen nach DIN EN ISO 14044:2020
<b>Untersuchungsrahmen</b>	Unternehmens- bzw. Organisationsbereich, entweder definiert durch den Anteilsansatz (nach Kapitalbeteiligung) oder dem Steuerungsansatz (nach finanzieller oder operativer Kontrolle)		Gesamter Lebensweg eines Produktes oder partielle Lebenswegabschnitte (z. B. Lebenswegabschnitt oder einzelner Produktionsprozess)	Gesamter Lebensweg eines Produktes

<b>Zu berichtende Emissionen</b>	<p>Nach dem Kyoto-Protokoll reglementierte THG (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, H-FKW/HFCs, FKW/PFCs, SF<sub>6</sub>) (zzgl. freiwilliger Angaben)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Scope 1: direkte THG-Emissionen, verursacht z. B. durch selbst erzeugten Strom oder die eigene Fahrzeugflotte</li> <li>– Scope 2: indirekte THG-Emissionen durch zugekaufte und verbrauchte Energie, z. B. Strom- oder Wärmeverbrauch</li> <li>– Scope 3: weitere indirekte THG-Emissionen, die z. B. durch Dienstleister oder Zulieferer verursacht werden (optionale Reporting-Kategorien) (Upstream- bzw. Downstream-Aktivitäten)</li> </ul>	<p>Nach dem Kyoto-Protokoll reglementierte THG (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, H-FKW/HFCs, FKW/PFCs, SF<sub>6</sub>) (zzgl. freiwillige Angaben)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Direkte THG-Emissionen: getrennte Ausweisung der reglementierten THG in t CO<sub>2</sub>Äq</li> <li>– Indirekte THG-Emissionen: in Abhängigkeit von Wesentlichkeitskriterien<sup>1</sup> auszuwählen</li> </ul>	<p>Alle vom Produktsystem abgegebenen und entzogenen THG, die potenziell Auswirkungen auf den Klimawandel haben, aggregiert in der Einheit kg CO<sub>2</sub>Äq je kg Emissionen</p>	<p>CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, H-FKW/HFCs, FKW/PFCs, SF<sub>6</sub> (zzgl. freiwilliger Angaben)<sup>9</sup></p>
<b>THG-Daten: Auswahl, Erfassung und Quantifizierung</b>	<p>Alle relevanten THG-Quellen und -Senken sind innerhalb des Untersuchungsrahmens zu identifizieren und zu dokumentieren. Alle THG-Emissionen (direkt und indirekt) sind gesamtheitlich einzubinden und müssen in Übereinstimmung mit den festgelegten Kategorien der THG-Bilanzen erfasst werden. Es erfolgt die begründete Auswahl eines geeigneten Quantifizierungsmodells, i. d. R. faktorielle Berechnung durch Emissionsfaktoren<sup>2</sup>, und die Berechnung und Ausweisung der THG-Emissionen in t CO<sub>2</sub>Äq. Die Ergebnisse werden auf Unternehmensebene hochskaliert.</p>		<p>Erhebung aller CFP relevanten Daten (z. B. durch Messung, Schätzung) und Quantifizierung der Inputs und Outputs des Prozessmoduls bezogen auf die FU.<sup>3</sup> Basierend auf dem LCA wird für die Wirkungskategorie Klimawandel die Summe der abgegebenen und entzogenen THG-Emissionsmengen des untersuchten Produktsystems berechnet (angegeben in Masse CO<sub>2</sub>Äq).<sup>4</sup></p>	<p>Erhebung der Input- und Outputdaten aller Prozesse innerhalb der Systemgrenzen. Dabei sind für die unternehmenseigenen Prozesse (im Eigentum oder unter Kontrolle) Primärdaten zu erheben und eine Prüfung der Datenqualität durchzuführen. Unterscheidung der Daten hinsichtlich „direkte Emissionen“, „Aktivitätsdaten“ sowie „EF“ → faktorielle Berechnung der produktbezogenen THG-Emissionen in der Einheit [kg CO<sub>2</sub>Äq]</p>
<p>Empfehlung: Anwendung des durch den IPCC veröffentlichten THG-Potenzials in der Einheit kg CO<sub>2</sub>Äq je kg Emissionen mit einem Zeitrahmen von 100 Jahren (GWP100)</p>				

<b>Zeitlicher Gültigkeitsbereich</b>	Festlegung eines historischen Basisjahres <sup>5</sup> (z. B. ein Jahr oder bei Saisonalität der Geschäftstätigkeit, ein Teil eines Jahres), für Vergleichsstudien und zur Erfüllung des THG-Programms. Nachfolgende THG-Bilanzen sind aus Gründen der Konsistenz für denselben Zeitraum durchzuführen. Ändern sich grundlegende Strukturen des Unternehmens oder der Organisation, welche eine Veränderung der THG-Bilanzierung zur Folge haben, ist eine Anpassung der Basisjahrdaten durchzuführen. Jegliche Änderung ist begründet und transparent zu dokumentieren.	Der zeitliche Gültigkeitsbereich der Daten ist mit dem Zeitrahmen gleichzusetzen, der die Repräsentativität des quantifizierten Werts des CFP widerspiegelt.	Der zeitliche Gültigkeitsbereich für die Gesamt-THG-Emissionsmenge ist vom Unternehmen anzugeben und beruhend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen festzulegen (ansonsten ggf. aus sektoralen Leitlinien abzuleiten, oder aus Produktvorschriften). Ansonsten soll ein Mindestzeitraum von 100 Jahren einschließlich der EoL-Phase gewählt werden.	
<b>Kritische Prüfung</b>	Entwicklung eines organisationsspezifischen, basisjahrbezogenen Prüfungsansatzes zur Kontrolle wesentlicher kumulativer Veränderungen hinsichtlich der Basisjahr-Emissionen durch z. B. strukturelle Veränderungen hinsichtlich der Berichts- oder Organisationsgrenzen oder einer veränderten Berechnungsmethodik bzw. der Anwendung neuer Emissionsfaktoren. <sup>6</sup>	Zur Erhöhung der Glaubwürdigkeit und der Transparenz des CFP wird die Durchführung einer Kritischen Prüfung in Übereinstimmung mit ISO/TS 14071 empfohlen.	Eigene Prüfmethode, die sog. „Assurance“: THG-Emissionen sind von einer weiteren unabhängigen Partei zu prüfen und eine Zuverlässigkeitserklärung ist durch das Unternehmen auszustellen (inkl. Ergebnisse der Prüfung, Angaben zu externer Prüfung und Interessenskonflikten etc.)	
<b>Bewertung und Berücksichtigung von THG-Minderungsprojekten</b>	Einbeziehung von THG-Minderungsprojekten ist erlaubt; Vergleich der THG-Emissionen nach Umsetzung des THG-Minderungsprojektes auf Unternehmens- bzw. Organisationsebene und den Referenzdaten des Basisjahres im zeitlichen Verlauf. <sup>7</sup>	Einbeziehung von THG-Minderungsprojekten ist erlaubt; Das THG-Minderungsprojekt, dessen räumliche und zeitliche Grenzen, der gewählte Bewertungsansatz sowie die Zuordnung der eingesparten THG-Emissionen hinsichtlich direkter bzw. indirekter THG-Emissionen sind zu dokumentieren. Die durch dessen Umsetzung erzielten Einsparungen sind separat zum eigentlichen THG-Bericht auszuweisen.	THG-Reduktionen aus THG-Minderungsprojekten dürfen nicht mit dem CFP oder dem partiellen CFP verrechnet werden (es sei denn, die Minderung tritt direkt im Produktsystem auf). Der CFP dient vielmehr der Transparenzschaffung der auftretenden THG-Emissionen entlang des Produktlebensweges und somit der möglichen Identifizierung von THG-Minderungspotenzialen. <sup>8</sup>	Anteilige Ausweisung der THG-Emissionen bezogen auf die einzelnen Lebenswegphasen; Einbeziehung von THG-Minderungsprojekten ist erlaubt, dies ist aber separat auszuweisen (Kompensationen sind auf Basis international anerkannter Programme, z. B. GHG Protocol for Project Accounting, zu erwerben und es ist eine klare Trennung zwischen Käufen auf Unternehmens- und Produktebene zur Vermeidung von Doppelzählungen auszuweisen)

<sup>1</sup> Die Wesentlichkeit begründet sich durch die Größenordnung der Emissionen, den Einflussgrad auf Quellen bzw. Senken, den Zugang zu Informationen und die Genauigkeit der zugeordneten Daten.

<sup>2</sup> Empfehlung für die Anwendung des GHG-Protocol Corporate Standard: Nutzung von Daten zur eingekauften Menge an kommerziellen Brennstoffen und veröffentlichten Emissionsfaktoren für Scope 1 (z. B. vom IPCC), Daten zum gemessenen Stromverbrauch und lieferantenspezifischen, lokalen Netz- oder anderen veröffentlichten Emissionsfaktoren für Scope 2, Aktivitätsdaten, wie Kraftstoffverbrauch oder Passagierkilometer, und veröffentlichten Emissionsfaktoren für Scope 3.

<sup>3</sup> Bei Daten, die wesentlich die THG-Bilanz bestimmen könnten, ist eine detaillierte Dokumentation hinsichtlich Datenqualität, Datenerhebungsverfahren, Zeitrahmen etc. erforderlich.

<sup>4</sup> Beim partiellen CFP ist entsprechend nur das Produktsystems des untersuchten Prozesses oder Lebenswegabschnittes zu berücksichtigen.

<sup>5</sup> Bei unzureichender Datenlage hinsichtlich historischer THG-Emissionen, kann der Zeitraum der ersten THG-Bilanz als Basisjahr festgelegt werden.

<sup>6</sup> Empfehlung: Prüfung der Emissionsdaten durch externe Stellen (z. B. Wirtschaftsprüfer) und Eingliederung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes in ein PDCA-basiertes Managementsystem inkl. des Setzens von Minderungszielen und einer diesbezüglichen Erfolgskontrolle.

<sup>7</sup> Der GHG Protocol Project Quantification Standard beschreibt das Vorgehen, wenn THG-Reduktionen aus THG-Minderungsprojekten als Kompensation anderer vom Unternehmen bzw. der Organisation verursachter THG-Emissionen verwendet werden sollen (Stichwort: Carbon Offset, Offsetting bzw. CO<sub>2</sub>-Verrechnung).

<sup>8</sup> Der Umgang mit Footprint-Angaben, Angaben zum Offsetting sowie zur Klimaneutralität werden in ISO 14026 und ISO 14021 beschrieben.

<sup>9</sup> Hinweis: Der Produktinventarisierungsbereich unterscheidet sich von dem Konzept der Scopes entsprechend des GHG Protocol Corporate Standard.

## A.2 Erkenntnisse aus dem Transferprojekt „ArePron“

Im Rahmen des Transferprojektes „Agiles ressourceneffizientes Produktionsnetzwerk – ArePron“<sup>70</sup> wurde der Einfluss der dynamischen und standortübergreifenden Vernetzung und Überwachung von Produktionssystemen auf die Ressourceneffizienz von industriellen Produktionsprozessen unter Einsatz zentraler Technologien der Digitalisierung erforscht.<sup>71</sup> Hierfür wurde ein exemplarischer Produktionsablauf aus der metallverarbeitenden Industrie abgebildet, für welchen ein agiles Produktionsnetzwerk zwischen zwei Lernfabriken, der ETA-Fabrik<sup>72</sup> und der Prozesslernfabrik CiP<sup>73</sup> an der TU Darmstadt, geschaffen wurde. Innerhalb des Produktionsnetzwerks wurde dabei das Produkt „Kugellabyrinth aus Chromstrahl (Werkstoff X14CrMoS17)“ beispielhaft gefertigt, da es repräsentativ gängige Fertigungsprozessschritte der metallverarbeitenden Industrie vereint. Das Produkt konnte dabei mittels unterschiedlicher Produktionspfade im Produktionsnetzwerk, bestehend aus den Prozessschritten Sägen, Drehen, Fräsen, Reinigen, Lasergravieren sowie Härten, hergestellt werden. Für die einzelnen Prozessschritte standen verschiedene Werkzeugmaschinen zur Verfügung. Diese bildeten das Produktionsnetzwerk ab. Es wurde je nach prozess- und planungsspezifischen Umgebungsbedingungen untersucht, welcher der möglichen Fertigungspfade unter Berücksichtigung vordefinierter Zielgrößen (Ressourceneffizienz, Zeit und Kosten) als der Optimalste angesehen werden konnte. Hierfür wurden für jeden Produktionsschritt die relevanten Daten, wie Prozessparameter oder die maschinen- bzw. prozessspezifischen Ressourcenverbräuche, erfasst und abgespeichert. Zur Analyse und Auswertung des Ressourcenverbrauchs wurde eine Informations- und Kommunikationsplattform aufgebaut, welche die Zuordnung konkreter Ressourcenverbräuche zu einzelnen Bauteilen ermöglichte. Hierbei lag der Fokus auf der ganzheitlichen Betrachtung eines Produktionsnetzwerkes. Zudem konnten durch die detaillierte Datenanalyse Optimierungspotenziale im Prozessablauf aufgedeckt sowie eine vergleichbare Bewertungsgrundlage als Entscheidungsgrundlage für einen verbesserten Ressourceneinsatz innerhalb des untersuchten Wertschöpfungsnetzwerks entwickelt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden mit Vertretern aus der Industrie im projektparallelen Ergebnis- und Methodentransfer diskutiert und im Rahmen des Leitfadens „Fit für die Zukunft – Ressourceneffizienz in Produktionsprozessen“ am Ende des Projektes der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt (Metternich et al. 2021; ArePron 2020).

Innerhalb des Transferprojektes ArePron konnte durch eigene Forschungsanstrengungen eine Methodik zur Bewertung des Ressourcenbedarfs und der damit verbundenen ökologischen Auswirkungen des agilen Produktionsnetzwerks auf Basis des VDI-Standards VDI 4800-1:2016 entwickelt werden (Metternich et al. 2021). Im Rahmen der strukturierten Aufnahme der betrieblichen materiellen Ressourcen wurden nachfolgende Ressourcenkategorien für das untersuchte Produktionsnetzwerk identifiziert (Metternich et al. 2021):

- Energie, elektrisch

---

<sup>70</sup> Projektförderung im Rahmen des operationellen Programms für die Förderung von Investitionen in Wachstum und Beschäftigung in Hessen aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014 bis 2020 (IWB-EFRE-Programm Hessen).

<sup>71</sup> Die am Transferprojekt ArePron beteiligten Institute waren das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) (Koordination) unter Leitung von Professor E. Abele und Professor J. Metternich, das Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft (Institut IWAR) unter Leitung von Professorin L. Schebek sowie das Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) unter Leitung von Professor R. Anderl der TU Darmstadt.

<sup>72</sup> Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion (ETA)

<sup>73</sup> Center für industrielle Produktivität (CiP)

- Druckluft
- Wasser
- Kühlschmiermittel
- Prozessgase
- Sonstige Betriebsstoffe
- Abfallstoffe
- Abwärme

Im Rahmen der lebenszyklusorientierten Analyse der eingesetzten energetischen und stofflichen betrieblichen materiellen Ressourcen wurden die wesentlichen Treiber im Hinblick auf die Ressourcenperformanz der spezifischen Produktionsprozesse im Rahmen einer Hotspotanalyse ermittelt. Während dabei alle Input- und Outputströme bzw. Ressourcenaufwendungen pro Fertigungsprozess entweder basierend auf einer messtechnischen kontinuierlichen sowie temporären Erfassung in den beiden Lernfabriken oder basierend auf maschinenspezifischen Betriebsdaten (z. B. Datenblättern) im Rahmen der Sachbilanz erfasst wurden, konnten durch die sehr detaillierte Analyse innerhalb des LCIA die maßgeblich an den Umweltwirkungen beteiligten Ressourcenströme der betrachteten Fertigungsprozesse herausgefiltert werden (Metternich et al. 2021). Abbildung 25 stellt beispielhaft die Erfassungsarten der Input- und Outputströme für einen Zerspanungsprozess entsprechend der relevanten Ressourcenkategorien dar.

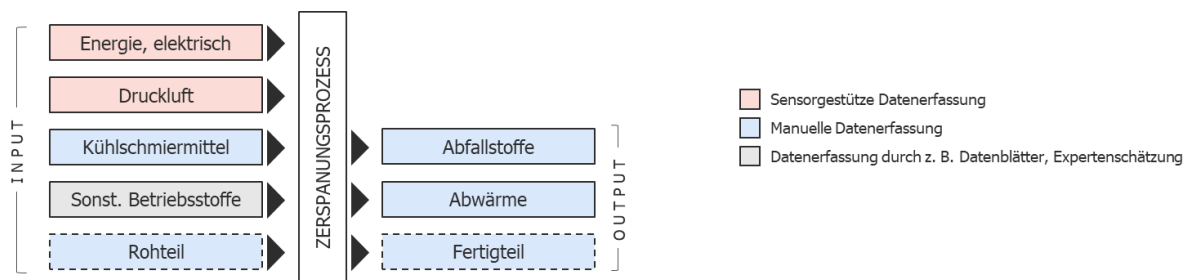


Abbildung 25: Datenerfassungsarten aller Input- und Outputströme pro Zerspanungsprozess nach Ressourcenkategorien (in Anlehnung an Metternich et al. 2021)

Innerhalb des Produktionsnetzwerks wurden nachfolgende Zerspanungsprozesse auf den ausgewiesenen Werkzeugmaschinen untersucht: Sägen auf der Kasto sba A2 (KASTO Maschinenbau GmbH & Co. KG), Drehen auf der Haas ST 10 und Fräsen auf der Haas MM2 (Haas Automation, Inc.) sowie Drehen/Fräsen auf der EMAG VLC 100Y (EMAG GmbH & Co. KG). Hierbei wurden, wie in Tabelle 47 dargestellt, bei der gate-to-gate Betrachtung innerhalb der Sachbilanz für diese Zerspanungsprozesse zunächst relevante Ressourcenkategorien identifiziert und nachfolgend die jeweiligen Stoffströme als Inputs und Outputs bilanziert.



Tabelle 47: Relevante Ressourcenkategorien und Stoffströme des LCA der Zerspanungsprozesse im Transferprojekt ArePron innerhalb des Betriebszustandes „Bearbeitung“

	Ressourcen- kategorie	Sägen Kasto sba A2	Drehen Haas ST 10	Fräsen Haas MM2	Drehen/Fräsen EMAG VLC100Y
INPUT	<b>Elektr. Energie</b>	- Elektr. Energie	- Elektr. Energie	- Elektr. Energie	- Elektr. Energie
	<b>Druckluft<sup>1</sup></b>	- Druckluft	- Druckluft	- Druckluft	- Druckluft
	<b>Kühlschmier- mittel</b>	- Kühlschmieröl für MMS <sup>2</sup>	- KSS-Konzentrat für ÜKS <sup>3</sup> - Wasser (für Emulsion)	- KSS-Konzentrat für ÜKS <sup>3</sup> - Wasser (für ÜKS- Emulsion)	- KSS-Konzentrat für ÜKS <sup>3</sup> - Wasser (für ÜKS- Emulsion)
	<b>Sonst. Betriebsstoffe</b>	- Schmierstoffe - Werkzeug (Sägeband)	- Hydrauliköl - Schmierstoffe - Werkzeug (Schneide)	- Schmierstoffe - Werkzeug (Schneide)	- Kühlmittelkonzentrat - Wasser - Druckluftfilter - Hydrauliköl - Schmierstoffe - Werkzeug (Schneide)
OUTPUT	<b>Abfallstoffe</b>	- Späne - Ausschuss - Sägeband	- Späne - Ausschuss - Alt-KSS-Emulsion - Alt-Hydrauliköl	- Späne - Ausschuss - Alt-KSS-Emulsion - Alt-Hydrauliköl	- Späne - Ausschuss - Alt-KSS-Emulsion - Alt-Hydrauliköl - Altkühlmittel- emulsion - Altfilter
	<b>Abwärme</b>	- Abwärme	- Abwärme	- Abwärme	- Abwärme

<sup>1</sup> Druckluft vom zentralen Kompressor

<sup>2</sup> Minimalmengenschmierung (MMS)

<sup>3</sup> Überflutungskühlschmierung (ÜKS)

Bei den untersuchten Zerspanungsprozessen (Sägen, Drehen, Fräsen) konnte im Rahmen der nachfolgenden LCIA festgestellt werden, dass die berechnete Umweltwirkung<sup>74</sup> maßgeblich durch die Menge an abgespanntem Material beeinflusst wird. Hier sind vor allem die energieintensiven Hintergrundprozesse zur Herstellung des Materials die wesentliche Ursache.

Eine nachfolgende Analyse der übrigen Ressourcenverbräuche und der damit einhergehenden Umweltwirkungen konnte zeigen, dass unter Vernachlässigung des abgespannten Materials, v. a. der Energie- und der Druckluftbedarf relevante Ressourcenströme bei den untersuchten Zerspanungsprozessen bei der Herstellung des Untersuchungsobjektes „Kugellabyrinth“ darstellten. Hierbei war der Energiebedarf für durchschnittlich 61 % der THG-Emissionen verantwortlich (vgl. Metternich et al. 2021).

<sup>74</sup> Die Umweltwirkung, repräsentiert durch die Umweltwirkungskategorie Klimawandel und gemessen in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, wurde im Rahmen des LCA mit dem Wirkungsabschätzungsmodell ReCiPe Midpoint (H) und mit der Open Source Software openLCA (GreenDelta GmbH) sowie unter Verwendung der kommerziellen LCA-Datenbank ecoinvent v3.5 berechnet.

### A.3 LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in ecoinvent (v3.8) und GaBi (2019)

Tabelle 48 listet die LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen innerhalb der LCA-Datenbank ecoinvent (v3.8, cut-off) entsprechend der spezifischen Nomenklatur der Datenbank in englischer Sprache und führt jeweils die Quantifizierung des Inputflusses „Strom“ (engl. electricity) auf. Der zugrunde liegende Referenzfluss der Datensätze ist dabei jeweils 1 kg an abgetragenen Material.

Tabelle 48: LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in ecoinvent (v3.8, cut-off)

Prozessvarianten						Geographischer Bezugsrahmen <sup>2</sup>			Anzahl an Datensätzen
Name	Maschinenspezifizierung (Inputfluss "Strom", [kWh]) <sup>1</sup>	Menge an abgetragenen Material / Prozessspezifikation (Inputfluss "Strom", [kWh]) <sup>1</sup>				RER	RoW	GLO	
aluminium milling	-	average (0,356)	dressing (6,09)	large parts (0,158)	small parts (1,69)	x	x	-	8
cast iron milling	-	average (0,148)	dressing (2,54)	large parts (0,0659)	small parts (0,706)	x	x	-	8
chromium steel milling	-	average (0,67)	dressing (11,50)	large parts (0,30)	small parts (3,19)	x	x	-	8
steel milling	-	average (0,474)	dressing (8,12)	large parts (0,211)	small parts (2,26)	x	x	-	8
market for aluminium removed by milling	-	average (0,356)	dressing (6,09)	large parts (0,158)	small parts (1,69)	-	-	x	4
market for cast iron removed by milling	-	average (0,148)	dressing (2,54)	large parts (0,0659)	small parts (0,706)	-	-	x	4
market for chromium steel removed by milling	-	average (0,67)	dressing (11,5)	large parts (0,298)	small parts (3,19)	-	-	x	4
market for steel removed by milling	-	average (0,474)	dressing (8,12)	large parts (0,211)	small parts (2,26)	-	-	x	4
aluminium drilling	CNC (0,229)	-	-	-	-	x	-	x	4
	conventional (0,0764)								
brass drilling	CNC (0,0625)	-	-	-	-	x	-	x	4
	conventional (0,0208)								
cast iron drilling	CNC (0,167)	-	-	-	-	x	-	x	4
	conventional (0,0556)								
chromium steel drilling	CNC (0,75)	-	-	-	-	x	-	x	4
	conventional (0,25)								
steel drilling	CNC (0,542)	-	-	-	-	x	-	x	4
	conventional (0,181)								

market for aluminium removed by drilling	CNC (0,229)	-	-	-	-	-	-	x	2
	conventional (0,0764)								
market for brass removed by drilling	CNC (0,0625)	-	-	-	-	-	-	x	2
	conventional (0,0208)								
market for cast iron removed by drilling	CNC (0,167)	-	-	-	-	-	-	x	2
	conventional (0,0556)								
market for chromium steel removed by drilling	CNC (0,75)	-	-	-	-	-	-	x	2
	conventional (0,25)								
market for steel removed by drilling	CNC (0,542)	-	-	-	-	-	-	x	2
	conventional (0,181)								
aluminium turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	12
	CNC	(1,83)	(3,29)	(0,362)					
	conventional	(0,347)	(0,561)	(0,134)					
brass turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	12
	CNC	(0,992)	(1,79)	(0,196)					
	conventional	(0,189)	(0,305)	(0,0727)					
cast iron turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	12
	CNC	(1,15)	(2,07)	(0,228)					
	conventional	(0,218)	(0,353)	(0,0842)					
chromium steel turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	12
	CNC	(2,51)	(4,52)	(0,496)					
	conventional	(0,477)	(0,769)	(4,41)					
steel turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	12
	CNC	(1,78)	(3,2)	(0,352)					
	conventional	(0,338)	(0,545)	(4,41)					
market for aluminium removed by turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	-	-	x	6
	CNC	(1,83)	(3,29)	(0,362)					
	conventional	(0,347)	(0,561)	(0,134)					
market for brass removed by turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	6
	CNC	(0,992)	(1,79)	(0,196)					
	conventional	(0,189)	(0,305)	(0,0727)					

Anhang

market for cast iron removed by turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	6
	CNC	(1,15)	(2,07)	(0,228)					
	conventional	(0,218)	(0,353)	(0,0842)					
market for chromium steel removed by turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	6
	CNC	(2,51)	(4,52)	(0,496)					
	conventional	(0,477)	(0,769)	(4,41)					
market for steel removed by turning		average	primarily dressing	primarily roughing	-	x	-	x	6
	CNC	(1,78)	(3,2)	(0,352)					
	conventional	(0,338)	(0,545)	(4,41)					
<b>Gesamt</b>									<b>168</b>

<sup>1</sup> Der Inputfluss "Strom" ändert sich nicht mit geändertem geografischem Bezugsrahmen.

<sup>2</sup> RER: Europe; RoW: Rest-of-World; GLO: Global

Tabelle 49 listet die LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen innerhalb der LCA-Datenbank GaBi (2019) entsprechend der spezifischen Nomenklatur der Datenbank in englischer Sprache und führt jeweils die Quantifizierung des Inputflusses „Strom“ (engl. electricity) auf. Der zugrunde liegende Referenzfluss der Datensätze ist dabei jeweils die Masse des bearbeiteten Endproduktes.

Tabelle 49: LCI-Datensätze zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in GaBi (2019)

Prozessvarianten					Anzahl an Datensätzen
Name	Menge an abgetragenen Material	Spezifikation	Geographischer Bezugsrahmen <sup>1</sup>	Inputfluss "Strom" [MJ]	
aluminium cast part machining	0,02 - 0,04 kg chips	single route, at plant, specific technology	DE	0,77	4
	0,02 - 0,3kg chips			4,42	
	complex			2,69	
	standard			0,34	
Steel cast part machining	<i>not specified</i>	single route, at plant	DE	5,83	1
aluminium machining	19 kg shavings per 1 kg part	single route, at plant, specific technology	DE	34,42	1
cast iron machining	0,05 – 1 kg chips	single route, at plant, specific technology	DE	0,14	1
steel high-alloyed machining	0,47 kg shavings per 1 kg part	single route, at plant	DE	2,26	1
steel turning	adjustable	single route, at plant	DE	3,30	1
titanium machining	1,86 kg shavings per 1 kg part	single route, at plant	DE	26,89	1
				<b>Gesamt</b>	<b>10</b>

<sup>1</sup> DE: Deutschland

#### **A.4 Literaturanalyse zum Thema "LCA von Zerspanungsprozessen"**

Mittels einer Literaturrecherche wurden themenbezogene LCA-Studien in gängigen Literaturdatenbanken ermittelt und die als relevant identifizierte Literatur analysiert. Die Recherche lässt sich, in Anlehnung an das wissenschaftliche Vorgehen nach Mourtzis et al. (2014), in die nachfolgenden vier Schritte aufteilen:

- 1) Grobanalyse: Stichwortbasierte Recherche in wissenschaftlichen Fachdatenbanken,
- 2) Feinanalyse: Identifizierung relevanter Publikationen anhand des Abstracts,
- 3) Detailanalyse: Lektüre des Volltexts und Extraktion relevanter Sachverhalte sowie
- 4) Synthese: Zusammenfügen der Ergebnisse.

Die Literaturrecherche basiert dabei auf der Suche nach wissenschaftlichen Studien und Artikeln aus den wissenschaftlichen Fachdatenbanken Science Direct und Web of Science (Zeitlicher Bezugsrahmen: 2010 bis 2022). Als Suchbegriffe wurden zum Themenfeld passende Schlüsselwörter in englischer Sprache genutzt (z. B. machining process, cutting process, Life Cycle Assessment, metal working industry). Die Literatur- und Wissenssammlung wurde mittels der Schneeball-Technik systematisch erweitert.

Im Rahmen der Detailanalyse wurden aus den identifizierten Studien Informationen extrahiert, die Aufschluss auf das Modellierungsvorgehen geben. Neben der Frage, welche Absicht mit der Anwendung des LCA visiert wurde (vergleichende LCA-Studie, nichtvergleichende LCA-Studie, Methodenentwicklung), wurden die Studien entsprechend nachfolgender Fragen analysiert:

- Welches Ziel verfolgt die Studie (abgeleitet aus der jeweiligen Forschungsfrage)?
- Was ist der Untersuchungsgegenstand?
- Erfolgt eine differenzierte Definition der FU und des Referenzflusses?
- Erfolgt die Berücksichtigung des Inputflusses „Energie- bzw. Strombedarf“
- Wo liegt der Untersuchungsfokus der Studie: auf der reinen Zerspanung, auf dem Betriebszustand „Bearbeitung“ oder werden alle Betriebszustände berücksichtigt?
- Welche Systemgrenzen werden zugrunde gelegt?

Die Ergebnisse der Literaturanalyse, welche detailliert in Kapitel 2.3.2 beschrieben ist, sind in Tabelle 50 entsprechend ihres Veröffentlichungsjahres aufgeführt.

Tabelle 50: Ergebnisdarstellung der Literaturanalyse zum Thema „LCA von Zerspanungsprozessen“

Autoren	Vergleichende LCA	Nicht-Vergleichende LCA	Methodenentwicklung	Ziel	Untersuchungsgegenstand	Definition: FU	Definition: Referenzfluss <sup>5</sup>	Inputfluss: Strom <sup>5</sup>	Fokus auf			Systemgrenzen
									Zerspanung	Betriebszustand „Bearbeitung“	Alle Betriebszustände	
Khanna et al. (2022)	x			Variation der Schnittgeschwindigkeit, des Vorschubs und der axialen Schnitttiefe unter verschiedenen Bedingungen der Schneidstoffversorgung	Drehen (selbst gegossene Metallmatrix-Verbundwerkstoffe AXZ911/10SiC)	Technische Größe (Drehprozess an AXZ911/10SiC MMCs für eine Schnittlänge von 20 mm mit definierten Schnittparametern)	n	j	x			gate-to-gate
DeBoer et al. (2021)	x			Konventioneller Prozess und AF <sup>1</sup>	Gießen, Zerspanen, Binder Jetting, Pulverbettssmelzen, gebundene Pulverextrusion	Produkt (Doppelkardan H-Bügel)	n	j		x		cradle-to-grave
Khanna et al. (2021), (Shah et al. 2021b)	x			Zerspanung mittels FL <sup>2</sup> , kryogener Technologie und MQL <sup>3</sup>	Drehen (Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V ELI)	Zerspanungszeit (1 Minute)	n	j	x			gate-to-gate
Shah et al. (2021a)	x			Zwei kryogene Schneidbedingungen: flüssiges Kohlendioxid und flüssiger Stickstoff	Bohren (Inconel 718)	Technische Größe (1 Bohrloch mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Tiefe von 5 mm)	n	j	x			gate-to-gate

Furberg et al. (2020)	x			PCD und konventionelle Sinterkarbid WC-Co-Werkzeuge	Zerspanung (Titan Legierung) Holzbearbeitung	Technische Größe (Zerspanung: Erzeugte Oberfläche von einem WC-Co- bzw. 0,01 PCD-Werkzeug während seiner Lebensdauer)  (Holzbearbeitung: Abgetragene Masse an Holz von einem WC-Co- bzw. 0,1 PKD-Werkzeug während seiner Lebensdauer)	n	j	x			cradle-to-grave
Gupta et al. (2020)	x			RHVT-MQCF <sup>4</sup> und MQL	Drehen (CNC, reines Titan)	Technische Größe (Bearbeitungsfläche von Titan (Grade-2-Legierung), 150 mm Länge und 50 mm Durchmesser)	n	j		x		cradle-to-grave
Vukelic et al. (2020)	x			Methodik zur Bewertung des Trockendrehprozesses und optimaler Bearbeitungsparameter	Drehen (Inconel 601 mit drei Dreheinsätzen, beschichtet mit TiAlN + AlCr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> durch physikalische Abscheidung aus der Dampfphase)	Zerspanungszeit (1 Stunde CNC-Längsdrehen eines Werkstücks aus Inconel 601 mit den folgenden Abmessungen: 300 mm Länge und 50 mm Durchmesser)	n	j		x		gate-to-gate
Campitelli et al. (2019)	x			FL und MQL	Bohren (Aluminium, Gusseisen und Stahl) Fräsen (Aluminium) Fräsen (Gusseisen und Stahl)	Technische Größe  (3 Bohrungen mit einem Spiralbohrer (Durchmesser d = 8,5 mm, Bohrtiefe 5xd) und einem Spanvolumen von 2,411 mm <sup>3</sup> )  (Fräsfläche von 26.250 mm <sup>2</sup> bei einer Schnitttiefe von 0,2 mm und Fräsvolumen von 5.250 mm <sup>3</sup> )  (Fräsfläche von 2,345 mm <sup>2</sup> bei einer Schnitttiefe von 0,2 mm und einem Fräsvolumen von 469 mm <sup>3</sup> )	j <sup>6</sup>	j		x		gate-to-gate
Mia et al. (2019)	x			Schneidbedingungen (Trockener Zustand, Monostrahl mit kryogenem Flüssigstickstoff und Dualstrahl mit kryogenem Flüssigstickstoff)	Drehen (Gehärtete Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V Titanlegierung)	<i>Nicht definiert</i>	n	j		x		



Grünebaum et al. (2019)		x		Berücksichtigung von lebenszyklusübergreifenden Einflüssen bei der Werkzeugherstellung	Schleifen, Vorbereitung der Schneiden, Beschichtung	Produkt (1 Schaftfräser)	n	j		x		Herstellungs- und Nutzungsphase (im theoretischen Modell werden alle Betriebszustände berücksichtigt)
Eisenträger und Schiefer (2019), (Schiefer 2001)			x	Parametrisierte Kurzbilanzierung spanend zu fertigender Bauteile	Spanende Fertigung	Produkt (Referenzbauteile, z. B. Getriebewelle)	n	j		x		cradle-to-grave (Werkzeugmaschine wird zum Großteil als Blackbox berücksichtigt)
Lu et al. (2018)	x			Zerspanung mittels FL und kryogener Technologie	Fräsen (Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V Rohling)	Produkt (1 Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V Rohling)	n	j			x	cradle-to-grave (Werkzeugmaschine wird als Blackbox berücksichtigt)
Kafara et al. (2017)	x			konventionelle und AF-gestützte IC-Prozesse	Gießen (Niedrigschmelzende Legierung) Fräsen (Aquapour) AF (Hochschlagfestes Polystyrol) AF (Pulverförmige Materialien)	Produkt (15 Formkerne)	n	j		x		cradle-to-grave
Filleti et al. (2017)		x		Schleifprozess, zusammen mit einem kombinierten LCA-Hybridmodell und Echtzeit-Überwachungssystem	Schleifen	Technische Größe (3000 mm <sup>3</sup> Materialabtrag von einem zylindrischen Werkstück durch Schleifen und ohne zwischengeschaltetes Abrichten der Scheibe)	j <sup>7</sup>	j		x		gate-to-gate (entspr. CO <sub>2</sub> PEI-Methode plus Charakterisierung von Maschinenaggregaten)
Pereira et al. (2016)	x			Kombinierte Techniken auf Grundlage von kryogener Kühlung und MMS sowie Alternativen mit nahezu trockenem Kühlmittel	Drehen (AISI 304)	Technische Größe (Spanvolumen beim Drehen eines Teils von Ø59 mm auf Ø32 mm mit Schnittlänge von 150 mm)	n	j		x		gate-to-gate
Faludi et al. (2015)	x			Zwei AF-Maschinen und eine konventionelle CNC-Fräsmaschine	AF, Fräsen	Produkt (2 spezifische Teile aus Acrylnitril-Butadien-Styrol oder einem ähnlichen Polymer)	n	j			x	cradle-to-grave (Werkzeugmaschine wird als Blackbox berücksichtigt)

Ginting et al. (2015)	x			FL und MQL	Zerspanen	Produkt (1 Bolzen: 200 mm Länge, 42 mm Durchmesser)	n	j		x		gate-to-gate
Reinhardt (2013)			x	Bilanzierung und Bewertung des Ressourcenbedarfs von Fertigungssystemen	Sägen Biegen Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen Rührreibschweißen	Produkt (Fertigung eines Druckluftbehälters mit einem Radius von 120 mm und einer Länge von 300 mm aus einem gerollten Blechteil aus Aluminiumlegierung EN AW 6060)	n	j		x		gate-to-gate (Werkzeugmaschine wird als Blackbox berücksichtigt)
Kellens et al. (2012a)			x	Fallstudien, die die Anwendung der CO <sub>2</sub> PEI-Methode veranschaulichen (Screening- und In-Depth-Approach)	Bohren	Technische Größe (Bohren von 4 gleichmäßig verteilten Löchern mit einem Durchmesser von 19,1 mm durch eine Dicke von (50 mm))	j <sup>8</sup>	j			x	gate-to-gate (CO <sub>2</sub> PEI-Methode, Werkzeugmaschine wird als Blackbox berücksichtigt)
Serres et al. (2011)	x			Konventionelle Zerspanung und CLAD-Prozess	Fräsen, Bohren, Drehen, Aufbohren, Entgraten von Werkzeugen (Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V) CLAD-Prozess (Direkte additive Laserfertigung)	Produkt (Bearbeitung eines definierten mechanischen Teils aus Ti <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> V mit einer spezifischen Technologie)	n	j		x		cradle-to-grave
Duflou et al. (2011)		x	(x)	Inventarisierung und Analyse der Prozesse von einzelnen Fertigungseinheiten	Selektives Laserschmelzen	<i>Nicht definiert</i>	j <sup>9</sup>	j			x	gate-to-gate (CO <sub>2</sub> PEI-Methode, Werkzeugmaschine wird als Blackbox berücksichtigt)
Fratila (2010)	x			Nahtrockenbearbeitung und FL-Bearbeitung	Zahnradfräsen (16MnCr5)	Technische Größe (1 kg legiertes Stahlmaterial)	n	j	x			cradle-to-grave
Narita et al. (2008)		x		Umweltbelastungsanalysator für den Betrieb von Werkzeugmaschinen unter verschiedenen Bedingungen der Kühlschmierstoffversorgung	Fräsen	Produkt ( <i>Nicht näher definiert</i> )	n	j		x		gate-to-gate (Umweltbewertung auf der Grundlage von Emissionsfaktoren)

<sup>1</sup> Additive Fertigung (AF), engl. Additive Manufacturing

<sup>2</sup> Flood Lubrication (FL), dt. Überflutungskühlschmierung, als konventioneller Kühlschmierprozess

<sup>3</sup> Minimum Quantity Lubrication (MQL), dt. Minimalmengenschmierung

<sup>4</sup> Ranque-Hilsch Vortex Tube Assisted Minimum Quantity Cutting Fluids (RHVT-MQCF), dt. Ranque-Hilsch Wirbelrohr unterstützte Minimalmengen Kühlschmierstoffe

<sup>5</sup> j: ja / berücksichtigt, n: nein / nicht berücksichtigt

<sup>6</sup> "3 drill holes with FL; 3 drill holes with MQL; Milling with FL; Milling with MQL" (Campitelli et al. 2019)

<sup>7</sup> “The reference flow used in this study was 3000 mm<sup>3</sup> material removal per grinding test (i.e., a complete machining of one workpiece). The UPLCI methodology suggests the use of 1s of processing time as reference flow (Kellens et al., 2012a), however, this may not be the best choice in this case. According to Silva et al. (2015), the use of volume of material removed as reference flow enables a better evaluation of how the variation of grinding parameters can impact the environmental performance indicators in an LCA study of manufacturing processes, in comparison to the use of 1s of processing time” (Filleti et al. 2017).

<sup>8</sup> “[...] generally applicable reference flow of 1 s of processing time for a specified load level of a unit manufacturing process for a specified material, based on a working scheme of 2,000 h/year (250 days with one shift of 8 h and the process start-up/shutdown takes place just before/after the shift starts)” (Kellens et al. 2012b).

<sup>9</sup> “[...] generally applicable reference flow of 1 second of processing time for a specified load level of a unit manufacturing process for a specified material, based on a working scheme of 2000 hours/year (250 days with one shift of 8 hours) including some specified use modes [...]” (Duflou et al. 2011).

### A.5 Evaluation bestehender Energiemodellierungsansätze aus dem Maschinenbau

Im Rahmen einer Literaturrecherche, in Anlehnung an das Vorgehen nach Mourtzis et al. (2014), wurden wissenschaftliche Studien und Artikel aus den wissenschaftlichen Fachdatenbanken Science Direct und Web of Science sowie mittels Google Scholar zum Thema „Modellierung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen“ gesucht. Als Suchbegriffe wurden zum Themenfeld passende Schlüsselwörter in englischer Sprache genutzt (z. B. machining process, energy demand modelling, calculation approach, consumer groups, operating states). Die Literatur- und Wissenssammlung wurde mittels der Schneeball-Technik systematisch erweitert. Entsprechend der in Kapitel 2.2.3 vorgestellten dreigliedrigen Kategorisierung wurden die mittels der Literaturrecherche identifizierten Modelle zur Ermittlung des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen geclustert. Die geclusterte Literatursammlung inkl. der Vorstellung und Erläuterung der spezifischen Leistungs- bzw. Energiebedarfsmodelle sowie die Nennung der in den Studien zur Modellvalidierung untersuchten Beispielprozesse, wird in Tabelle 51 für Kategorie 1, in Tabelle 52 für Kategorie 2 und in Tabelle 53 für Kategorie 3 präsentiert.

Tabelle 51: Modellierungsansätze der Kategorie 1 zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen

KATEGORIE 1	
Autor(en)	Modellierungsansatz
Choi et al. (1997)  <i>Bsp.-Prozess: Kombination (u. a. Fräsen, Pressen, Gießen)</i>	$E = P_C * T_M$ <p>E Energiebedarf des Antriebssystems  <math>P_C</math> Leistungsbedarf des Antriebssystems  <math>T_M</math> Bearbeitungsdauer</p>
Draganescu et al. (2003)  <i>Bsp.-Prozess: Fräsen einer Aluminiumlegierung</i>	$E_{cs} = \frac{P_c}{60\eta Z} \text{ mit } \eta = \frac{P_c}{P_{mc}} = \frac{1}{1+(P_{m1}/P_c)}$ <p><math>E_{cs}</math> Energiebedarf des Zerspanungsprozesses [kWh/cm<sup>3</sup>]  <math>P_c</math> Schneidleistung an der Hauptspindel [kW]  <math>\eta</math> Wirkungsgrad [-]  <math>Z</math> Materialabtragsrate [cm<sup>3</sup>/min]  <math>P_{mc}</math> Leistung des Elektromotors [kW]  <math>P_{m1}</math> Leistungsverlust in der Werkzeugmaschine und des Elektromotors [kW]</p>
Diaz et al. (2011)  <i>Bsp.-Prozess: Fräsen vers. Materialien</i>	$e_{cut} = k * \frac{1}{MRR} + b$ <p><math>e_{cut}</math> Energiebedarf des Zerspanungsprozesses [J/mm<sup>3</sup>]  <math>k</math> Empirischer Koeffizient [W]  <math>MRR</math> Materialabtragsrate [mm<sup>3</sup>/s]  <math>b</math> stationäre spezifische Energie (= konstanter Energieanteil der Maschine) [J/mm<sup>3</sup>]</p>
Kara und Li (2011), Li und Kara (2011)  <i>Bsp.-Prozess: Drehen und Fräsen vers. Materialien</i>	$SEC = c_0 + \frac{c_1}{MRR}$ <p>SEC spezifischer Energiebedarf = Energiebedarf des Zerspanungsprozesses (engl. Specific Energy Consumption) [kJ/cm<sup>3</sup>]  <math>MRR</math> Materialabtragsrate [cm<sup>3</sup>/s]  <math>c_0</math> konstanter Anteil des Energiebedarfs der Maschine<sup>1</sup> [kJ/cm<sup>3</sup>]  <math>c_1</math> Empirischer Koeffizient<sup>1</sup> [kJ/s]</p>

<sup>1</sup>  $c_0$  und  $c_1$  sind hier empirische Koeffizienten und nicht mit der spezifischen Schnittkraft und der Leerlaufleistung gleichzusetzen.

Tabelle 52: Modellierungsansätze der Kategorie 2 zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen

KATEGORIE 2	
Autor(en)	Modellierungsansatz
Gutowski et al. (2006)  <i>Bsp.-Prozess: Bearbeitungsprozesse, wie Fräsen oder Härten</i>	$P = P_0 + k\dot{v}$ <p>P Gesamtleistung der Maschine [W]            P<sub>0</sub> Leerlaufleistung der Nebenaggregate in „unproduktiven“ Phasen [W]            k spezifische Schnittkraft [kJ/cm<sup>3</sup>]  <math>\dot{v}</math> Menge an abgespanntem Material [cm<sup>3</sup>/s]</p>
Mori et al. (2011)  <i>Bsp.-Prozess: Bohren, Plan- bzw. Schaftfräsen oder Tieflöchlbearbeiten</i>	$E = P_1(T_1+T_2)+P_2(T_2)+P_3(T_3)$ <p>E Gesamtenergiebedarf der Maschine [Wh]            P<sub>1</sub> Leistungsbedarf während der Phase Grundlast [W]            P<sub>2</sub> Leistungsbedarf während der Phase Leerlauf [W]            P<sub>3</sub> Leistungsbedarf während der Phase Volllast [W]            T<sub>1</sub> Dauer der Phase Grundlast [h]            T<sub>2</sub> Dauer der Phase Leerlauf [h]            T<sub>3</sub> Dauer der Phase Volllast [h]</p>
Diaz et al. (2011)  <i>Bsp.-Prozess: Fräsen vers. Materialien</i>	$E = p_{avg} * \Delta t = (p_{cut} + p_{air}) * \Delta t$ <p>E Gesamtenergiebedarf der Maschine [Wh]            p<sub>avg</sub> Durchschnittlicher Leistungsbedarf [W]  <math>\Delta t</math> Bearbeitungszeit/-dauer [h]            p<sub>cut</sub> Schneidleistung [W]            p<sub>air</sub> Leistungsbedarf im Luftschnitt [W]</p>
He et al. (2012)  <i>Bsp.-Prozess: Methodenvalidierung mittels des NC-Codes zweier Fräsmaschinen</i>	$E_{total} = E_{spindle} + E_{feed} + E_{tool} + E_{cool} + E_{fix} = \int_{t_{me}}^{t_{ms}} p_m dt + \int_{t_{ce}}^{t_{cs}} p_c dt + \sum_{i=1}^m \int_{t_{fs}}^{t_{fe}} p_i dt + p_{tool} t_{tool} + p_{cool} (t_{coe} - t_{cos}) + (p_{servo} + p_{fan})(t_e - t_s)$ <p>E<sub>total</sub> Gesamtenergiebedarf der Werkzeugmaschine [kWh]            p<sub>m</sub> Leistungsbedarf für die Freigabe der Spindel [W]            p<sub>c</sub> Leistungsbedarf für den Materialabtrag [W]            t<sub>me</sub>-t<sub>ms</sub> Dauer des Spindellaufs [h]            t<sub>ce</sub>-t<sub>cs</sub> Dauer des Schneidvorganges [h]            p<sub>i</sub> Leistungsbedarf des Achsen-Vorschubmotors [W]            t<sub>fei</sub>- t<sub>fsi</sub> Laufzeit des Achsen-Vorschubmotors [h]            p<sub>tool</sub> Leistungsbedarf des Revolvermotors [W]            t<sub>tool</sub> Revolverdrehzeit [h]            p<sub>cool</sub> Leistungsbedarf des Kühlmittelpumpenmotors [W]            t<sub>coe</sub>-t<sub>cos</sub> Laufzeit des Kühlmittelpumpenmotors [h]            p<sub>servo</sub> Leistungsbedarf des Servosystems [W]            p<sub>fan</sub> Leistungsbedarf der Ventilations-/Belüftungsmotoren [W]            t<sub>e</sub>-t<sub>s</sub> Laufzeit der Werkzeugmaschine im gesamten Bereich des NC-Codes [h]</p>

<p>Balogun und Mativenga (2013)</p> <p><i>Bsp.-Prozess: Fräsen an vers. Maschinen</i></p>	$E_t = P_b t_b + (P_b + P_r) t_r + P_{air} t_{air} + (P_b + P_r + P_{cool} + k\dot{v}) t_c = P_b (t_b + t_r + t_r) + P_r t_r + P_{air} t_{air} + (P_r + P_{cool} + k\dot{v}) t_c$ <p> <math>E_t</math> Gesamtenergiebedarf der Werkzeugmaschine [J]  <math>P_b</math> Leistungsbedarf bei Grundlast auf Nebenaggregateebene [W]  <math>P_r</math> Leistungsbedarf, betriebsbereiter Zustand auf Nebenaggregateebene [W]  <math>P_{cool}</math> Leistungsbedarf des Kühlmittelpumpenmotors [W]  <math>t_b</math> Dauer im Energiebedarfszustand <math>E_{Basic}</math> [s]  <math>t_r</math> Dauer im Energiebedarfszustand <math>E_{Ready}</math> [s]  <math>k</math> spezifische Schnittkraft [kJ/cm<sup>3</sup>]  <math>\dot{v}</math> Menge an abgespanntem Material [cm<sup>3</sup>/s]  <math>t_c</math> Dauer des Schneidvorgangs [s]                 </p>
<p>Guo et al. (2015)<sup>1</sup></p> <p><i>Bsp.-Prozess: Kombination (u. a. Bohren, Drehen, Ausdrehen und Nuten)</i></p>	$E_{TOT} = E_{RTM} + E_{MRM} + E_{PTM} = \int_0^t (P_{sp} + P_{ax} + P_{aux}) dt + \int_0^t (P_{mr} + P_{sp} + P_{ax} + P_{aux}) dt + \int_0^t P_{aux} dt$ <p> <math>E_{TOT}</math> Gesamtenergiebedarf für die Bearbeitung eines Produkts [J oder kJ]  <math>E_{RTM}</math> Energiebedarf im Eilgangmodus [J oder kJ]  <math>E_{MTM}</math> Energiebedarf während des Materialabtrags [J oder kJ]  <math>E_{PTM}</math> Energiebedarf im Übergangsmodus [J oder kJ]  <math>P_{mr}</math> Leistungsbedarf für Materialabtrag [W]  <math>P_{sp}</math> Leistungsbedarf für Spindelrotation [W]  <math>P_{ax}</math> Leistungsbedarf für Achsensteuerung [W]  <math>P_{aux}</math> Leistungsbedarf für Hilfsaggregate [W]                 </p>
<p>Pavanaskar und McMains (2015)<sup>2</sup></p> <p><i>Bsp.-Prozess: CNC-Maschinen, Untersuchung auf Aggregatsebene unter dem Einfluss des Werkzeugwegs</i></p>	$E_{machine} = \sum E_{block} = \sum P_{block} * t_{block} = \sum (P_{tare} + P_{cool, pump} + \sum_{i=x,y,z} (KA_{move_i} + (KB_{move_i} * F_i)) + (KA_{spindle} + (KB_{spindle} * N_i)) + \sum_{i=x,y,z} (KA_{cut_i} + (KB_{cut_i} * MRR)) ) * t_{blo}$ <p> <math>E_{block}</math> Energiebedarf auf Aggregateebene  <math>P_{block}</math> Leistungsverbrauch auf Aggregateebene  <math>t_{block}</math> Dauer des Leistungsbedarfs auf Aggregateebene  <math>P_{tare}</math> Konstanter Leistungsbedarf der Nebenaggregate  <math>P_{cool,pump}</math> Leistungsbedarf der Kühlmittelpumpe  <math>F_i</math> Vorschubrate  <math>N_i</math> Spindelgeschwindigkeit  <math>MRR</math> Materialabtragsrate (engl. Material Removal Rate, MRR)  <math>KA, KB</math> Anpassungskonstanten (empirische Konstanten)  <math>KA/KB_{move_i}</math> Anpassungskonstanten für den Bewegungsvorgang der Maschine  <math>KA/KB_{spindle}</math> Anpassungskonstanten für den Rotationsvorgang der Spindel  <math>KA/KB_{cut_i}</math> Anpassungskonstanten für den Schneidvorgang                 </p>

<sup>1</sup> Die Berechnung der einzelnen Leistungsbedarfe ist in der Arbeit weiter durch physikalische Zusammenhänge präzisiert.  
<sup>2</sup> Die Anpassungskonstanten sowie die Leistungsverbräuche zur Bewegung der Maschine und für die eigentliche Bearbeitung werden in Abhängigkeit der drei Hauptachsen (X, Y und Z) aufsummiert.

Tabelle 53: Modellierungsansätze der Kategorie 3 zur Ermittlung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen

KATEGORIE 3	
Autor(en)	Modellierungsansatz
Kellens et al. (2012b) <sup>1</sup>  <i>Bsp.-Prozess:</i> <i>Bohren</i>	$E_{re} = (P_m + \frac{\sum_{i=1}^m (P_i \cdot \frac{T_i}{T_m}) + (\frac{P_s \cdot T_s}{3600}) + (\frac{P_e \cdot T_e}{3600})}{3600}) + \frac{P_{off} \cdot (\frac{16 \cdot (T_s + T_e)}{3600}) + (\frac{115 \cdot 24}{250})}{3600}$ <p> <i>E<sub>re</sub></i> Durchschnittlicher Energiebedarf des Referenzflusses [kWh]  <i>P<sub>m</sub></i> Leistungsbedarf für die Betriebsphase und Nebenzeiten [kW]  <i>P<sub>i</sub></i> Leistungsbedarf während sonst. Maschinenzustände i [kW]  <i>P<sub>s</sub></i> Leistungsbedarf für den Warmlaufzyklus [kW]  <i>P<sub>e</sub></i> Leistungsbedarf für den Abschaltzyklus [kW]  <i>P<sub>off</sub></i> Leistungsbedarf für den Aus-Zustand [kW]  <i>T<sub>m</sub></i> Dauer der Betriebsphase und Nebenzeiten, anteilig [%]  <i>T<sub>i</sub></i> Dauer sonst. Maschinenzustände i, anteilig [%]  <i>T<sub>s</sub></i> Dauer des Warmlaufzyklus [s]  <i>T<sub>e</sub></i> Dauer des Abschaltzyklus [s]         </p>
Dietmair und Verl (2008; 2009a)  <i>Bsp.-Prozess:</i> <i>Schruppbearbeitung auf einer Fräsmaschine</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Messung der Leistungsverbräuche der unterschiedlicher Maschinenaggregate in Abhängigkeit von festgelegten Maschinenstadien als Basis einer Leistungsbedarfsstudie</i></li> <li>- <i>Modellierungsansatz parametrisierbar aus einigen wenigen Grundmessungen</i></li> </ul>
Triebe et al. (2018)  <i>Bsp.-Prozess:</i> <i>CNC-Maschinen</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Modell auf Basis von aggregatsspezifischen Sekundärdaten (aus der Industrie)</i></li> <li>- <i>Szenariobasierte Abbildung von unterschiedlichen Bearbeitungs- bzw. Betriebszyklen</i></li> </ul>

<sup>1</sup> Der aus dem Forschungsbereich des LCA stammende Ansatz wird zur Vollständigkeit an dieser Stelle aufgeführt. Er beschreibt die Ermittlung einer Referenzsekunde des Fertigungsprozesses. Zur Berechnung des Gesamtenergiebedarfs wird ein Arbeitsplan von 2000 h/Jahr (250 Tage bei einer 8h-Schicht; der Anfahrts- und Abfahrtszyklus wird direkt vor bzw. nach Beendigung der Schicht durchgeführt) angelegt.

Entsprechend dieser Kategorisierung werden die identifizierten Modellierungsansätze mittels einer Stärken-und-Schwächen-Analyse hinsichtlich ihres Nutzens für den Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit analysiert.

Unter Berücksichtigung, dass jedem identifizierten Modell eine andere Zielsetzung bei der Entwicklung zugrunde lag, werden die zentralen Stärken und Schwächen der Ansätze zur Bestimmung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen im Hinblick auf das eigene Forschungsinteresse anhand von sechs Bewertungskriterien herausgearbeitet. Diese Bewertungskriterien wurden durch die gewonnenen Erkenntnisse und Anforderungen aus Kapitel 2 abgeleitet. Dabei adressieren diese, ob der jeweilige Modellierungsansatz alle Betriebszustände, die unterschiedlichen Verbrauchergruppen, den konstanten und variablen Leistungsbedarf sowie die Konstruktion der Werkzeugmaschine und die Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks berücksichtigt. Die Erfüllung dieser Eigenschaften spiegelt den Grad der Modellierungsgenauigkeit und -transparenz der Ansätze wider. Zudem wird die Praktikabilität für die Anwendung der Modelle zur Energiebedarfsermittlung innerhalb von Unternehmen oder für LCA-Anwendende abgefragt. Hierbei wird v. a. überprüft, ob die Vorgehensbeschreibung zur Ermittlung festgelegter Konstanten innerhalb der einzelnen Modellierungsansätze hinreichend erklärt wurde, um diese in der Praxis auch ermitteln zu können. Zudem wird bewertet, wie hoch der Aufwand für ein Unternehmen bzw. einen beauftragten LCA-Anwendenden wäre, den jeweiligen Ansatz für die eigene Produktionsumgebung und die Bestimmung

des jeweiligen Leistungs- bzw. Energiebedarfs anzuwenden. Dabei spielt nicht nur eine Rolle, wie leicht verständlich der Ansatz ist, sondern auch, wie hoch der Aufwand zur Bestimmung der einzelnen Parameter ist. Die beschriebenen Bewertungskriterien für bestehende Modellierungsansätze des Energie- bzw. Leistungsbedarfs von Zerspanungsprozessen hinsichtlich der Anforderungen des eigenen Forschungsinteresses sind in Tabelle 54 dargestellt.

Tabelle 54: Bewertungskriterien für bestehende Berechnungsmodelle des Leistungs- bzw. Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen

Berücksichtigung...	Ausprägung <sup>1</sup>	Ziel
[1] ... anderer Betriebszustände.	Ja/Nein/—	Grundlage für parametrisierten LCI-Ansatz
[2] ... der unterschiedlichen Verbrauchergruppen.	Ja/Nein/—	
[3] ... des konstanten/variablen Leistungsbedarfs.	Ja/Nein/—	
[4] ... der Konstruktion der Werkzeugmaschine und der Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks.	Ja/Nein/—	
[5] ... der Vorgehensbeschreibung zur Ermittlung der festgelegten Konstanten.	Ja/Nein/—	Praktikabilität
[6] ... der Praxistauglichkeit für Unternehmen.	Ja/Nein/—	

<sup>1</sup> Unter Ausprägung wird verstanden: „ja“, das Kriterium wird berücksichtigt; „nein“, das Kriterium wird nicht berücksichtigt; „—“ keine Aussage zum jeweiligen Kriterium aus der Berechnungsmodell ableitbar bzw. Kriterium hat für das Berechnungsmodell keine Relevanz.

Nachfolgend werden die identifizierten Modellierungsansätze systematisch nach den oben beschriebenen Bewertungskriterien qualitativ evaluiert.

Die Ansätze der Kategorie 1 (Tabelle 51) konzentrieren sich lediglich auf den Spanabtrag und schließen schlussfolgernd Aufwendungen für nicht wertschöpfende Verbrauchergruppen oder Betriebszustände aus der Bedarfsermittlung aus. Daher werden bei keinem der hier analysierten Berechnungsansätzen (Diaz et al. 2011; Kara und Li 2011; Li und Kara 2011; Draganescu et al. 2003; Choi et al. 1997) die Konstruktion der Werkzeugmaschine und die Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks berücksichtigt, noch auf die unterschiedlichen Verbrauchergruppen der Werkzeugmaschine eingegangen. Ebenso werden bei keinem Ansatz die Leistungsbedarfe differenziert nach den relevanten Verbrauchergruppen berücksichtigt. Der Berechnungsansatz ist bei Diaz et al. (2011) sowie bei Li und Kara (2011) bzw. Kara und Li (2011) grundsätzlich gleich aufgebaut. Ein Vorteil dieser Herangehensweisen ist die eindeutige Berücksichtigung des konstanten und variablen Energiebedarfsanteils. Die Ansätze gebrauchen empirisch zu bestimmende Koeffizienten, um eine Übertragbarkeit auf verschiedene Zerspanungsvorgänge zu ermöglichen. Wie genau diese Koeffizienten zu bestimmen sind, wird nicht beschrieben. Dies macht wiederum eine Anwendung der Modellierungsansätze in der Praxis schwierig. Tabelle 55 zeigt die Bewertungsergebnisse der Modellierungsansätze der Kategorie 1.



Tabelle 55: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Modellierungsansätze der Kategorie 1

Berücksichtigung ...	Modellierungsansätze der Kategorie 1			
	Choi et al. (1997)	Draganescu et al. (2003)	Diaz et al. (2011)	Li und Kara (2011), Kara und Li (2011)
[1] ... anderer Betriebszustände.	Nein	Nein	Nein	Nein
[2] ... der unterschiedlichen Verbrauchergruppen.	Nein	Nein	Nein	Nein
[3] ... des konstanten/variablen Leistungsbedarfs.	Nein	Nein	Ja	Ja
[4] ... der Konstruktion der Werkzeugmaschine und der Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks.	Nein	Nein	Nein	Nein
[5] ... der Vorgehensbeschreibung zur Ermittlung der festgelegten Konstanten.	—	—	Nein	Nein
[6] ... der Praxistauglichkeit für Unternehmen.	Nein	Nein	Nein	Nein

Wie in Tabelle 56 zu sehen, können bei den Modellierungsansätzen der Kategorie 2 zur Bestimmung des Energiebedarfs von Zerspanungsprozessen ebenfalls Ansätze identifiziert werden, die weder die unterschiedlichen Aggregate oder die Konstruktion der Werkzeugmaschine noch die Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks disaggregiert in der Berechnungsmethodik benennen (Diaz et al. 2011; Mori et al. 2011; Gutowski et al. 2006). Die variablen und konstanten Leistungsbedarfe werden bei Guo et al. (2015) differenziert nach den relevanten Verbrauchergruppen berücksichtigt. Diese sehr detaillierte Betrachtungsweise berücksichtigt indirekt über die variablen Leistungsbedarfe somit auch die Konstruktion der Werkzeugmaschine und die Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks. Die konstanten Leistungsbedarfe von Hilfs- bzw. Nebenaggregaten werden (aggregiert oder disaggregiert) in allen untersuchten Berechnungsansätzen ausgewiesen. Dabei gehen alle von der generellen Möglichkeit aus, dass die Leistungsverbräuche an der Werkzeugmaschine messbar sind. Die disaggregierten Ansätze nach He et al. (2012), Balogun und Mativenga (2013), Guo et al. (2015) sowie Pavanaskar und McMains (2015) stellen an ein Unternehmen den Anspruch, dass die Leistungsaufnahmen aller in den Formeln berücksichtigten Verbrauchergruppen messtechnisch erfassbar oder mathematisch berechenbar sind. Der Ansatz von Guo et al. (2015) wird als weniger praxistauglich eingeschätzt, da sich die Ermittlung der verschiedenen aggregierten Leistungsanteile komplex und kleinteilig darstellt. Die Ansätze von Mori et al. (2011) und Diaz et al. (2011) scheinen zunächst leicht umsetzbar, da der Energiebedarf nur am Hauptschalter der Werkzeugmaschine gemessen wird. Allerdings muss für jede nachfolgende Untersuchung erneut eine Primärdatenmessung durchgeführt werden, da die Ansätze durch das Nichtberücksichtigen der Verbrauchergruppen, der Konstruktion der Werkzeugmaschine und der Bearbeitungscharakteristika als nicht übertragbar eingestuft werden. Der Vorteil der Ansätze von He et al., Balogun und Mativenga und Pavanaskar und McMains liegt darin begründet, dass durch die disaggregierte Erfassung der konstanten und variablen Leistungsverbräuche, die Ansätze parametrisierbar sind. In Nachfolgemessungen müssen nur die variablen Energiebedarfe ermittelt werden, die konstanten Verbräuche sind je Bearbeitungsprozess und je Werkzeugmaschine konstant.

Tabelle 56: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Modellierungsansätze der Kategorie 2

Berücksichtigung ...	Modellierungsansätze der Kategorie 2						
	Gutowski et al. (2006)	Mori et al. (2011)	Diaz et al. (2011)	He et al. (2012)	Balogun und Mativenga (2013)	Guo et al. (2015)	Pavanaskar und McMains (2015)
[1] ... anderer Betriebszustände.	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
[2] ... der unterschiedlichen Verbrauchergruppen.	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
[3] ... des konstanten/variablen Leistungsbedarfs.	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
[4] ... der Konstruktion der Werkzeugmaschine und der Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks.	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
[5] ... der Vorgehensbeschreibung zur Ermittlung der festgelegten Konstanten.	Ja	—	—	—	Ja	—	Nein
[6] ... der Praxistauglichkeit für Unternehmen.	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja

Die Modellierungsansätze der Kategorie 3 (Tabelle 57) berücksichtigen alle anteilig die Aufwendungen aller Betriebszustände und somit den TED. Während Dietmair und Verl (2009; 2008) sowie Triebe et al. (2018) laut Erklärung den Leistungsbedarf disaggregiert nach Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Betriebszustände in ihre Modellierungsansätze einbinden, stellen die Autoren die mathematische Modellierung nicht explizit in ihren Studien vor. Deren Bewertung aus einer rein qualitativen Beschreibung ist nur bedingt möglich. Obwohl der Modellierungsansatz nach Kellens et al. (2012b) bereits in Kapitel 2.3.2 vorgestellt wurde, soll dieser aus Gründen der Vollständigkeit erneut innerhalb der vorliegenden Evaluation berücksichtigt und im Vergleich zu den Ansätzen aus dem Forschungsbereich Maschinenbau bewertet werden. Der Leistungsbedarf wird bei Kellens et al. (2012b) nur in Bezug auf die unterschiedlichen Betriebszustände disaggregiert berücksichtigt. Es findet keine Unterscheidung hinsichtlich der konstanten und variablen Leistungsbedarfsanteile statt. Bei dem Modellierungsansatz können daher weder Rückschlüsse über die Konstruktion der Werkzeugmaschine noch über die Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks gezogen werden. Da bei Kellens et al. (2012b) nur eine Leistungsmessung am Hauptschalter stattfindet, ist der Modellierungsansatz hinsichtlich der konstanten und variablen Verbrauchergruppen nicht parametrisierbar, was eine Primärdatenerhebung für alle Nachfolgemessungen notwendig macht (vgl. Kapitel 2.3.2).

Tabelle 57: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Modellierungsansätze der Kategorie 3

	Modellierungsansätze der Kategorie 3		
	Kellens et al. (2012b)	Dietmair und Verl (2008; 2009a)	Triebe et al. (2018)
<b>Berücksichtigung ...</b>			
[1] ... anderer Betriebszustände.	Ja	Ja	Ja
[2] ... der unterschiedlichen Verbrauchergruppen.	Nein	Ja	Ja
[3] ... des konstanten/variablen Leistungsbedarfs.	Nein	—	—
[4] ... der Konstruktion der Werkzeugmaschine und der Bearbeitungscharakteristika des Werkstücks.	Nein	—	—
[5] ... der Vorgehensbeschreibung zur Ermittlung der festgelegten Konstanten.	—	—	—
[6] ... der Praxistauglichkeit für Unternehmen.	Nein	—	—

## A.6 Ableitung typischer Verbrauchergruppen aus der Literatur

Mittels einer eingehenden Literaturrecherche wurde ermittelt, welche typischen Verbrauchergruppen bei spanenden Werkzeugmaschinen charakteristischerweise verbaut sind. Die Literaturrecherche bzw. Literaturanalyse basiert dabei auf wissenschaftlichen Studien, Artikeln und Buchbeiträgen aus wissenschaftlichen Fachdatenbanken, wie ScienceDirect oder Google Scholar (zeitlicher Bezugsrahmen: 2005 bis 2022). Als Suchbegriffe wurden zum Themenfeld passenden Schlüsselwörter in englischer Sprache genutzt (u. a. manufacturing process, machining process, machine unit, energy consumption, modeling oder aggregate).

In untenstehender Tabelle finden sich die Auswertungsergebnisse der innerhalb der Literaturrecherche als relevant identifizierten Studien, welche spezifische Verbrauchergruppen von Werkzeugmaschinen charakterisieren. Für jede Quelle ist aufgeführt, für welchen Werkzeugmaschinentyp die Zuordnung gilt. Aus der untenstehenden Aufstellung wurden mittels eines Clustering-Schrittes die studienspezifischen Energie- bzw. Leistungsbedarfsgruppen eingruppiert. Daraus wurden die in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Verbrauchergruppen abgeleitet.

Tabelle 58: Gegenüberstellung von studienspezifisch ausgewiesenen Aggregaten resp. Verbrauchergruppen spanender Werkzeugmaschinen

Autor	Studien-spezifische Kategorisierung von Verbrauchergruppen		
	$E_{\text{konstant}}$		$E_{\text{variabel}}$
Gutowski et al. (2006) Energieverbraucher einer <u>Fräsmaschine</u>	$E_{\text{Anfahrmodus}}$	$E_{\text{Betriebsphase}}$	- Bearbeitung
	- Computer - Lüfter - Servomotoren - Kühlmittelpumpen - Motoren im Leerlauf	- Maschinenachsen (Jog) - Werkzeugwechsler - Spindel - Späneförderer	
Dietmair und Verl (2009) Leistungsverbraucher einer <u>Fräsmaschine</u>	Leistungsbedarf unterschiedlicher Maschinenkomponenten/-aggregate		
	- Standby-Verluste - Schaltschrank - Schaltschrank (II) - Hydraulik - Antriebe - Spindel - Kühlmittel - Bearbeitung		
He et al. (2012) Energieverbraucher von <u>NC-Werkzeugmaschinen</u>	Energieverbrauchende Komponenten		
	Konstant	Variabel	
	- Lüftermotoren - Servomotor - Etc.	- Spindel - X/Y/Z-Achsenvorschub - Kühlmittelpumpe - Werkzeugwechselsystem	
Balogun und Mativenga (2013) Energieverbraucher einer <u>Fräsmaschine</u>	$E_{\text{Nebenaggregate}}$		$E_{\text{Hauptaggregate}}$
	$E_{\text{Basis}}$	$E_{\text{Ready}}$	$E_{\text{Cutting}}$
	- An-/Warmlaufen - Computereinheit - Beleuchtung - Kühlungslüfter - Schmierer - Motoren im Leerlauf - etc.	- Maschinenspindel - Manuelles Positionieren der Maschinenachsen (Jog) - Pumpen - Servomotoren - Revolver - Späneförderer - etc.	- Werkzeugspitze - Kühlmittel
Pavanaskar und McMains (2015) Leistungsverbraucher von <u>CNC-Werkzeugmaschinen</u>	$P_{\text{const}}$		$P_{\text{variable}}$
	- Steuerungseinheit - Beleuchtung - Kühlmittelpumpen - etc.		- Leistung, die von der Maschine nur für Bewegung (Tisch-, Spindelachsenbewegung und Spindeldrehung) aufgenommen wird - Leistung, die für die Schneidkraft zum Materialabtrag aufgenommen wird

Leistungs- und betriebszustandsbasierte Energiemodellierung				
Guo et al. (2015) Leistungsverbraucher von <u>Werkzeugmaschinen</u>	- Hilfsaggregate (z. B. Kühlmittel-, Hydraulikpumpe, Steuerungen, Ventilatoren und Beleuchtung)	- Spindel-Rotation	- Achsantriebe	- Materialabtrag
Eberspächer (2017) Funktionale Einheiten <sup>1</sup> einer <u>Werkzeugmaschine</u>	E Funktionale Einheiten			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hauptspindel</li> <li>- Übrige Antriebe</li> <li>- Hydraulikaggregat</li> <li>- Kühlaggregat</li> <li>- Späneförderer</li> <li>- Kühlschmierstoffpumpe</li> <li>- Schaltschrank (inkl. Transformatoren und ähnlicher elektr. Komponenten)</li> <li>- Lüfter</li> <li>- Werkzeugwechsler</li> <li>- Arbeitsraumbeleuchtung</li> <li>- Absaugung</li> <li>- Bildschirm</li> <li>- Steuerung</li> <li>- etc.</li> </ul>			
Triebe et al. (2018) Leistungsverbraucher von <u>CNC-Werkzeugmaschinen</u> (mit niedriger und hoher Leistung)	Leistungsbezogene Hilfsaggregate		Leistungsbezogene Hauptaggregate	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Späneförderer</li> <li>- Motor des automatischen Werkzeugwechselarms</li> <li>- Automatischer Werkzeugwechsel-Magnetmotor</li> <li>- Abspülpumpe</li> <li>- Zentraler Werkzeugspeicher</li> <li>- Ölnebelabscheider</li> <li>- Kühler</li> <li>- Skimmer</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spindel-Motor</li> <li>- X-Achse-Servo-Motor</li> <li>- Y-Achse-Servo-Motor</li> <li>- Z-Achse-Servo-Motor</li> <li>- Überflutungspumpe (Düse)</li> <li>- Dreh-Kipp-Tisch</li> </ul>	

<sup>1</sup> Als Funktionale Einheiten werden bei Eberspächer (2017) „Komponenten oder Komponentengruppen [...] [verstanden], die einen Energieverbrauch aufweisen. [...] Eine funktionale Einheit kann [...] ein alleinstehender Lüfter oder sonstiger elektrischer Antrieb sein“ (Eberspächer 2017).

## A.7 Gegenüberstellung von LCI-Daten: Auswahl an LCI-Daten etablierter LCA-Datenbanken

Nachfolgend wird der Auswahlprozess der LCI-Datensätze aus den LCA-Datenbanken ecoinvent (v3.8, cut-off) sowie GaBi (2019) zur Abbildung der in Kapitel 5.2.1 dargestellten Gegenüberstellung begründet. Weitere Angaben zu den erwähnten Datensätzen finden sich auch in der tabellarischen Auflistung in Anhang A.3.

### Datensatzauswahl für Fallbeispiel 1 (Fräsen von Edelstahl) in ecoinvent (v3.8, cut-off)

In den Datensätzen zu metallbearbeitenden Fräsprozessen beruht die Bestimmung des Inputflusses „Strom“ auf den bereits in Kapitel 2.3.1 aufgeführten Quellen Barnes (1976) sowie Degner und Wolfram (1990). Degner und Wolfram (1990) weisen in ihrer Arbeit den Energiebedarf für unterschiedliche Prozessarten aus. Durch Steiner und Frischknecht (2007), die Ersteller der relevanten ecoinvent-Datensätze, wird hierzu die erste Annahme getroffen, dass es sich bei dem zu bearbeitenden Material jeweils um Stahl handelt, da in der Primärquelle keine weiteren Angaben vorhanden sind. Diese Energiebedarfswerte für die unterschiedlichen Prozessarten werden durch die Arbeit von Barnes (1976), welcher Energiebedarfsverhältnisse für das Fräsen verschiedener Materialien ausgewiesen hat, auf unterschiedliche Materialtypen übertragen. Durch Steiner und Frischknecht (2007) wird der Strombedarf für den Fräsprozess von Chromstahl unter der Annahme geschätzt, dass der Energiebedarf für das Fräsen von Stahl und Chromstahl im gleichen Verhältnis wie beim Drehprozess nach den Angaben von Barnes (1976) steht (vgl. Tabelle 60). Der Durchschnittsdatensatz für das Fräsen wird durch die Kombination der spezifischen Fräsprozesse (large parts, small parts, dressing) erzeugt. Hierbei wird angelehnt an die Ergebnisse von Barnes (1976) angenommen, dass 90 % des „average“-Fräsprozesses aus dem spezifischen Fräsprozess „milling, large parts“, 9 % aus dem spezifischen Fräsprozess „milling, small parts“ und 1 % aus dem spezifischen Fräsprozess „milling, dressing“ besteht. Die den ecoinvent-Datensätzen zugrunde liegenden Hintergrunddaten für den Energiebedarf metallbearbeitender Fräsprozesse sind untenstehend aufgelistet (Tabelle 59).

Tabelle 59: Hintergrunddaten zur Modellierung des Energiebedarfs für metallbearbeitende Fräsprozesse nach Steiner und Frischknecht (2007)

	<b>Steel</b> MJ/t	<b>Chromium Steel</b> MJ/t	<b>Cast Iron</b> MJ/t	<b>Aluminium</b> MJ/t		
Milling <sup>1</sup>	800	1130	250	600		
Proportion relative to steel <sup>1</sup>	100 %	141 %	31 %	75 %		
	<b>Average<sup>2</sup></b> kWh/mm <sup>3</sup>	<b>Steel</b> kWh/kg	<b>Chromium Steel</b> kWh/kg	<b>Cast Iron</b> kWh/kg	<b>Aluminium</b> kWh/kg	<b>Share on Average</b>
Milling, average	-	0.474	0.670	0.148	0.356	
Milling, small parts	1.67E-06	0.211	0.298	0.066	0.158	90 %
Milling, large parts	1.78E-5	2.259	3.191	0.706	1.694	9 %
Milling, dressing	6.42E-05	8.122	11.47	2.538	6.092	1%

<sup>1</sup> Source: Barnes (1976)

<sup>2</sup> Source: Degner und Wolfram (1990)

Da in Fallbeispiel 1 keine genaue Kenntnis über die Größe der abgetragenen Späne vorliegt, wird für die anvisierte Gegenüberstellung der „average“-Datensatz „chromium steel removed by milling, average | Cut-off, U – RER“ ausgewählt.

### Datensatzauswahl für Fallbeispiel 1 in GaBi (2019)

Zur Modellierung des Fallbeispiels 1 wird aufgrund des Mangels eines spezifischen Datensatzes für das Fräsen in der GaBi-Datenbank der Datensatz „Steel high-alloyed machining (0.47 kg shavings per 1 kg

part); single route, at plant“ ausgewählt. Dieser weist für den Inputfluss „Leistung“ eine Menge von 2,26 MJ für das Spanen eines hochlegierten Stahlprodukts (Masse Endprodukt 1 kg) bei einem Materialabtrag von 0,47 kg aus. Zwar weist die Dokumentation zum Datensatz (thinkstep 2018a) entsprechende Primärquellen aus, woher allerdings letztendlich die Leistungsangabe abgeleitet ist, geht daraus nicht hervor.

#### Datensatzauswahl für Fallbeispiel 2 (Drehen von Edelstahl) in ecoinvent (v3.8, cut-off)

Die Quantifizierung des Inputflusses „Strom“ begründet sich für die Datensätze der metallbearbeitenden Drehprozesse (engl. turning), wie auch bei den beschriebenen Datensätzen für das Fräsen, auf die zwei Literaturquellen, Barnes (1976) sowie Degner und Wolfram (1990). Degner und Wolfram (1990) weisen in ihrer Arbeit ebenso den Energiebedarf für unterschiedliche Drehprozessarten aus. Durch Steiner und Frischknecht (2007) wird hierzu die Annahme getroffen, dass es sich bei dem zu bearbeitenden Material jeweils um Stahl handelt, da in der Primärquelle keine weiteren Angaben vorhanden sind. Diese Energiebedarfswerte für die unterschiedlichen Drehprozessarten werden durch die Arbeit von Barnes (1976), welcher Energiebedarfsverhältnisse für das Drehen verschiedener Materialien ausgewiesen hat, auf unterschiedliche Materialtypen übertragen. Die den ecoinvent-Datensätzen zugrunde liegenden Daten für metallbearbeitende Drehprozesse sind untenstehend aufgelistet (Tabelle 60).

Tabelle 60: Hintergrunddaten zur Modellierung des Energiebedarfs für metallbearbeitende Drehprozesse nach Steiner und Frischknecht (2007)

	<b>Steel</b> MJ/t	<b>NiCr-Steel</b> MJ/t	<b>Cast Iron</b> MJ/t	<b>Aluminium</b> MJ/t	<b>Brass</b> MJ/t
Turning <sup>1</sup>	340	480	220	350	190
Energy intensity relative to steel <sup>1</sup>	100 %	141 %	65 %	103 %	56 %

	<b>Average<sup>2</sup></b> kWh/mm <sup>3</sup>	<b>Steel</b> kWh/kg	<b>NiCr-Steel</b> kWh/kg	<b>Cast Iron</b> kWh/kg	<b>Aluminium</b> kWh/kg	<b>Brass</b> kWh/kg
Turning, conventional, average	-	0.338	0.477	0.218	0.347	0.189
Turning, conventional, primarily roughing	1.03E-06	0.130	0.184	0.084	0.134	0.073
Turning, conventional, primarily dressing	4.31E-6	0.545	0.769	0.353	0.561	0.305
Turning, CNC, average	-	1.776	2.507	1.149	1.828	0.992
Turning, CNC, primarily roughing	2.78E-06	0.352	0.496	0.228	0.362	0.196
Turning, CNC, primarily dressing	2.53E-05	3.200	4.517	2.070	3.294	1.788

<sup>1</sup> Source: Barnes (1976)

<sup>2</sup> Source: Degner und Wolfram (1990)

Aufgrund fehlender Informationen wird für die Durchschnittsdatensätze (turning, conventional, average sowie turning, CNC, average) durch Steiner und Frischknecht (2007) die weitere Annahme getroffen, dass sich diese einfach durch eine Mittelwertbildung der Daten in Bezug auf Schrappen (engl. roughing) und Abrichten (engl. dressing) abbilden lassen. Für die Abbildung des zweiten Fallbeispiels wird daher sowohl der Datensatz „chromium steel removed by turning, primarily roughing, computer numerical controlled | Cut-off, U – RER“ als auch der „average“-Datensatz „chromium steel removed by turning, average, computer numerical controlled | Cut-off, U – RER“ für die Gegenüberstellung

berücksichtigt, um die durch die Annahmen induzierten Unsicherheiten zu berücksichtigen bzw. im Vergleich darzustellen.<sup>75</sup>

#### Datensatzauswahl für Fallbeispiel 2 in GaBi (2019)

Unter den LCI-Datensätzen zu metallbearbeitenden Zerspanungsprozessen in GaBi (2019) befindet sich nur ein Datensatz, der einen Drehprozess abbildet (vgl. Anhang A.3, Tabelle 49). Dieser Datensatz, „Steel turning (adjustable), single route, at plant, adjustable“ legt für den Inputfluss „Leistung“ [MJ] folgende parametrisierte Berechnung zugrunde:

$$\text{Leistung [MJ]} = \text{Gradient für Strombedarf} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right] * \text{abgetragenes Material [kg]} * 3,6 \quad (17)$$

Der Gradient für den Strombedarf wird mit 2,55 kWh/kg angegeben (GaBi 2019). Zwar weist die Dokumentation zum Datensatz (thinkstep 2018b) entsprechende Primärquellen aus, woher allerdings dieser Wert abgeleitet ist, geht daraus nicht hervor. Aus dem Strombedarfsgradienten kann mit dem angegebenen Wert zum Materialabtrag aus Fallbeispiel 2 der entsprechende Strombedarf für die Modellierung berechnet werden.

Da GaBi, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, grundsätzlich Zerspanungsprozesse nicht hinsichtlich der Prozessvariationen, sondern nur hinsichtlich des bearbeiteten Materials unterscheidet, wird neben dem spezifischen Datensatz für das Drehen, der Datensatz „Steel high-alloyed machining (0.47 kg shavings per 1 kg part); single route, at plant“ in die Gegenüberstellung einbezogen. Weitere Erklärungen hierzu finden sich obenstehend (Abschnitt: Datensatzauswahl für Fallbeispiel 1 in GaBi (2019))

---

<sup>75</sup> Es wäre auch hier eine Option die entsprechenden Marktprozesse auszuwählen. Diese Datensätze enthalten die gleichen Werte für den Inputfluss „Strom“ wie die ausgewiesenen Datensätze. Zur möglichst genauen Berücksichtigung der geografischen Bezugsgrenzen wurden allerdings die RER-Datensätze gewählt (vgl. Anhang A.3, Tabelle 48).



---

---