

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

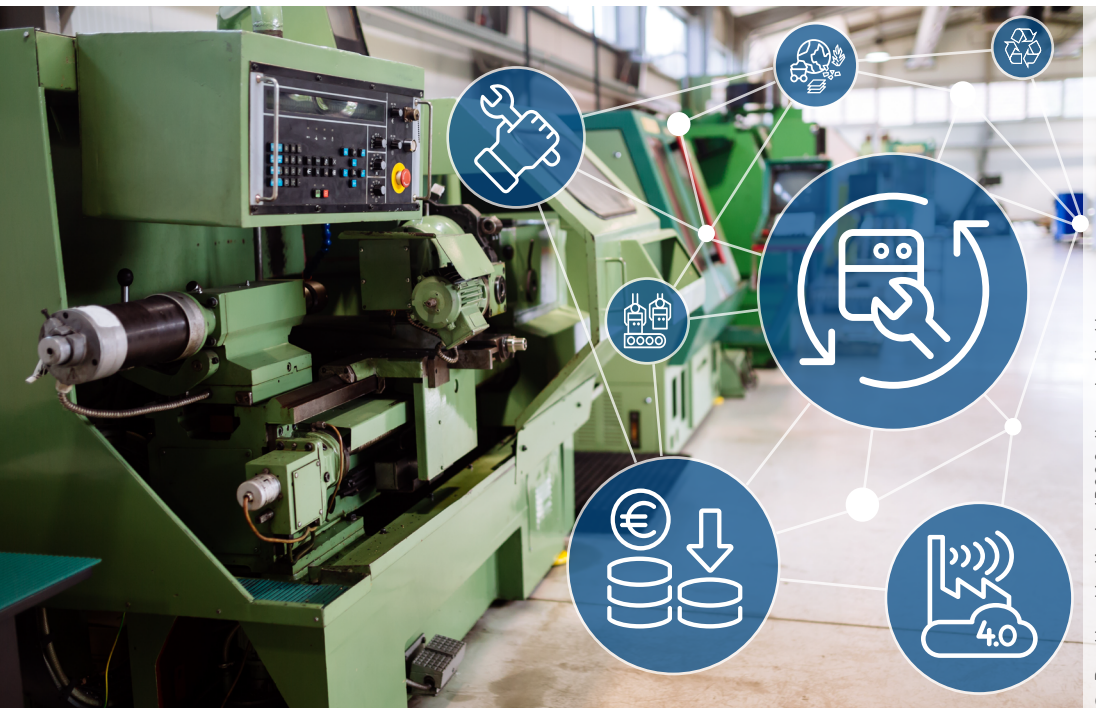
Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

Industrie-4.0-Retrofit-Maßnahmen an Werkzeugmaschinen



© PantherMedia/nd3000 (bearbeitet)

Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Industrie-4.0-Retrofit-Maßnahmen an Werkzeugmaschinen

Autorinnen und Autoren:

Elisabeth Zettl, Ramboll Deutschland GmbH, München
Margit Kühnl, Ramboll Deutschland GmbH, München
Dr. Francesco Castellani, Ramboll Deutschland GmbH, München
Alexander Greßmann, Ramboll Deutschland GmbH, München

Joachim Aigner, Ramboll Management Consulting GmbH, Hamburg
Péter Gyenge, Ramboll Management Consulting GmbH, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig
Dr.-Ing. Tim Abraham, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig
Christopher Rogall, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig
Robar Arafat, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig

Fachlicher Ansprechpartner:

Manuel Weber, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Mustafa Severengiz, Consultant bei der MR PlanFabrik GmbH, für die Zusammenarbeit und seine fachliche Unterstützung.

Die Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bülowsstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 (0)30 2759506-0
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia / nd3000 (bearbeitet)
Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Studien

Ökologische und ökonomische
Bewertung des Ressourcenaufwands

Industrie-4.0-Retrofit-Maßnahmen an
Werkzeugmaschinen

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7
TABELLENVERZEICHNIS	9
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	12
KURZFASSUNG	15
1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	24
2 AUFBAU DER STUDIE	27
3 NACHHALTIGE GESTALTUNG VON METALLBEARBEITUNGS- PROZESSEN	28
3.1 Metallbearbeitung	28
3.1.1 Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen	28
3.1.2 Schleifen und Kühlschmierstoffe	29
3.2 Ganzheitliche Betrachtung von Fertigungsprozessen	30
3.2.1 Ressourcen- und Energieströme in Produktions- systemen	30
3.2.2 Ressourcen- und Energieströme in Schleifprozessen	32
3.3 Ansätze für ökologisch nachhaltiges Schleifen	33
4 INDUSTRIE 4.0 RETROFIT FÜR WERKZEUGMASCHINEN	37
4.1 Cyber-physische Produktionssysteme	38
4.1.1 Modellvorstellung	38
4.1.2 Konstituierende Systembestandteile	40
4.2 Industrie 4.0 Retrofit	42
4.3 Retrofit-Maßnahmen für nachhaltige Schleifprozesse	44
5 VERGLEICHENDE ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG	47
5.1 Untersuchungsrahmen	47
5.1.1 Systemgrenzen	48
5.1.2 Funktionelle Einheit	59
5.1.3 Szenarienbeschreibung zum Versuchsablauf	60
5.1.4 Inventarisierung der erforderlichen Daten	70

5.2	Ökologische Bewertung: Quantifizierung der Sachbilanz	73
5.2.1	Stromverbrauch	74
5.2.2	KSS	74
5.2.3	Filtervlies	76
5.2.4	Sensoren	76
5.2.5	Computer / Server	78
5.3	Ökonomische Bewertung: Auswahl und Quantifizierung der Kostenpositionen	78
5.3.1	Auswahl der Kostenpositionen	78
5.3.2	Quantifizierung ausgewählter Kostenpositionen	80
6	ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG	85
6.1	Ergebnisse der ökologischen Bewertung	85
6.1.1	Treibhausgaspotenzial	85
6.1.2	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	86
6.1.3	Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	87
6.1.4	Wasserverbrauch	88
6.1.5	Flächeninanspruchnahme	88
6.1.6	Sensitivitätsanalyse: Worst case eines erhöhten Stromverbrauchs von 50 % für CPPS-Komponenten im Retrofit-Szenario	89
6.1.7	Rohstoffkritikalität	90
6.1.8	Zusammenfassung	93
6.2	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung	93
6.2.1	Herstellungs- und Transportkosten	93
6.2.2	Kosten der Nutzung (Stromverbrauch)	94
6.2.3	Entsorgungskosten	95
6.2.4	Gesamtkosten aus Sicht des KSS-Anwenders mit und ohne Retrofit-Maßnahmen	97
6.2.5	Sensitivitätsanalyse: Worst case eines erhöhten Stromverbrauchs von 50 % für CPPS-Komponenten im Retrofit-Szenario	97

7	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	101
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	101
7.2	Schlussfolgerungen	102
	LITERATURVERZEICHNIS	107

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Systemgrenze der betrachteten Szenarien (ökologische und ökonomische Bewertung)	17
Abbildung 2: Verbesserung der Energieeffizienz am System	19
Abbildung 3: Aufbau der Studie	27
Abbildung 4: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen	29
Abbildung 5: Ganzheitliche Betrachtung von Prozessketten	31
Abbildung 6: Wichtige Ressourcen- und Energieströme in Schleifprozessen	32
Abbildung 7: Beispiel für Energieanteile eines Schleifsystems	33
Abbildung 8: Vor- und Nachteile gängiger KSS-Zufuhrstrategien	34
Abbildung 9: Industrie 4.0 Entwicklungsstufen	39
Abbildung 10: Cyber-physisches Produktionssystem	40
Abbildung 11: Retrofit-Level der Industrie 4.0	43
Abbildung 12: Einordnung der Retrofit-Maßnahmen innerhalb der Beispielszenarien	44
Abbildung 13: Systemgrenzen des produktionstechnischen Anwendungsfalles	48
Abbildung 14: Systemgrenze der betrachteten Szenarien (ökologische und ökonomische Bewertung)	50
Abbildung 15: Referenzmaschine Studer S40	51
Abbildung 16: Peripheren Anlagen des Referenzsystems	53
Abbildung 17: Zusammenhang der peripheren Anlagen und der Referenzmaschine	54
Abbildung 18: Initiale Dimensionen des Referenzwerkstücks	55

Abbildung 19: Cyber-physisches Produktionssystem des Referenzsystems	58
Abbildung 20: Schematische Darstellung des Referenzsystems	59
Abbildung 21: Beispiel für die Aufzeichnung der Leistung am Referenzsystem	63
Abbildung 22: Vergleich des Energiebedarfs am Referenzsystem	64
Abbildung 23: Retrofit-Szenario Energiebedarf pro Prozessschritt	65
Abbildung 24: Verbesserung des Energiebedarfes durch Retrofit	66
Abbildung 25: Schwingungen im Referenz-Szenario und Retrofit-Szenario	67

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Funktionelle Einheit bezogen auf ein Produktionsszenario einer einzelnen Maschine	20
Tabelle 2:	Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit angegeben)	21
Tabelle 3:	Kostenverteilung Herstellung (einschließlich Transport), Nutzung und Entsorgung - Vergleich von Referenz- und Retrofit-Szenario	21
Tabelle 4:	Gesamtvergleich der Kriterien für das Referenz- und das Retrofit-Szenario - einschließlich einer Sensitivitätsanalyse, bezogen auf die funktionelle Einheit	22
Tabelle 5:	Beispielansätze zur nachhaltigen Gestaltung von ÜKS in Schleifprozessen	36
Tabelle 6:	Spezifikationen der Referenzmaschine	52
Tabelle 7:	Prozessparameter des Schleifvorganges	55
Tabelle 8:	Funktionelle Einheit bezogen auf ein Produktionsszenario einer einzelnen Maschine	60
Tabelle 9:	Gegenüberstellung des Referenz- und Retrofit-Szenarios	61
Tabelle 10:	Vergleichswerte für den Schwingungs- und Vibrationsretrofit	67
Tabelle 11:	Vergleich der Oberflächengüte	68
Tabelle 12:	Inventarisierung der Daten innerhalb der Szenarien	71
Tabelle 13:	Eigenschaften des Kühlschmierstoffes und der Späne	72
Tabelle 14:	Experimentelle Werte für ökobilanziell relevante Parameter des Schleifprozesses	73
Tabelle 15:	Ökobilanz-Studien zu Kühlschmierstoffen	75
Tabelle 16:	Annahmen für die Materialzusammensetzung der Sensorgeräte	77

Tabelle 17:	Preise für Geräte im Retrofit-Szenario	81
Tabelle 18:	Preise für Entsorgung im Referenz-Szenario und im Retrofit-Szenario	83
Tabelle 19:	Ergebnisse der ökologischen Bewertung	85
Tabelle 20:	Treibhausgaspotenzial, drei Phasen	85
Tabelle 21:	Kumulierter Energieaufwand, drei Phasen	87
Tabelle 22:	Kumulierter Rohstoffaufwand, zwei Szenarien	87
Tabelle 23:	Wasserverbrauch, drei Phasen	88
Tabelle 24:	Flächeninanspruchnahme, drei Phasen	89
Tabelle 25:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	90
Tabelle 26:	Indikatoren nach VDI 4800 Blatt 2	91
Tabelle 27:	Rohstoffkritikalitätsanalyse	92
Tabelle 28:	Herstellungs- und Transportkosten der funktionellen Einheit	94
Tabelle 29:	Kosten für den Stromverbrauch der funktionellen Einheit während der Nutzungsphase	95
Tabelle 30:	Preise für Entsorgung im Referenz-Szenario und im Retrofit-Szenario	96
Tabelle 31:	Kostenverteilung Herstellung (einschließlich Transport), Nutzung und Entsorgung - Vergleich von Referenz- und Retrofit-Szenario	97
Tabelle 32:	Kosten für Stromverbrauch der funktionellen Einheit während der Nutzungsphase -Sensitivitätsannahme mit 50 % höherem Stromverbrauch der CPPS-Geräte im Retrofit-Szenario	99
Tabelle 33:	Kostenverteilung Herstellung (einschließlich Transport), Nutzung und Entsorgung - Vergleich von Referenz- und Retrofit-Szenario mit 50 % höherem Stromverbrauch der CPPS-Geräte	99

Tabelle 34:	Gesamtvergleich der Kriterien für das Referenz- und das Retrofit-Szenario einschließlich Sensitivitätsanalyse bzgl. erhöhten Stromverbrauchs	102
-------------	--	-----

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADP	Abiotic Depletion Potential (Abiotischer Ressourcenverbrauch)
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
AW	Anti-Wear (Additive in KSS)
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
CED	Cumulative Energy Demand (Kumulierter Energiebedarf)
CNC	Computerised Numerical Control (Werkzeugmaschine)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CPS	Cyber-physische Systeme
CPPS	Cyber-physische Produktionssysteme
DIN	Deutsches Institut für Normung
EoL	End of Life
EP	Eutrophication Potential (Eutrophierungspotenzial)/ Extreme-Pressure (Additive in KSS)
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HMI-C	Human-Machine-Interaction Communication
HRC	Härteprüfung nach Rockwell
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungs- technik

KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Ressourcenaufwand
KSS	Kühlschmierstoff
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (offenes Netzwerkprotokoll für Machine-to-Machine-Kommunikation)
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MMS	Minimalmengenschmierung
NC	Numerical control
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotenzial)
Nwmb KSS	Nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe
PM	Particulate Matter (Staubpartikel)
PM10	Particulate Matter < 10 µm
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (Bodennahe Ozonbildung)
ÜKS	Überflutungskühlschmierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebauer e. V.
VK	Versorgungskritikalität

WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment (Elektronikschrott)
Wmb KSS	Wassermischbare Kühlschmierstoffe
WZM	Werkzeugmaschine

KURZFASSUNG

Verfahren der Zerspanung wie Drehen, Bohren, Fräsen und Schleifen sind ein wesentlicher Bestandteil industrieller Fertigungsprozessketten. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist vor allem das Schleifen als typisches Endbearbeitungsverfahren von besonderer Bedeutung, weil Produkte bis zu diesem Prozessschritt bereits eine hohe Wertschöpfung erfahren haben. Produzierende Unternehmen sind daher bestrebt, beim Prozessschritt Schleifen Ausschüsse zu vermeiden.

Die im Schleifkontakt entstehende Schleifwärme bedarf einer Kühlschmierung, um das Werkzeug vor Verschleiß zu schützen und Ausschüsse aufgrund von Prozesssicherheiten zu reduzieren. Den technischen Vorteilen von Kühlschmierstoffen (KSS) stehen jedoch Umweltnachteile entgegen, insbesondere im Hinblick auf konventionelle KSS bei Betrachtung des gesamten Lebensweges.¹ Nicht nur die KSS als solche, sondern auch die beim Schleifen übliche Überflutungskühschmierung (ÜKS) ist problematisch, da sie mit einem hohen Peripheriebedarf und energieintensivem Betrieb verbunden ist. Die ökologische Performance der ÜKS kann durch Maßnahmen zur Energie- und Materialeffizienz deutlich gesteigert werden, jedoch bedarf es hierzu einer Prozessüberwachung, die bei älteren Maschinen über Retrofit-Maßnahmen aus dem Bereich der Industrie 4.0 erfolgt.

Retrofit im Rahmen von Industrie 4.0 bezeichnet die Modernisierung bestehender Anlagen oder Betriebsmittel durch Erweiterung bzw. Nachrüstung von Sensorik und Kommunikationsschnittstellen und deren Eingliederung in eine vernetzte Produktionsumgebung. Ziele eines Retrofits können u. a. eine Lebensdauererlängerung der Fertigungsanlage, eine Steigerung des Produktionsvolumens oder eine Senkung der produktionsbezogenen Umweltwirkungen sein. Für die spanende Fertigung, speziell in kleinen und mittleren Unternehmen, ergeben sich damit vielfältige Optionen zur Modernisierung konventioneller Werkzeugmaschinen.

Ziel der Studie ist eine vergleichende ökologische Bewertung sowie ökonomische Analyse von ausgewählten Industrie-4.0-Retrofit-Maßnahmen für die

¹ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017b).

spanende Fertigung auf Basis eines Referenzbauteils. Nach einer anfänglichen Einführung von Industrie 4.0 anhand der cyber-physischen Modellvorstellung eines Produktionssystems (CPPS) wird eine Werkzeugmaschine zu Versuchszwecken nachgerüstet. Der Fokus liegt dabei auf einer möglichst einfach zu implementierenden und kostengünstigen Soft- und Hardwarelösung, um mit der Studie ein breites Anwendungsspektrum sowie insbesondere kleine und mittlere Unternehmen des produzierenden Gewerbes zu adressieren. Diese verfügen häufig noch nicht über genügend Erfahrungen und Kenntnisse zu den Chancen, Herausforderungen und der Umsetzung solcher Retrofit-Maßnahmen.

Die Projektbearbeitung erfolgt in vier Schritten:

- Recherche bzgl. Grundlagen und Stand der Technik zu Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen, Industrie 4.0, CPPS und Retrofit-Stufen,
- Festlegung und Beschreibung des räumlichen sowie zeitlichen Untersuchungsrahmens, Bestimmung eines Referenzbauteils und der funktionalen Einheit,
- ökologische und ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Retrofit-Maßnahmen in Bezug auf Konzept und Referenzsystem,
- Auswertung der Ergebnisse, Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.

Die produktionstechnischen Systemgrenzen der Studie beziehen sich auf die Werkzeugmaschine, die peripheren Anlagen sowie das CPPS. Die Systemgrenze sowie die betrachteten Phasen des Produktlebenszyklus sind in Abbildung 1 dargestellt.

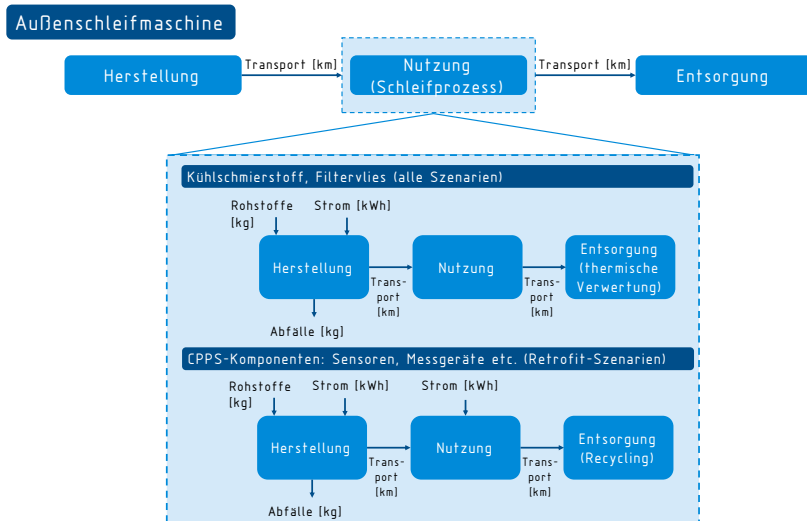


Abbildung 1: Systemgrenze der betrachteten Szenarien (ökologische und ökonomische Bewertung)

Das CPPS basiert auf vier Komponenten: der physischen Ebene (I), der Datenaufnahme und -verarbeitung (II), der virtuellen Ebene (III) sowie der Entscheidungsunterstützung inkl. Steuerung und Regelung (IV). Eine vorhandene Maschinenumgebung wird durch diese konstituierenden Elemente zu einem CPPS erweitert und bildet das Referenz-Szenario für die ökologische und ökonomische Bewertung. Als Retrofit-Szenario werden drei Maßnahmen in das Referenzsystem eingebracht, die sich auf die folgenden Retrofit-Strategien beziehen.

- Schwingungs- und Vibrationsretrofit

Geeignete Sensorik für die Vibrationsmessung wird nah am zu betrachtenden Prozess angebracht und die damit erfassten Daten durch ein Backend-System verarbeitet. Die Datenverarbeitung erfolgt prozessnah und erfordert wenige Installationsschritte, welche für KMU umsetzbar sind. Als Potenziale ergeben sich hier die Verbesserung von Bauteilqualitäten, der optimierte Betrieb der Anlage oder das Vorhersagen von Ausfällen.

- Energie-Retrofit

Die Installation eines Energie-Retrofits umfasst die ganzheitliche Messung aller Energieversorgungen der Anlage und deren Überwachung. Dabei werden im Allgemeinen methodische Kenntnisse wie der Energie-Wertstrom oder Energy-breakdown-Analysen angewandt, um eine signifikante Datengrundlage in Erkenntnisse und Verbesserungen des Prozesses umzuwandeln. Dies kann z. B. zu optimierten Prozessketten oder energetisch sinnvollen Betriebszuständen führen.²

- Condition-Monitoring-Retrofit

Das Condition-Monitoring beinhaltet nicht nur die Messung von Schwingungsdaten, sondern vielmehr die ganzheitliche Abdeckung der Umgebungsdaten der Anlage, sodass ein digitales Abbild, ein sogenannter digitaler Schatten, erstellt werden kann^{3 4}. Diese Umsetzung erfordert Sensorik (beispielsweise Werkzeugkraftmessungen oder großflächige Temperatur- und Luftfeuchtmessung), deren Einbringung eine hohe Komplexität aufweist. Zudem ist die Vernetzung zur optimalen Aufnahme datenbasierter Zustände notwendig, um so beispielsweise Ausfälle vorhersagen zu können.

Die Retrofit-Maßnahmen des Vergleichsszenarios resultieren in einer zugeschnittenen Sensorstrategie, die innerhalb der physischen Ebene des CPPS umgesetzt wird. Als Resultat können die Szenarien verglichen und innerhalb des CPPS Lösungen zur Verbesserung des Grundsystems geschaffen werden. Auf Basis dieser Transparenz resultieren Verbesserungsmaßnahmen für das System, welche sich in diesem Beispiel auf die KSS-Versorgung des Prozesses beziehen. Es stellt sich aufgrund der Betrachtungen und Gegenüberstellungen der Datenlage heraus, dass eine Bearbeitung innerhalb des Prozesses ohne KSS-Zufuhr erhebliche Energieeinsparungen mit sich bringen kann. Dies begründet sich aus dem Leistungsverhältnis zwischen der KSS-Anlage und der Maschine. Die Voraussetzung für eine Bearbeitung ohne KSS-Zufuhr beruht allerdings auf der Annahme, dass der Prozess ohne Qua-

² Vgl. VDMA (2020).

³ Vgl. Engels, G. (2020).

⁴ Vgl. Anisic, Z.; Lalic, B. und Gracanin, D. (2020).

litätseinbußen weiterhin gewährleistet werden kann (s. Kapitel 5.1.3). In Abbildung 2 ist der Unterschied zwischen dem Energieaufwand im Referenz-Szenario und dem Retrofit-Szenario verdeutlicht.

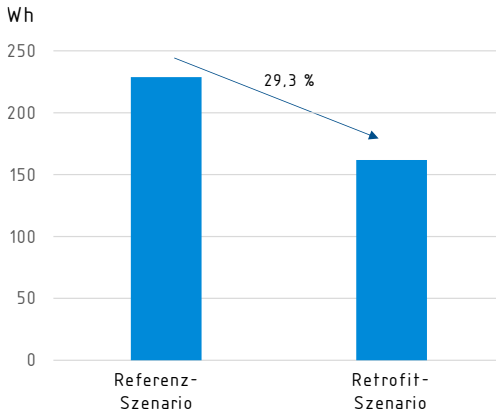


Abbildung 2: Verbesserung der Energieeffizienz am System

Diese effizientere Bearbeitung wird durch das Retrofit erzeugt und gleichermaßen bestätigt. Die angestrebte Qualität, die vor allem durch den Schwingungs- und Vibrationsretrofit überprüft werden kann, befindet sich weiterhin, trotz Einsparung, im geforderten Toleranzbereich. Der Condition-Monitoring-Retrofit trägt in diesem Fall ebenfalls zur Bestätigung des Ergebnisses bei, würde allerdings bei längerer Betrachtung über größere Zeiträume hinweg weitere Schlüsse auf den Prozess oder die Bauteilqualität zulassen. Mögliche Potenziale, die durch dieses Retrofit-Szenario entstehen, sind bezogen auf die vorausschauende Instandhaltung oder In-Process-Überwachung des Bauteils denkbar. Dieses Retrofit-Szenario bietet den Rahmen für eine ökologische und ökonomische Bewertung der eingebrachten Hardware und des CPPS als Mittel des Retrofits.

Für den bilanziellen Vergleich ist die Definition einer funktionellen Einheit erforderlich. Eine funktionelle Einheit bezeichnet im Allgemeinen den quantifizierten Nutzen eines produzierenden Systems, das als Vergleichseinheit verwendet wird. Für den vorliegenden Fall wurde ein Standardversuch mit

den folgenden Daten gewählt, die aus der Literatur für ein schleifendes Produktionssystem als Basis herangezogen wurden⁵ (siehe Tabelle 1):

Tabelle 1: Funktionelle Einheit bezogen auf ein Produktionsszenario einer einzelnen Maschine

Größe	Einheit	Wert
Arbeitstage pro Jahr	Tage/Jahr	250
Schichten pro Tag	-	1
Schichtdauer pro Tag	h/Tag	8
Betriebszeit pro Jahr	%	80
Produktive Maschinenauslastung	h	1.600
Spanmenge pro Referenzwerkstück	cm ³ /Stück	1,4
Schnittzeit pro Referenzwerkstück	min/Stück	1,6388
Produzierte Stückzahl pro Jahr	Stück/Jahr	58.579
Spanvolumen pro Jahr	cm³/Jahr	82.010

Der für die Umsetzung der Retrofit-Maßnahmen erforderliche Aufwand an natürlichen Ressourcen (Energie, Rohstoffe, Wasser, Boden) wird über den gesamten Lebenszyklus der Werkzeugmaschine berücksichtigt. Die ökologische Bewertung wurde anhand von Umweltindikatoren für die einzelnen Ressourcengruppen durchgeführt, wie in Tabelle 2 dargestellt. Hieraus sind auch die Gesamtergebnisse für alle Indikatoren ersichtlich.

Die ökonomische Bewertung umfasst sowohl Herstellungs- als auch Transportkosten, Kosten der Nutzung (in diesem Fall ausschließlich Stromverbrauch) sowie Entsorgungskosten. Werden diese Kostenkomponenten verglichen und addiert, so machen im Referenz-Szenario die Stromkosten mit 52,0 % den höchsten Anteil der Kosten aus, Herstellungs- und Transportkosten liegen bei 40,6 % und Entsorgungskosten bei 5,8 %. Im Retrofit-Szenario belaufen sich, aufgrund der zusätzlich benötigten Sensorik, Computer und Server, die Herstellungs- und Transportkosten auf 53,8 % und machen somit

⁵ Vgl. Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2015).

den höchsten Anteil aus, die Stromkosten liegen bei nur 40,4 % und die Entsorgungskosten bei 5,8 %.

Tabelle 2: Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit angegeben)

Wirkungs-indikator	Referenz-einheit	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äquivalent	11.352,9	9.436,5
Kumulierter Energieaufwand (KEA) (erschöpflich + regenerativ)	MJ	20.5243,6	16.9249,5
Kumulierter Ressourcenaufwand (KRA) (biotisch + Energierohstoffe + Metallrohstoffe + mineral. Rohstoffe, Steine und Erden)	kg	4148,9	4581,0
Wasserverbrauch	kg	60.992,2	51.265,7
Flächeninanspruchnahme, (Landwirtschaftsflächen + Siedlungsflächen)	m ² *a	402,9	344,1

In Summe werden die höheren Investitionen der Retrofit-Maßnahmen (742,32 €/a, Kosten bezogen auf die funktionelle Einheit) durch Einsparungen im Stromverbrauch (451,59 €/a) und in der Entsorgungsphase (61,22 €/a) über die angenommene Lebensdauer der Werkzeugmaschine von weiteren 15 Jahren nur teilweise wieder kompensiert. Es verbleibt ein Saldo an Mehrkosten von 229,51 €/a für die Retrofit-Maßnahme. Den Gesamtüberblick über die Kostenverteilung zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Kostenverteilung Herstellung (einschließlich Transport), Nutzung und Entsorgung – Vergleich von Referenz- und Retrofit-Szenario

Szenario	Herstellungs- und Transportkosten	Kosten für Stromverbrauch (Nutzungsphase)	Entsorgungskosten	Gesamtkosten
Referenz-Szenario	1.912,43 €/a	2.445,75 €/a	346,50 €/a	4.704,67 €/a
Retrofit-Szenario	2.654,75 €/a	1.994,16 €/a	285,28 €/a	4.934,18 €/a
Kostendifferenz im Retrofit-Szenario	742,32 €/a	-451,59 €/a	-61,22 €/a	229,51 €/a

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 4 zusammengefasst und in ein Skalensystem mit „++“ als bestem sowie „-“ als schlechtestem Indikatorwert eingeteilt.

Tabelle 4: Gesamtvergleich der Kriterien für das Referenz- und das Retrofit-Szenario – einschließlich einer Sensitivitätsanalyse bezüglich eines erhöhten Stromverbrauchs –, bezogen auf die funktionelle Einheit

Wirkungs-indikator	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario	Sensitivitätsanalyse mit erhöhtem CPPS-Stromverbrauch
Treibhauspotenzial	-	++	+
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	-	++	+
Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	++	-	-
Wasserverbrauch	-	++	+
Flächeninanspruchnahme	-	++	+
Gesamtkosten	+	0	-

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die einzelnen Indikatoren überwiegend für die Einführung der betrachteten Retrofit-Maßnahmen sprechen. Mit Ausnahme des kumulierten Rohstoffaufwands führen Retrofit-Maßnahmen zu einer Verbesserung der Auswirkungen auf die Umwelt. Falls sich der Stromverbrauch der CPPS-Einheiten um 50 % erhöht (Annahme einer Sensitivitätsanalyse), reduziert sich der Vorteil der Retrofit-Maßnahmen geringfügig gegen den Normalfall.

Allerdings amortisieren sich unter den gegebenen Annahmen die zusätzlichen Kosten der Retrofit-Maßnahmen nicht vollständig über die Lebensdauer der Investition. Aufgrund fehlender Informationen zu Wartung und Instandhaltung konnte im Rahmen der Studie jedoch nicht berücksichtigt werden, dass die Retrofit-Maßnahmen möglicherweise eine Verlängerung der Lebensdauer der Anlage bewirken. Ebenso könnte eine signifikante Erhöhung des Strompreises in der Zukunft bzw. die Annahme, dass kleine Unternehmen auch heute einen höheren Strompreis – ähnlich dem für private Haushalte – beziehen, die Unrentabilität der Investition aus Unternehmenssicht relativieren. Weiterhin kann die Produktvielfalt, aber auch die Produktqualität durch technische Retrofit-Maßnahmen erhöht werden. Die Erstsanschaffung von Messtechnik ist zudem Ausgangspunkt für weitere Maßnahmen, mit denen ökonomische und ökologische Potenziale erkannt und damit nutzbar werden.

Wenn ein verstärkter Einsatz von Retrofit-Maßnahmen unter Effizienz- und Umweltaspekten gesellschaftlich gewünscht ist, sollten solche Investitionen staatlich gefördert werden, um unabhängig von der Unsicherheit über die betriebswirtschaftliche Rentabilität während der Restlaufzeit der Anlage für das Unternehmen einen Anreiz zu schaffen: Einerseits werden für KMU dadurch Lehr- und Lernumgebungen für die nachhaltige Produktion bereitgestellt. Andererseits sollte hierfür regierungsseitig Interesse bestehen, weil durch die geeignete Umsetzung der Maßnahmen Umweltpotenziale erschlossen und damit ein Beitrag zur Erreichung der CO₂-Ziele geleistet werden können. Gleichzeitig sollten solche Retrofit-Maßnahmen durch flankierende Maßnahmen wie gezielte Information, wissenschaftliche Begleitung und Dokumentation von Gute-Praxis-Beispielen aus unterschiedlichen Anwendungsfeldern unterstützt werden.

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Die digitale Vernetzung von Menschen, Maschinen und Abläufen im industriellen Bereich (Industrie 4.0) bietet die Möglichkeit, das Ressourceneffizienzpotenzial zu steigern und somit einen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten. Material- und Energieeinsparungen können realisiert werden, die auf einer Steigerung der Produktivität, einer Verringerung der Durchlaufzeiten sowie einer Erhöhung der Flexibilität beruhen. Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien im Zuge der Industrie 4.0 ermöglicht die Erfassung und Analyse von Produktionsdaten teilweise in Echtzeit. Dies führt zur Schaffung einer hohen Informationstransparenz, die Material-Struktur-Prozess-Eigenschafts-Beziehungen erfasst und Maßnahmen für die Prozessoptimierung dezentral ableitet. Mögliche Prozessverbesserungen können direkt in der Produktion umgesetzt werden.

Die Umsetzung ist beispielsweise mit Retrofit-Maßnahmen erreichbar. Dabei bezeichnet Retrofit die Modernisierung von bestehenden Anlagen oder Betriebsmitteln. Im Kontext der Industrie 4.0 bedeutet das eine Erweiterung oder Nachrüstung von Sensorik und Kommunikationsschnittstellen und deren Eingliederung in eine vernetzte Produktionsumgebung. Die hierdurch zusätzlich verfügbaren Daten können nach Analyse und Auswertung zu spezifischen Verbesserungen im Produktionsprozess führen. Vielfältige Maßnahmen oder Verbesserungen, wie z. B. die Verlängerung der Lebensdauer der Anlagen, die Erhöhung des Produktionsvolumens oder die Verbesserung ökologischer und ökonomischer Aspekte durch Material- und Energieeinsparungen, können das Ziel eines Retrofits sein. Für ein energieeinsparendes Retrofit können beispielsweise der Einsatz energieeffizienterer Motoren oder die Installation von Frequenzumrichtern zur betrieboptimierten Regelung des Motors vorgesehen werden⁶. Im Bereich der spanenden Fertigung, speziell in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), ergeben sich Retrofit-Optionen zur Modernisierung konventioneller Werkzeugmaschinen.

Durch die Produktion neuer Bauteile und Komponenten sowie deren Einsatz fallen andererseits wiederum Kosten (z. B. Energiekosten) und Ressourcen-

⁶ Vgl. VDMA (2020).

aufwand an. Dies führt unter Umständen zu einer weiteren Umweltbelastung. Darüber hinaus sind im Zuge der Betrachtung einer Retrofit-Maßnahme auch die Kosten explizit zu berücksichtigen, da diese einen signifikanten Bestandteil der ökonomischen Perspektive eines Retrofits darstellen.⁷

Eine weitere Herausforderung besteht in der Fragestellung, wie die optimale Kombination von Betriebsbedingungen erreicht werden kann, um die Umweltauswirkungen und gleichzeitig die Kosten zu minimieren, wobei die Qualität des zu bearbeitenden Produktes erhalten bleibt oder erhöht wird. Insbesondere KMU verfügen häufig nicht über ausreichend Kenntnisse und Erfahrungen für die Durchführung von Retrofit-Maßnahmen im Rahmen der Industrie 4.0 und die damit einhergehenden Chancen. Zur Entscheidungsunterstützung wird daher im Rahmen dieser Studie der Einfluss einer Retrofit-Maßnahme im Bereich der Industrie 4.0 nicht nur aus ökologischer, sondern auch aus ökonomischer Sicht des Unternehmens analysiert.

Zielsetzung

Ziel der Studie ist eine vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung der spanenden Fertigung eines Referenzbauteils. Dazu werden verschiedene Fertigungsszenarien mit und ohne Nachrüstung einer Werkzeugmaschine durch Retrofit-Maßnahmen analysiert. Für ein breites Anwendungsspektrum wird gezeigt, welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen die Wahl der Fertigungsverfahren haben kann. Hauptzielgruppen der Studie sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des produzierenden Gewerbes, Fertigungsbetriebe aus dem Maschinen- und Anlagenbau, Beratende sowie Forschungsinstitute. Sie sollen in ihren Entscheidungen hinsichtlich des gewählten Fertigungsverfahrens unterstützt werden. Die Studie dient auch als Informationsquelle für Initiativen und Verbände sowie Einrichtungen des Bundes, der Länder und deren Vertretungen.

Nach einer Analyse des Stands der Technik wird das Referenzbauteil unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte (z. B. funktionelle Einheit, Systemgrenze, Datenverfügbarkeit, Nutzungszeit der Maschine, Randbedingungen)

⁷ Vgl. Kruk, R. (2011).

für die anschließende Bewertung ausgewählt. Diese untergliedert sich in eine ganzheitliche ökologische Bewertung, die unter anderem Energie- und Rohstoffbedarfe sowie CO₂-Emissionen, Flächenbedarf und versorgungskritische Rohstoffe betrachtet, sowie in eine ökonomische Analyse, in der Investitions- und laufende Kosten aus unterschiedlichen Lebenszyklusphasen analysiert werden. Auch wird untersucht, ob sich unter den betrachteten Rahmenbedingungen die Investitionen der Retrofit-Komponenten vollständig amortisieren. Die ökologische Bewertung erfolgt nach VDI 4800 Blatt 1⁸ und Blatt 2⁹ sowie VDI 4600¹⁰ und DIN EN ISO 14040¹¹/44¹².

Erarbeitet werden Antworten auf folgende Forschungsfragen:

- Welche Vor- und Nachteile bzw. Hemmnisse ergeben sich bei der Umsetzung von Retrofit-Maßnahmen im Bereich Industrie 4.0 insbesondere hinsichtlich einer Ressourceneffizienzsteigerung des Produktionsprozesses?
- Welche Aufwendungen an Rohstoffen, Energie, Wasser und Fläche müssen unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges für die Fertigung der Referenzprodukte (inklusive und exklusive der Nachrüstung von Retrofit-Maßnahmen) aufgebracht werden?
- Welche versorgungskritischen Rohstoffe werden bei der Fertigung der Referenzprodukte (inklusive und exklusive der Nachrüstung von Retrofit-Maßnahmen) verwendet bzw. eingespart?
- Welche Treibhausgas-Emissionen, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten, werden je Fertigungsszenario ausgestoßen?
- Welche Kosten ergeben sich für die betrachteten Fertigungsszenarien?

⁸ VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

⁹ VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

¹⁰ VDI 4600 Blatt 1:2015-08.

¹¹ DIN EN ISO 14040:2006.

¹² DIN EN ISO 14044:2006.

2 AUFBAU DER STUDIE

Die Bearbeitung der Studie erfolgt in vier Schritten (vgl. Abbildung 3):

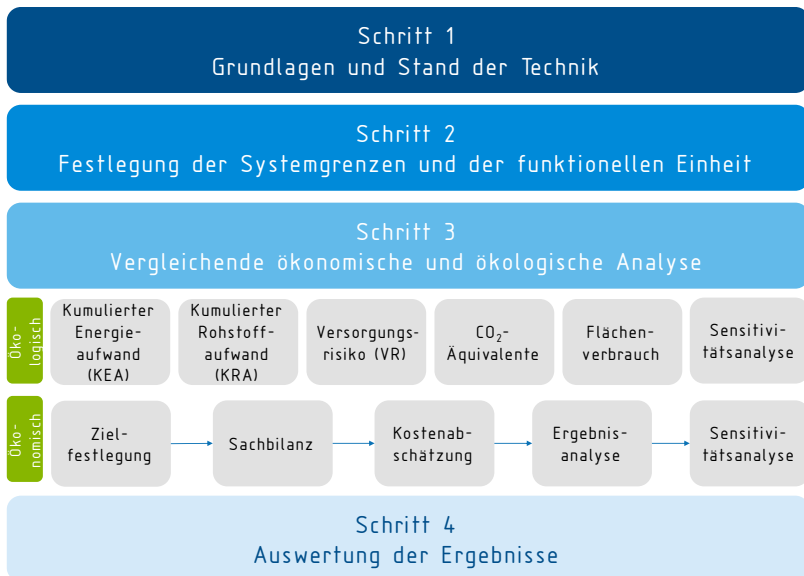


Abbildung 3: Aufbau der Studie

Zunächst werden Werkzeugmaschinen als repräsentatives Fertigungsverfahren für die Nachhaltigkeitsbestrebungen der Metallverarbeitungsindustrie vorgestellt sowie Industrie 4.0 auf Basis des CPPS beschrieben. Dem schließt sich eine Einordnung von Industrie-4.0-Retrofit-Maßnahmen an.

Der zweite Schritt beinhaltet die Festlegung und Beschreibung des räumlichen und zeitlichen Untersuchungsrahmens (Prozesskonfiguration und Betrachtungszeitraum), die Bestimmung eines Referenzbauteils sowie die Ableitung der funktionellen Einheit.

Im dritten Schritt erfolgt die ökologische und ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Retrofit-Maßnahmen in Bezug auf das aufgestellte Konzept und das Referenzsystem inkl. eines Skalierungsrahmens.

Abschließend werden die Ergebnisse im vierten Schritt ausgewertet, die Kernergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

3 NACHHALTIGE GESTALTUNG VON METALLBEARBEITUNGSPROZESSEN

3.1 Metallbearbeitung

3.1.1 Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen

Nach DIN 8580 gehört das Trennen neben dem Urformen, Umformen, Fügen, Beschichten und Ändern von Stoffeigenschaften zu den sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren¹³. Die dem Trennen untergruppierten Verfahren Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmter bzw. unbestimmter Schneide, Abtragen, Zerlegen und Reinigen sind ein wesentlicher Bestandteil industrieller Fertigungsprozessketten. Besonders Zerspanungsverfahren nach DIN 8589¹⁴ sind sehr verbreitet und werden weiter in Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wie Drehen, Bohren und Fräsen sowie Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide wie Schleifen, Honen und Läppen unterteilt. Auf Maschinenebene erfolgt die Umsetzung der genannten Verfahren durch den Einsatz von Werkzeugmaschinen (WZM).

Eine WZM ist nach DIN 69651 eine „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtung, die durch relative Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug eine vorgegebene Form am Werkstück oder eine Veränderung einer vorgegebenen Form an einem Werkstück erzeugt“¹⁵. Weit verbreitet sind WZM zur zerspanenden Bearbeitung wie Dreh-, Fräs-, Bohr- und Schleifmaschinen. Fertigungshauptgruppen und eine Auswahl verbreiteter WZM für trennende Verfahren sind in Abbildung 4 dargestellt. Besondere Bedeutung in Fertigungsprozessketten haben Schleifverfahren, da diese in der Regel am Ende der Prozessketten eingesetzt werden.

¹³ Vgl. DIN 8580:2003.

¹⁴ Vgl. DIN 8589:2003.

¹⁵ DIN 69651:1981.



Abbildung 4: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen¹⁶

3.1.2 Schleifen und Kühlschmierstoffe

Schleifverfahren gehören zur Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide¹⁷. Bei diesen dringt eine Vielzahl stochastisch verteilter Schleifkörper in das zu zerspanende Bauteil ein. Schleifprozesse werden neben der Materialpaarung durch die eingehenden Einstellparameter definiert. Hierzu gehören die Zustellung (Verfahrstrecke), die Vorschubgeschwindigkeit (Verfahrgeschwindigkeit) sowie die Schnittgeschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe) als wichtigste Parameter. Die Kombination dieser Kenngrößen bestimmt maßgeblich das Fertigungsergebnis des Schleifprozesses.

Die beim Schleifen entstehende Wärme bedarf einer Kühlschmierung, um das Werkzeug zu schützen und durch eine steigende Prozesssicherheit Ausschuss zu reduzieren. Konventionell kommen hierzu Kühlschmierstoffe (KSS) zum Einsatz¹⁸, die einerseits die Wärme durch Kühlung abführen und

¹⁶ In Anlehnung an DIN 8580:2003 und DIN 8589:2003.

¹⁷ Vgl. DIN 8589:2003.

¹⁸ Vgl. Brinksmeier, E.; Meyer, D.; Huesmann-Cordes, A. G. und Herrmann, C. (2015).

andererseits der Wärmeentstehung durch Schmierung vorbeugen. Den technischen Vorteilen von KSS stehen zum Teil negative Einflüsse auf die Umwelt entgegen, insbesondere im Hinblick auf konventionelle KSS über den gesamten Lebensweg.¹⁹

Konventionelle KSS sind hierbei mineralölbasiert (nichtwassermischbare KSS) oder mineralöhlhaltige Emulsionen und haben entsprechend hohe Umweltauswirkungen. Die eingesetzten KSS werden in der Regel in Kreisläufen geführt und weisen einen hohen Peripheriebedarf auf. Pumpen, Filtersysteme und Absauganlagen sind dabei die energieintensivsten Systeme der peripheren Anlagen. Insbesondere der Betrieb von Hochdruck-KSS-Pumpen kann hierbei verbrauchsintensiv sein²⁰. Mit diesem hohen Energiebedarf sind hohe Betriebskosten verbunden, die oft auf überdimensionierte KSS-Anwendungen zurückzuführen sind. Ein Beispiel zeigt, dass mit geringerem Ressourcenaufwand die gleiche technische Performance erreicht wird, wenn Maßnahmen zur optimierten Düsenauslegung ergriffen werden²¹. Der KSS-Einsatz bedeutet insgesamt für Unternehmen eine technologische Notwendigkeit beim Schleifen, ist aber zugleich mit erhöhtem Kostenaufwand und auch Umwelteinfluss verbunden.

3.2 Ganzheitliche Betrachtung von Fertigungsprozessen

3.2.1 Material- und Energieströme in Produktionssystemen

Fertigungsprozesse sind Bestandteil eines Produktionssystems und dienen der Ausbringung von Produkten unter dem Einsatz von Material und Energie. Für eine nachhaltige Gestaltung einzelner Prozesse bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung, die alle Ströme in und aus dem Produktionssystem betrachtet, eine Ableitung von Maßnahmen ermöglicht und so Grundlage für eine Bewertung bietet. Hierbei ist nicht nur eine einzelne WZM, sondern die Kombination aus diesen zu einer Prozesskette zu berücksichtigen.

Eine WZM ist im Produktionskontext eine von vielen Maschinen, deren Prozesse in der Gesamtheit die Fertigungsprozesskette ergeben. Abbildung 5

¹⁹ Vgl. Herrmann, C.; Madanchi, N.; Winter, M.; Öhlschläger, G.; Greßmann, A.; Zettl, E.; Schwengers, K. und Lange, U. (2017).

²⁰ Vgl. Denkena, B.; Helmecke, P. und Hülsemeyer, L. (2014).

²¹ Vgl. Madanchi, N.; Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2017).

zeigt eine ganzheitliche Betrachtung von Prozessen und Prozessketten. Der Hauptmaterialfluss durchläuft nacheinander die Prozesse bis zum letzten Vorgang, bei dem schließlich das finale Produkt gefertigt wird. Die einzelnen Prozessschritte haben jeweils ihren spezifischen Bedarf an Ressourcen, wobei dieser Bedarf abhängig vom momentanen Maschinenstatus ist. Zudem zeigen die Prozesse spezifische Prozess-, Ausfall- und Reparaturzeiten, die die Produktivität des Gesamtprozesses maßgeblich mitbestimmen. Energieströme werden in verschiedenen Formen wie Elektrizität, Druckluft oder Dampf zugeführt. Ausgangsströme sind ressourcenseitig Abfallstoffe und Schrott bzw. Ausschuss. Die den Prozessen zugeführte Energie wird beispielsweise in thermische Energie als Ausgangsprodukt umgewandelt. Die Prozesskette wird zudem von Systemen der technischen Gebäudeausrüstung gestützt. Zu diesen gehören beispielsweise Klima- und Lüftungsanlagen, die ihrerseits wieder Ressourcen wie Öl und Gas benötigen²². Ein Schleifprozess ist ein einzelner Vorgang in der Gesamtfertigungsprozesskette und weist prozessspezifische Material- und Energieströme auf, zu denen auch die Material- und Energieströme der peripheren Anlagen gehören.

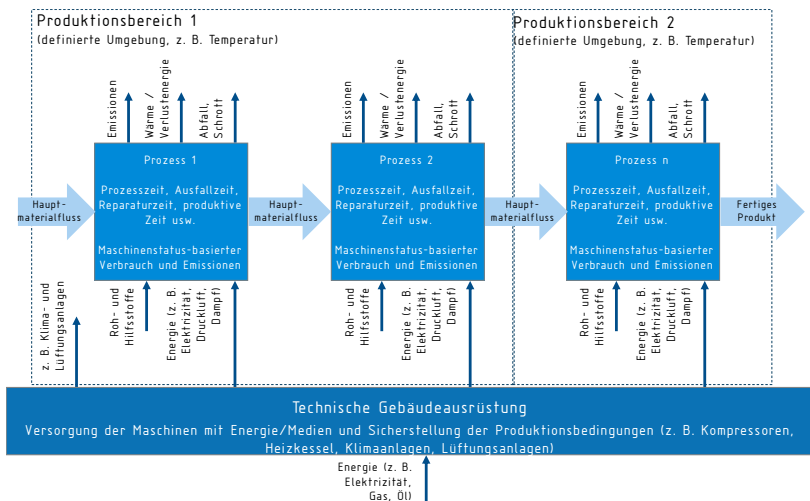


Abbildung 5: Ganzheitliche Betrachtung von Prozessketten²³

²² Vgl. Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J. und Johansson, B. (2013).

²³ In Anlehnung an Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J. und Johansson, B. (2013).

3.2.2 Material- und Energieströme in Schleifprozessen

Für den eigentlichen Schleifprozess wird neben Energie und Schleifscheiben auch KSS benötigt. Die peripheren Anlagen des KSS-Kreislaufes sind als bedeutende Material- und Energieverbraucher zu berücksichtigen²⁴. Einerseits ist die Pump- und Filteranlage des KSS zu nennen, die ihrerseits ebenfalls mit Energie und den KSS-Fluiden versorgt werden muss. Ein weiterer Rohstoff ist beispielsweise Bandfiltermaterial, das im Laufe des Prozesses verbraucht wird. Die im Prozess vernebelten KSS- und Spanreste werden als Emissionen unter weiterem Energieaufwand von der Abluftanlage angesaugt und fallen als Abfall an. Abbildung 6 zeigt eine solche Zusammenstellung wichtiger Material- und Energieströme von Schleifprozessen.

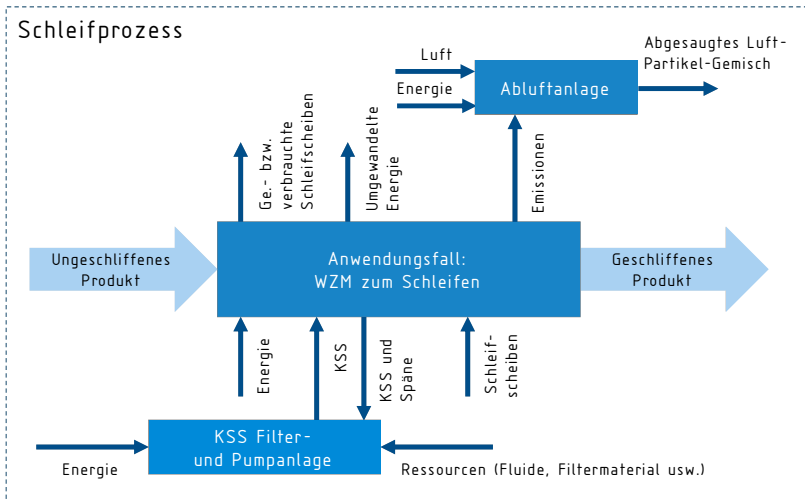


Abbildung 6: Wichtige Material- und Energieströme in Schleifprozessen²⁵

Zur Erkennung von Einsparpotenzialen im Energieverbrauch ist eine quantitative Aufschlüsselung der Verbraucher erforderlich. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Energieverteilung einer Schleifmaschine, bei der die Energie-

²⁴ Vgl. Madanchi, N.; Thiede, S.; Gutowski, T. und Herrmann, C. (2019).

²⁵ In Anlehnung an Madanchi, N.; Thiede, S.; Gutowski, T. und Herrmann, C. (2019).

ströme für die Abluftanlage sowie für das KSS-System berücksichtigt wurden²⁶. Das Beispiel gibt einen Verbrauch von 45 % bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch des Schleifsystems wieder, wobei 29 % auf das KSS-System und 16 % auf die Abluftanlage entfallen. Neben dem Grundenergiebedarf der Schleifmaschine (35 %) sind die Spindel mit 12 % und der Schleifprozess mit 8 % die weiteren Verbraucher, die nur schwierig effizienter zu gestalten sind. Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz der peripheren Anlagen haben daher besonders großes Potenzial.



Abbildung 7: Beispiel für Energieanteile eines Schleifsystems²⁷

3.3 Ansätze für ökologisch nachhaltiges Schleifen

Eine verlässliche Bewertung effizienzsteigernder Maßnahmen und daraus folgender Ergebnisse muss sämtliche Systemänderungen berücksichtigen, um Problemshifting-Effekte zu quantifizieren. Als Beispiel ist die KSS-Versorgung zu nennen. Neben den jeweiligen KSS-Typen sind verschiedene Ansätze zur KSS-Zufuhrstrategie denkbar. Die gängige Überflutungskühlschmierung (ÜKS) hat einerseits technische Vorteile aufgrund guter Kühl- und Schmierbedingungen, sie ist jedoch auch mit einem hohen Peripheriebedarf und Gefährdungspotenzial für Umwelt und Gesundheit verbunden. Ein weiterer Nachteil ist die Alterung wasserbasierter KSS und der damit einhergehende regelmäßige KSS-Wechsel. Unproblematisch ist die Alterung

²⁶ Vgl. Madanchi, N. (2022).

²⁷ In Anlehnung an Madanchi, N. (2022).

dagegen bei der Minimalmengenschmierung (MMS), bei der die Volumenströme auf ein Minimum reduziert werden. Bei der MMS werden keine Kreisläufe geführt, was einerseits den Vorteil von Peripherieeinsparungen, aber gleichzeitig den Nachteil des Fluidverlustes mit sich bringt, denn anders als im Kreislaufsystem wird das Fluid nach dem Gebrauch nicht in den Kreislauf zurückgeführt, sondern zusammen mit den anfallenden Spänen entsorgt.

Das Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt ist bei der MMS im Vergleich zur ÜKS allerdings reduziert. Bei der Trockenbearbeitung wird gänzlich auf KSS und damit auf sämtliche KSS-bezogene Peripherie verzichtet. Nachteilig sind hier jedoch die schlechte Prozessperformance und dadurch höhere Ausschussraten sowie ein erhöhter Werkzeugverschleiß²⁸, die sich wiederum negativ auf die ökologische sowie ökonomische Performance auswirken. Ein weiterer Ansatz für ökologisch nachhaltiges Schleifen ist die Substitution konventioneller, mineralöhlhaltiger KSS durch biobasierte Alternativen. Die Entsorgung dieser KSS ist zwar weniger kritisch, eine geringere Haltbarkeit des KSS führt jedoch zu häufigerem KSS-Wechsel.



Abbildung 8: Vor- und Nachteile gängiger KSS-Zufuhrstrategien²⁹

²⁸ Vgl. Arafat, R.; Madanchi, N.; Thiede, S.; Herrmann, C. und Skerlos, S. J. (2021).

²⁹ In Anlehnung an Arafat, R.; Madanchi, N.; Thiede, S.; Herrmann, C. und Skerlos, S. J. (2021).

Als bewährteste KSS-Strategie im Zuge von Schleifprozessen ist die ÜKS nach wie vor die meistverbreitete Zufuhrstrategie, weshalb sich hier Ansätze zur bedarfsgerechten Prozessführung anbieten. So können durch einen reduzierten KSS-Druck einerseits zwar Pumpleistung und KSS-Verlust durch Absaugung eingespart werden, andererseits führt die KSS-Reduktion ggf. zu Defiziten in der technischen Performance. Ein dadurch bedingter potenzieller Mehrausschuss von Werkstücken sowie erhöhter Maschinen- und Werkzeugverschleiß wirken den Einsparungen wiederum entgegen.

Eine Reduktion der Leistung durch die KSS-Absauganlage ist ebenfalls mit Energieeinsparungen verbunden. Bei drastischer Leistungsreduktion oder gänzlicher Abschaltung der Absauganlage steigt jedoch das Risiko von Bränden sowie das gesundheitliche Risiko für maschinenbedienende Angestellte aufgrund von unzureichender Absaugung der Aerosole. In Tabelle 5 sind entsprechende Ansätze zur nachhaltigeren Gestaltung der ÜKS bei konventionellen Schleifprozessen zusammengefasst, wobei Problemshifting-Effekte berücksichtigt wurden.

Eine ganzheitliche ökologische und ökonomische Bewertung muss, wie eingangs erwähnt, sämtliche Material- und Energieflüsse des Prozesses bzw. der Prozesskette berücksichtigen. Die genannten Beispiele zeigen unterdessen, dass die Bewertung von Ansätzen zur nachhaltigen Gestaltung komplex ist, nicht zuletzt deswegen, weil die Ansätze stets auch negative Effekte mit sich bringen.

Zur Quantifizierung möglicher Einsparpotenziale ist eine Prozessüberwachung durch Datenerhebung unumgänglich. Hierfür sind Werkzeuge aus der Industrie 4.0 weit verbreitet, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

Tabelle 5: Beispielansätze zur nachhaltigen Gestaltung von ÜKS in Schleifprozessen

Ansatz	Beispiel-literatur	Mögliche positive Effekte	Mögliche negative Effekte
Substitution von ÜKS durch MMS	Campitelli, A. et al. (2019) ³⁰ ; Arafat, R. et al. (2021) ³¹	Teilweise Einsparung von KSS-bezogener Peripherie wie Pump- und Filtrieranlage und deren Betrieb → geringerer Peripherieabfall, geringerer Energiebedarf	Erhöhung von Ausschuss, erhöhter Werkzeugverschleiß, erhöhter Maschinenverschleiß, erhöhte Korrosionsgefahr, höherer KSS-Abfall, Notwendigkeit zusätzlicher Kühlperipherie
Trockenbearbeitung statt ÜKS	Kitzig, H. et al. (2014) ³² ; Tawakoli, T. et al. (2007) ³³	Einsparung von sämtlicher KSS-bezogener Peripherie → kein Peripherieabfall, bessere Umweltperformance	Schlechte Prozessperformance (insbesondere beim Schleifen) → Ausschussrate und Werkzeugverschleiß größer
Substitution von Öl-KSS durch biobasiertes Fluid	Venkatesh, K. et al (2018) ³⁴ ; Dettmer, T. (2006) ³⁵	Verbesserte Umweltperformance, Kosteneinsparung durch Abfallnutzung	Geringere KSS-Haltbarkeit → häufigere KSS-Wechsel, mehr Abfall, größerer KSS-Wartungsaufwand
Bedarfsregelung bzw. Weglassung des zugeführten KSS	Wittmann, M (2007) ³⁶	Geringerer Energieverbrauch der Pumpanlage, reduzierter KSS-Abfall durch Absaugung, geringerer Pumpenverschleiß, Einsparung von Filtermaterial	Erhöhung von Ausschuss, erhöhter Werkzeugverschleiß, erhöhter Maschinenverschleiß, erhöhte Korrosionsgefahr
Reduktion bzw. Abschaltung der KSS-Absaugung	Madanchi, N. (2015) ³⁷	Geringerer Energieverbrauch der Absauganlage, reduzierter KSS-Abfall durch Absaugung, geringerer Verschleiß der Absauganlage	Gefahr durch Durchsickern von KSS-Nebel in Elektronikteile, erhöhte Brandgefährdung durch Öl-Aerosol, erhöhte Gesundheitsgefährdung durch Aerosolbildung

³⁰ Vgl. Campitelli, A.; Cristóbal, J.; Fischer, J.; Becker, B. und Schebek, L. (2019).³¹ Vgl. Arafat, R.; Madanchi, N.; Thiede, S.; Herrmann, C. und Skerlos, S. J. (2021).³² Vgl. Kitizg, H.; Jandaghi, N.; Azarhoushang, B. und Vesali, A. (2014).³³ Vgl. Tawakoli, T.; Westkaemper, E. und Rabiey, M. (2007).³⁴ Vgl. Venkatesh, K.; Sriram, G.; Sai Raj Pavan, S. und Suresh, S. (2018).³⁵ Vgl. Dettmer, T. (2006).³⁶ Vgl. Wittmann, M. (2007).³⁷ Vgl. Madanchi, N.; Winter, M. und Herrmann, C. (2015).

4 INDUSTRIE-4.0-RETROFIT FÜR WERKZEUGMASCHINEN

Die möglichen Maßnahmen für einen nachhaltigen Betrieb von Schleifprozessen bieten eine prozessorientierte Verbesserung für die Anwendung unter Nutzung von KSS, zeigen allerdings auch die Herausforderungen und möglichen negativen Effekte der Ansätze auf. Durch den direkten Eingriff und die verschiedenen Strategien für den Aufbau des Prozesses ist mit nicht klar definierten Unsicherheiten zu rechnen. Diese Prozessunsicherheiten stellen neue Herausforderungen im Bereich der Prozessüberwachung dar, um weiterhin eine hohe Produktivität und Qualität gewährleisten zu können. In diesem Umfeld sind die technische Überwachung und Prozessoptimierung durch Industrie-4.0-Retrofits anwendbar. Es stellt sich im Zuge dessen allerdings auch heraus, dass die Nachhaltigkeit eines Systems nicht durch das Digitalisieren von Prozessen entsteht, sondern aufgrund der Maßnahmen, die auf Basis der Entscheidungsunterstützung vorgeschlagen werden. Nichtsdestotrotz ist die Digitalisierung mithilfe von Industrie-4.0-Lösungen ein geeignetes Werkzeug für die Erarbeitung solcher Maßnahmen und Ansätze.

Im Allgemeinen wird die Digitalisierung in der Produktion als „Industrie 4.0“ bezeichnet. Dies bezieht sich auf die vierte industrielle Revolution und wurde durch die Hightechstrategie der deutschen Bundesregierung im Jahr 2012 eingeführt³⁸. Die vierte industrielle Revolution richtet sich auf Technologien wie Produktindividualisierung, hohen Flexibilisierungsgrad sowie effiziente Produktion. Dabei stehen vor allem die Vernetzung aller menschlichen und maschinellen Agierenden über die Produktionsprozesse hinweg sowie die Digitalisierung und Echtzeitverarbeitung von Daten im Vordergrund. Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), aber auch für die Großindustrie ergeben sich hieraus Risiken und Herausforderungen, ältere Maschinen in den Takt der aktuellen Zeit zu bringen.³⁹ Vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 können durch Schaffung einer hohen Informationstransparenz die Material-Struktur-Prozess-Eigenschafts-Beziehung erfasst, Maßnahmen für die Prozessoptimierung dezentral abgeleitet und anschließend über

³⁸ Vgl. Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft (2012).

³⁹ Vgl. Roth, A. (2016).

Assistenzsysteme an die maschinenbedienenden Angestellten herangetragen oder für eine direkte Anlagensteuerung genutzt werden.⁴⁰ Die Optimierungsansätze verfolgen hierbei ggf. verschiedene Zielstellungen, wie beispielsweise eine Senkung des Energie- und Materialbedarfs bei gleichzeitiger Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit. Die Betrachtung von Maschinen und Anlagen als ein cyber-Physisches Produktionssystem (CPPS) bildet daher einen möglichen Rahmen zur Umsetzung von Industrie-4.0-Maßnahmen, welcher zunehmend an Bedeutung gewinnt⁴¹.

4.1 Cyber-physische Produktionssysteme

4.1.1 Modellvorstellung

Grundlegend basieren CPPS auf cyber-physischen Systemen (CPS) und den daraus resultierenden Schnittstellen. Dabei wird die Kommunikation zwischen physischen und Cyber-Komponenten eines Systems mit dem Umfeld der Produktion hergestellt. CPS dienen dazu, softwaretechnische Verbünde zwischen sensorischer Hardware und Datenstrukturen sowie Modellen und Simulationen herzustellen. Grundsätzlich sind CPPS dabei als „human-centered“ anzusehen, sodass der Mensch weiterhin im Mittelpunkt der Operation und der Interaktion steht. Die Human-Machine-Interaction Communication (HMI-C) stellt somit die Grundvoraussetzung zur Bildung eines CPPS dar, da sie die maschinenbedienende Person dazu befähigt, einen verbesserten Betriebszustand einzustellen bzw. diesen aufrechtzuerhalten.^{42 43}

CPPS sind in diesem Zusammenhang als Methodik zur Errichtung von Industrie-4.0-Systemen zu sehen, mit deren Hilfe die komplexen Wechselwirkungen zwischen physischen und virtuellen Komponenten durch datengetriebene oder mechanistische Modelle abgebildet werden können. Auf Basis dieser Wechselwirkungen können Zusammenhänge einfacher wiedergegeben und Rückschlüsse schneller gezogen werden.

CPPS bieten zudem die Möglichkeit, die Entwicklungsstufen von Industrie-4.0-Anwendungen, die von Schuh et al. geprägt wurden, zu durchlaufen und

⁴⁰ Vgl. Monostori, L. (2014).

⁴¹ Vgl. Danelon Lopes, L. C. und Neumann, C. (2021).

⁴² Vgl. Monostori, L. (2014).

⁴³ Vgl. Thiede, S. (2018).

das gesamte Spektrum abzubilden. In Abbildung 9 sind diese Entwicklungsstufen dargestellt. Durch das Zusammenspiel von physischer und virtueller Welt innerhalb des CPPS ist es möglich, sowohl die Stufen der Digitalisierung (Computerisierung, Konnektivität) als auch die in diesem Zusammenhang wichtigen Stufen der Industrie 4.0 widerzuspiegeln. Die Sichtbarkeit und Transparenz sind unterdessen Kernpunkte für den Ersteinsatz von CPPS, besonders dann, wenn im Anwendungsumfeld wenig Erfahrung mit Industrie-4.0-Lösungen vorhanden ist. Die letzten Stufen der Prognosefähigkeit sowie Adaptierbarkeit verweisen vor allem auf die virtuelle Ebene des CPPS, denen in Bezug auf die Einbringung von Modellierungen und Simulationen keine Grenzen gesetzt sind.

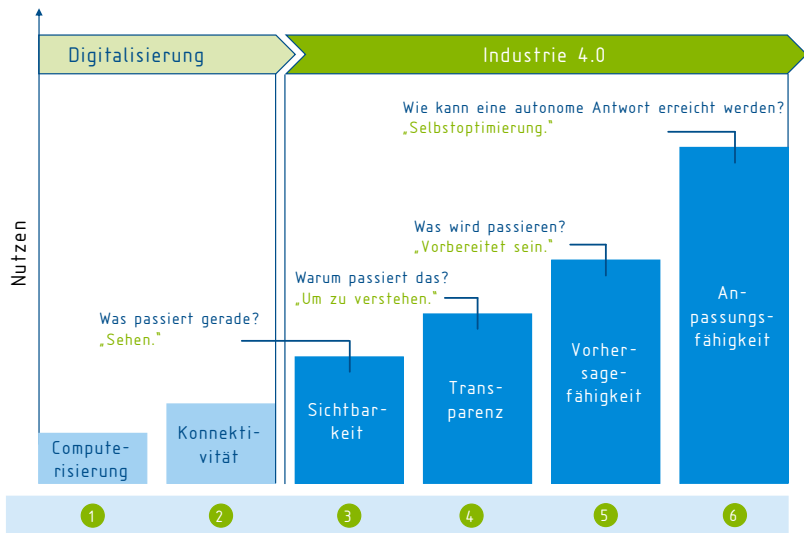


Abbildung 9: Industrie-4.0-Entwicklungsstufen^{44 45}

CPPS sind grundsätzlich echtzeitfähig, wodurch besonders mit Blick auf die Adaptierbarkeit eines Systems oder Retrofit-Maßnahmen Vorteile generiert werden können. Diese Fähigkeit ist allerdings nur realisierbar, sollten das

⁴⁴ Vgl. Schuh, G.; Anderl, R. und Dumitrescu, R.; Krüger, A.; ten Hompel, M.

⁴⁵ In Anlehnung an FIR e. V. at RWTH Aachen University.

CPPS sowie die umgebenden Strukturen und Steuerungen eine ausreichend geringe Latenz zum Produktionssystem vorweisen.

4.1.2 Konstituierende Systembestandteile

Die grundsätzliche Modellvorstellung von CPPS und deren Einordnung in den Kontext der Industrie 4.0 wurden im vorherigen Abschnitt durchgeführt. Im Allgemeinen ist allerdings auch eine Abgrenzung der einzelnen Komponenten in die konstituierenden Bestandteile notwendig (siehe Abbildung 10). Auf der physischen Ebene (I) beziehen sich CPPS, wenn sie, wie im aufgeführten Anwendungsfall auf Werkzeugmaschinen abstrahiert werden, auf sämtliche physischen Komponenten einer Maschinenumgebung. Dazu zählen die Werkzeugmaschine an sich, die Peripherie sowie die einzubringende Sensorik und Hardware für die Umsetzung des CPPS. Dabei entsteht durch die Implementierung von diversen technischen Geräten und neuen Technologien ein größerer ökologischer Rucksack⁴⁶.

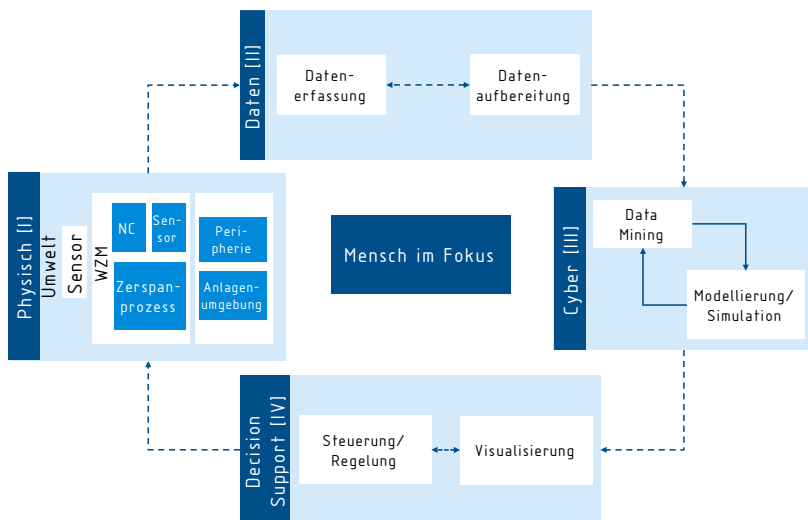


Abbildung 10: Cyber-physisches Produktionssystem^{47 48}

⁴⁶ Vgl. Thiede, S. (2018).

⁴⁷ In Anlehnung an Thiede, S. (2018).

⁴⁸ Vgl. Thiede, S.; Juraschek, M. und Herrmann, C. (2016).

Diesem zunächst negativen Effekt stehen immer die Effizienzsteigerungen, die das System mit sich bringt, entgegen, sodass die physische Ebene als Systembestandteil in einer ersten Iteration stets mit einem erhöhten negativen Einfluss verbunden ist. Die verwendete Sensorik richtet sich dabei auf den jeweiligen Anwendungsfall, der von einer prozessorientierten Sichtweise bis hin zur Fabrikeinordnung der Maschine reichen kann.

Die Datenerfassung und -verarbeitung (II) beziehen sich auf die durch die physische Ebene entstehenden Daten. Hierbei kommen Produktionsdatenbanksysteme zum Einsatz, die speziell für diesen Anwendungszweck entwickelt werden. Diese setzen auf verschiedenen Grundsystemen auf (MySQL, RDS, SQL-Server u. v. m.). Die damit einhergehende Verarbeitung der Daten bezieht eine Vorauswahl und Bereinigung der jeweiligen Datensätze mit ein.

Auf der Cyber-Ebene (III) werden diese Daten anschließend verwendet, um gezielte Aussagen über die physischen Komponenten zu treffen und Rückschlüsse auf das System zuzulassen. Als Hilfsmittel dienen hier die Modellierung und die Simulation als datenbasierte Verbesserung des Prozesses. Dabei sind verschiedene Rückschlüsse auf das bestehende System denkbar, die sich bei stark prozessbezogenen Aspekten (Qualität, Geschwindigkeit, Verfahrenswege etc.) bis hin zu serviceorientierten Strukturen des Maschinensystems verorten lassen⁴⁹.

Auf der Cyber-Ebene kann zwischen datengetriebenen und mechanistischen Modellen unterschieden werden. Dabei sind echtzeitfähige Lösungen möglich, die vorwiegend datengetriebenen Ansätzen folgen. Geeignete Modellierungen oder Methoden, um solche Systeme umzusetzen, beziehen sich beispielsweise auf die Random-Forest Regression⁵⁰, Neuronale Netze⁵¹ oder die Lineare Regression⁵².

Die Lösungen und Ergebnisse, die erarbeitet werden, können unter dem letzten Abschnitt des Kreislaufes, dem Decision Support (IV), aufgenommen und visualisiert werden. Ein CPPS ist als hochiterativer Prozess zu verstehen, der

⁴⁹ Vgl. Mennenga, M.; Rogall, C.; Yang, C.-J.; Wölper, J.; Herrmann, C. und Thiede, S. (2020).

⁵⁰ Vgl. Lee, J.; Noh, S. D.; Kim, H.-J. und Kang, Y.-S. (2018).

⁵¹ Vgl. Kumar, R.; Patil, O.; Nath S, K.; Sangwan, K. S. und Kumar, R. (2021).

⁵² Vgl. Suvarna, M.; Yap, K. S.; Yang, W.; Li, J.; Ng, Y. T. und Wang, X. (2021).

durch die einzelnen Teilbereiche eine Effizienzsteigerung erreichen und eine erweiterte Verbindung zwischen den Prozessen und Eigenschaften bzw. Parametern herstellen kann⁵³. Das Eingreifen in prozessuale Strukturen ist durch die geeignete Hard- und Software am Steuerungsende des Systems möglich, bedarf jedoch häufig eines tiefgehenden Eingriffs in Maschinensteuerungen. Im Zentrum des CPPS befindet sich nach wie vor der Mensch als Faktor des Systems. Durch das nutzungsorientierte Design des CPPS steht stets die Ausrichtung der Komponenten auf eine einfache und leicht zu handhabende Nutzung, aber auch der Bezug zu Methoden und Modellen, im Vordergrund. Das System selbst muss dabei greifbar bleiben, wodurch auch dem Decision Support eine besondere Rolle in diesem Zusammenhang zuteilwird.^{54 55}

4.2 Industrie-4.0-Retrofit

Retrofit in Bezug auf die Industrie bezeichnet eine Modernisierung oder den Ausbau von Maschinen, Anlagen bzw. Betriebsmitteln unter der Prämisse, dass stets ein positiver Effekt durch die Veränderung hervorgerufen wird⁵⁶. Positive Effekte können beispielsweise die Effizienzsteigerung oder die Verlängerung der Lebensdauer sein. Im klassischen Sinne bezeichnen Retrofits das Austauschen von Maschinenteilen oder deren Digitalisierung.⁵⁷ Erweiterungen der ursprünglichen Retrofit-Definition beziehen sich auf die Industrie 4.0 und werden häufig aufgrund des fortgeschrittenen Digitalisierungsgrades von Anlagen als „Smart Retrofit“ bezeichnet^{58 59}. Hierbei ist der Grundgedanke, die Ideen der Industrie 4.0 auf bestehende Anlagen oder Prozesse zu transferieren und den kleinstmöglichen Zeit- und Kostenaufwand aufzubringen⁶⁰. Bei diesen Herausforderungen spielt die generelle digitale Transformation von Unternehmen eine gesonderte Rolle, da hierdurch die Wertschöpfungsketten und Prozesse der Unternehmen die Alltags- und Pro-

⁵³ Vgl. Tao, F.; Qi, Q.; Wang, L. und Nee, A. (2019).

⁵⁴ Vgl. Kumar, R.; Rogall, C.; Thiede, S.; Herrmann, C. und Sangwan, K. S. (2021).

⁵⁵ Vgl. Thiede, S. (2018).

⁵⁶ Vgl. VDMA (2020).

⁵⁷ Vgl. VDMA (2020).

⁵⁸ Vgl. Hamrol, A.; Ciszak, O.; Legutko, S. und Jurczyk, M. (2018).

⁵⁹ Vgl. Al-Maeni, S. S. H.; Kuhnhen, C.; Engel, B. und Schiller, M. (2020).

⁶⁰ Vgl. Hamrol, A.; Ciszak, O.; Legutko, S. und Jurczyk, M. (2018).

duktionsbedingungen in besonderem Maße beeinflussen. Die Implementierung und Integration von digitaler Technik oder neuen Technologien in die bestehenden Umgebungen können als notwendiger Wandel betrachtet werden. Vor allem im Umfeld der effizienteren Fertigung korrelieren die Ziele der Industrie 4.0 erheblich mit Retrofit-Maßnahmen. Dabei können Retrofit-Maßnahmen stets als Enabler für die Industrie 4.0 gesehen werden.⁶¹

Um die Fähigkeit von Retrofit-Maßnahmen zur Initialisierung von Digitalisierung und Industrie 4.0 voll ausnutzen zu können, stellt der VDMA eine Retrofit-Level-Struktur zur Verfügung, aus der Anforderungen in mögliche Aktionen für das Retrofitting überführt werden können (Abbildung 11).

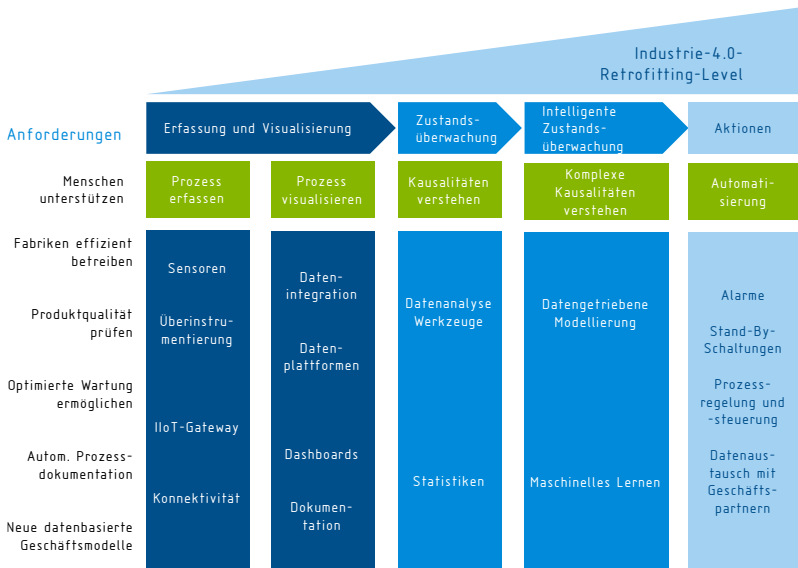


Abbildung 11: Retrofit-Level der Industrie 4.0⁶²

Über das Level-Modell können Retrofit-Maßnahmen mit wenig technischem Aufwand und Know-how (Abbildung 11, in Dunkelblau dargestellt) identifiziert und bis hin zu einer erhöhten Komplexität von Retrofits (Abbildung 11, in Blau und Hellblau dargestellt) ausgearbeitet werden. Das Modell dient vor

⁶¹ Vgl. VDMA (2020).

⁶² Vgl. VDMA (2020).

allem dazu, den aktuellen Stand des eigenen Unternehmens zu identifizieren, um darauf aufbauend mögliche Verbesserungspotenziale herausstellen zu können.⁶³ Es greift auf klassische Industrie-4.0-Maßnahmen zurück und basiert in den komplexeren Leveln auf datengetriebenen Analysemethoden.

Als erweiternder Schritt zu dieser Struktur können die sogenannten Smart-Services für Maschinen und Anlagen genannt werden. Diese umfassen nicht nur die Retrofit-Level, sondern auch die Kommunikation zwischen Anlagen sowie die Erweiterung des Industrie-4.0-Retrofittings zur Erbringung oder Anwendung von Dienstleistungen (Services). Durch die breite Verfügbarkeit an Daten können mithilfe von Analysemethoden (s. Kapitel 4.1.2) konkret zugeschnittene Dienstleistungen angeboten werden, die direkt an die Zielgruppe angepasst sind.

4.3 Retrofit-Maßnahmen für nachhaltige Schleifprozesse

Auf Basis der vorgestellten Level-Strukturen und Modelle werden nun bereits bekannte Retrofit-Maßnahmen vorgestellt (siehe Abbildung 12). Diese dienen im weiteren Verlauf zur Orientierung resp. Ausarbeitung eines spezifischen Anwendungsfalles im Bereich von Werkzeugmaschinen.

Potenziale	Verbesserung der Bauteilqualität, der Anlage oder Ausfallquote	Betriebsoptimale Versorgung, Bedarfsorientierung	Energetisch sinnvolle Betriebszustände, Verschwendungen	Predictive Maintenance, Ausfallquoten- & Ausschussminimierung	Verbesserung der Montagefähigkeit, Rüstzeiten
Cyber-Komponenten	Server, Computer, Modellierung (bspw. Regression)	Server, Computer, Modellierung (bspw. Regression)	Server, Computer, Modellierung (bspw. Regression)	Variabel und frei kombinierbar (Server, Computer)	Computer, AR- oder VR-Equipment
Sensorik	Vibrationssensor (bspw. Bosch XDK)	Durchfluss-, Temperatur-, Drucksensoren	Leistungsmessgerät	Frei kombinierbar	Frei kombinierbar; Augmented-, Virtual-Reality
Retrofit-Maßnahme	Schwingungs- und Vibrationsretrofit	Kühlschmierstoff-Retrofit	Energie-Retrofit	Condition-Monitoring-Retrofit	Mensch-Maschine-Retrofit

Auswahl an Retrofit-Maßnahmen für nachhaltige Schleifprozesse

Abbildung 12: Einordnung der Retrofit-Maßnahmen innerhalb der Beispielszenarien

⁶³ Vgl. VDMA (2020).

Dabei ordnen sich diese vorgeschlagenen Retrofit-Maßnahmen als übergeordnete Lösungen ein, die auf Basis von z. B. der Level-Struktur aus Abbildung 11 erreicht werden können. Die möglichen Aktionen in einem Retrofit, beispielsweise die datengetriebene Modellierung oder der Einsatz von maschinellem Lernen, dienen in diesem Fall nicht als Ergebnis des Retrofits, sondern lediglich als Mittel zur Durchführung und Erreichung des Ziels. Im Folgenden finden sich einige Beispiele für Retrofit-Maßnahmen unter Berücksichtigung der Industrie 4.0:

- Schwingungs- und Vibrationsretrofit

Die Vibrationsmessung ist in Ansätzen bereits als Retrofit spezifiziert⁶⁴. Explizit wird hier geeignete Sensorik für die Vibrationsmessung nah am zu betrachtenden Prozess angebracht und durch ein Backend-System verarbeitet. Die Datenverarbeitung erfolgt prozessnah und erfordert wenige Installationsschritte, welche für KMU umsetzbar sind. Als Potenziale ergeben sich hier die Verbesserung von Bauteilqualitäten, der optimierte Betrieb der Anlage sowie das Vorhersagen von Ausfällen.

- Kühlschmierstoff-Retrofit

Im Bereich der KSS-Versorgung konnten bereits enorme energetische, aber auch allgemein ökologische Verbesserungen erreicht werden⁶⁵. Ein KSS-Retrofit beinhaltet beispielsweise die Messung von Durchflussmengen sowie der allgemeinen Temperierung und Drücke in Prozessen. Dabei ist ebenfalls eine intelligente Prozessanpassung nötig, um etwaige Erkenntnisse direkt in den Prozess einbringen zu können. Bei Retrofit-Maßnahmen zum KSS liegen die Vorteile vor allem im Bereich der betrieboptimalen Versorgung mit KSS sowie der Verringerung des CO₂-Footprints. Wie in Abschnitt 3 erläutert, bieten diese Formen des Retrofits aufgrund des großen Einflusses von KSS auf die Wertschöpfung eines Produktes besonders hohes Potenzial.

⁶⁴ Vgl. VDMA (2020).

⁶⁵ Vgl. Winter, M. (2016).

- Energie-Retrofit

Die Installation eines Energie-Retrofits umfasst die ganzheitliche Messung aller Energieversorgungen der Anlage und deren Überwachung. Dabei werden im Allgemeinen methodische Kenntnisse wie der Energie-Wertstrom oder Energy-Breakdown-Analysen angewandt, um eine signifikante Datengrundlage in Erkenntnisse und Verbesserungen des Prozesses umzuwandeln. Dies kann z. B. zu optimierten Prozessketten oder energetisch sinnvollen Betriebszuständen führen.⁶⁶

- Condition-Monitoring-Retrofit

Das Condition-Monitoring beinhaltet nicht nur die Messung von Schwingungsdaten, sondern vielmehr die ganzheitliche Abdeckung der Umgebungsdaten der Anlage, sodass ein digitales Abbild, ein sogenannter digitaler Schatten, erstellt werden kann^{67 68}. Diese Umsetzung erfordert komplexe Sensorik und deren Vernetzung zur optimalen Aufnahme datenbasierter Zustände, um so beispielsweise Ausfälle vorhersagen zu können.

- Mensch-Maschine-Retrofit

Die Mensch-Maschine Interaktion (MMI) gilt als notwendiges Instrument der Industrie 4.0, da der Mensch als Faktor nach wie vor im Zentrum der Betrachtungen steht⁶⁹. Bei einem MMI-Retrofit sind Hilfsmittel wie die Entwicklung von Augmented- oder Virtual-Reality-Anwendungen notwendig, die in diesem spezifischen Fall den Anwendenden unterstützen, optimale Betriebszustände oder Instandhaltungen vorzunehmen. Dementsprechend ist auch für den MMI-Retrofit eine umfangreiche, komplexe Sensorik erforderlich, um datenbasiert die für die MMI notwendigen Aussagen treffen zu können.

⁶⁶ Vgl. VDMA (2020).

⁶⁷ Vgl. Engels, G. (2020).

⁶⁸ Vgl. Anisic, Z.; Lalic, B. und Gracanin, D. (2020).

⁶⁹ Vgl. Roth, A. (2016).

5 VERGLEICHENDE ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

5.1 Untersuchungsrahmen

Im Rahmen der Studie sollen Industrie-4.0-Retrofit-Maßnahmen als Werkzeug zur Reduktion der Umweltwirkungen von Schleifprozessen ökologisch und ökonomisch evaluiert werden, um die Vorzüge für deren industrielle Anwendung einfach und nachvollziehbar hervorzuheben. Die Vorgehensweise sowie der Versuchsaufbau sind dabei so gewählt, dass sie als Blaupause für eine industrielle Umsetzung dienlich sind.

Als ökonomisch und ökologisch relevanter Anwendungsfall am Ende von Prozess- und damit Wertschöpfungsketten wird das Außenrundschleifen als Zerspanungsprozess gewählt. Es wird zudem eine Maschine herangezogen, deren Alter mit 15 Jahren repräsentativ für Maschinen in deutschen Maschinenparks ist. Als typischer Wälzlagerstahl wird ein gehärtetes Werkstück aus 100Cr6 als Referenzbauteil eingesetzt. Die Schleifbearbeitung gehärteter Stähle erfolgt konventionell mit Korund, weshalb eine Korund-Schleifscheibe als Bearbeitungswerkzeug eingesetzt wird. Für sämtliche Versuchsfälle werden gleiche Abrichtbedingungen vorausgesetzt, die den Werkzeugverschleiß ausreichend kompensieren. Der Bearbeitungs-KSS ist ein nicht-wassermischbarer, mineralölbasierter KSS. Notwendige periphere Anlagen zum Betrieb des KSS-Kreislaufes sind Abluftanlagen sowie Filtrations- und Versorgungsanlagen. Insbesondere die KSS-Versorgung bietet aufgrund zu meist überdimensionierter Pumpenanlagen Einsparpotenziale, die wegen mangelnder Datentransparenz oftmals nicht erkannt werden. In der vorliegenden Studie werden daher periphere Anlagen mitberücksichtigt.

Auf Basis der beschriebenen Retrofit-Maßnahmen und Möglichkeiten werden für den Anwendungsfall dieser Studie drei verschiedene Arten des Retrofittings miteinander verglichen und in Produktionsbedingungen unter möglichst realen Bedingungen dargestellt. Aufgrund der bisher nicht vorhandenen Energietransparenz der Anlage und des großen wirtschaftlichen wie ökologischen Einflusses wird als erste Retrofit-Maßnahme auf einen Energie-Retrofit zurückgegriffen. Das Ziel hierbei ist die Abbildung der Leistungsaufnahme der Anlage auf der virtuellen Ebene, um somit Verschwen-

dungen und Potenziale aufzudecken. Die energetische Abbildung unterstützt den bedarfsorientierten Betrieb der Schleifmaschine. Um den Prozess des Schleifens optimal beschreiben zu können, wird zudem ein Schwingungs- und Vibrationsretrofit durchgeführt. Dieser unterstützt die Sicherstellung der Bauteilqualität und lässt Rückschlüsse auf die Anpassung des Prozesses zu, je nach Verbesserungsmaßnahme, die aufgrund der Datenlage durchgeführt wird. Des Weiteren ist es das Ziel, den Maschinenzustand transparenter und besser planbar zu machen. Aus diesem Grund wird ein Condition-Monitoring-Retrofit eingesetzt. Der Energie- sowie Schwingungs- und Vibrationsretrofit ist als Teil des Condition-Monitorings zu verstehen. Daher ist letzterer als kombinierbar und in verschiedenen Stufen durchführbar anzusehen. Die ausführliche Erläuterung dieser Retrofits erfolgt detailliert in Kapitel 5.1.3 im Zusammenhang mit der ökologischen Bewertung und ökonomischen Analyse.

5.1.1 Systemgrenzen

Die produktionstechnischen Systemgrenzen der Studie beziehen sich auf die Werkzeugmaschine, die peripheren Anlagen sowie das CPPS. In Abbildung 13 ist die Eingrenzung des Studienbereiches und des Produktionsumfeldes dargestellt.

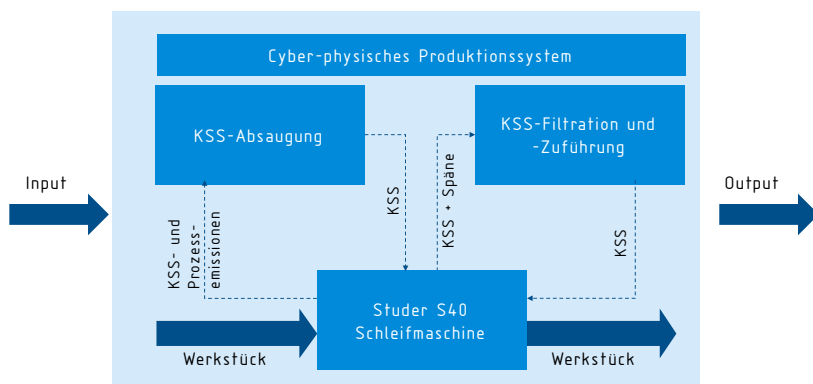


Abbildung 13: Systemgrenzen des produktionstechnischen Anwendungsfalles⁷⁰

⁷⁰ In Anlehnung an Madanchi, N.; Kurle, D.; Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2015).

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Aspekte des Maschinenumfeldes näher beleuchtet und auf Basis der in den vorherigen Kapiteln dargelegten Grundlagen definiert. Dabei werden zunächst die Werkzeugmaschine und der Prozess selbst erläutert. Darauf folgen die peripheren Anlagen des Systems und die Prozesseigenschaften, um im letzten Schritt die Eingrenzung des CPPS vorzunehmen.

Im Rahmen der ökologischen Bewertung wird ein ganzheitlicher Cradle-to-grave-Ansatz verfolgt, der sich auf das Umfeld, das in Abbildung 13 dargestellt wird, bezieht und sämtliche Ressourcen berücksichtigt, die in den beschriebenen Szenarien benötigt werden. Hierbei werden im Einzelnen die Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung, Produktherstellung, Nutzung (inkl. Wartungen) und Entsorgung sowie die wichtigsten Transportprozesse zwischen diesen Lebenszyklusphasen betrachtet (s. Abbildung 14). Die Berechnung der Umweltauswirkungen der Schleifmaschine über ihren Lebenszyklus hinweg ist nicht Gegenstand der Untersuchung. Ausgenommen hiervon sind die In- und Outputs, die während der Restlebensdauer der Maschine beim Schleifprozess anfallen (beispielsweise Strom, Rohstoffe für Kühlschmierstoffe und Filtervlies, Produktionsabfälle), da diese abhängig vom Vorhandensein der Retrofit-Maßnahmen unterschiedlich ausfallen werden. In den Retrofit-Szenarien wird der gesamte Lebenszyklus der benötigten CPPS-Komponenten betrachtet.

- **Rohstoffgewinnung:** Alle Rohstoffe, die für die Herstellung der CPPS-Komponenten und der Produkte, die für den Betrieb und die Wartung der Schleifmaschine benötigt werden (beispielsweise Kühlschmierstoffe und Filtervlies), werden in der Sachbilanz für diese Lebenszyklusphase berücksichtigt.
- **Produktherstellung:** In dieser Lebenszyklusphase werden sämtliche Material- und Energieeinsätze erfasst, die für die Zusammensetzung der Rohstoffe zu nutzbaren Komponenten bzw. Produkten erforderlich sind.
- **Nutzung (inkl. Wartungen):** In Bezug auf die Nutzungsphase wird der Strombedarf als Input erfasst, der für den Betrieb der Schleifmaschine ohne bzw. mit Retrofit-Maßnahme notwendig ist.

- Entsorgung:** Basierend auf der WEEE-Richtlinie (2012/19/EU) wird davon ausgegangen, dass elektronische Altgeräte fachgerecht entsorgt und bestehenden Recyclingströmen zugeführt werden. Für die verbrauchten Kühlschmierstoffe und die bei der Filtration verwendeten Vliese wird als üblicher Entsorgungsweg die thermische Verwertung angenommen.
- Transportprozesse:** Im Rahmen der ökologischen Bewertung werden zudem die zwei wichtigsten Transportprozesse in Betracht gezogen: zum einen der Transport der eingesetzten Produkte (CPPS-Komponenten, Kühlschmierstoffe, Filtervlies) vom jeweiligen Werkstor der Produktion zum Einsatzort (Business-to-Consumer Logistik), zum anderen der Transport derselben Produkte vom Einsatzort zu den jeweiligen Entsorgungseinrichtungen (Recycling- und Müllverbrennungsanlage).

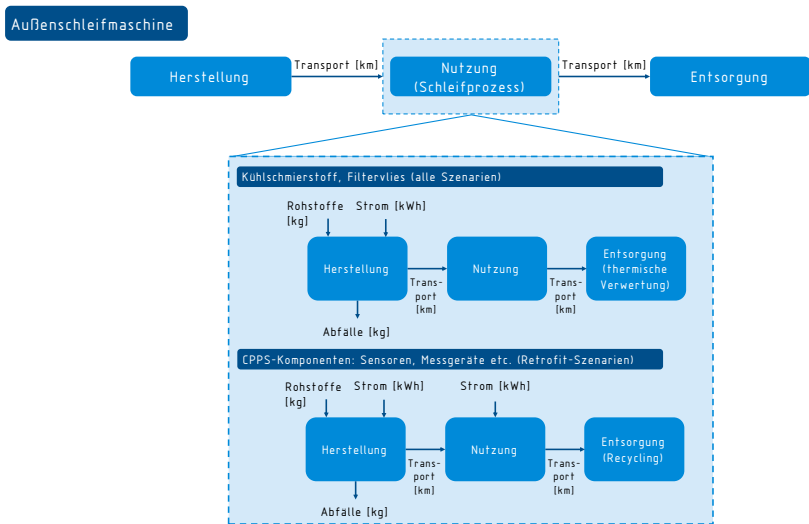


Abbildung 14: Systemgrenze der betrachteten Szenarien (ökologische und ökonomische Bewertung)

5.1.1.1 Referenzmaschine

Als Referenzmaschine wird eine Werkzeugmaschine aus dem Maschinenpark gewählt, die keinerlei digitalisierte Erweiterungen enthält, sich aufgrund ihres Alters (Baujahr 2007) für Retrofit-Maßnahmen eignet und somit eine vergleichbare Maschine für den deutschlandweiten Trend sein könnte. Bei der Referenzmaschine handelt es sich um die Außenrundscheifmaschine Studer S40 inklusive Kühlschmierstoffsystem (s. Kapitel 5.1.1.2). In Abbildung 15 findet sich eine Außendarstellung der Schleifmaschine zur Veranschaulichung.



Abbildung 15: Referenzmaschine Studer S40⁷¹

Die allgemeinen Daten der Maschine finden sich in Tabelle 6. Die Schleifmaschine wird als „CNC-Universal-Rundscheifmaschine“ bezeichnet, beweist ihre Versatilität durch die vier Spindeltriebe (ein Abrichter und drei Werkzeugspindeln) und stellt die Möglichkeit für das Außenrund- sowie Innenschleifen zur Verfügung. Dabei bietet die Studer S40 ebenfalls die Option für Hochgeschwindigkeitsbearbeitungen, die in besonderen Anwendungsfällen notwendig bzw. hilfreich sein können. Da hierfür allerdings besondere Prozess- und Produktbedingungen erfüllt sein müssen, wird im Referenzsystem

⁷¹ H. Engel, IWF/TU Braunschweig.

der Studie nur die Standardbearbeitung der Maschine – das Außenrundschleifen unter konventionellen Geschwindigkeiten (Spindel 2) – berücksichtigt.

Tabelle 6: Spezifikationen der Referenzmaschine⁷²

Spezifikation	Studer S40 Daten
Abmaße (Aufstellfläche, L, B, H)	4717 mm/2095 mm/1745 mm
Spindel 1	15 kW Leistung mit Schnittgeschwindigkeiten bis zu 140 m/s bei einem Schleifscheibendurchmesser von 500 mm
Spindel 2	9 kW Leistung mit Schnittgeschwindigkeiten bis zu 50 m/s bei einem Schleifscheibendurchmesser von 500 mm
Spindel 3 (Innenschleifspindel)	Schnittgeschwindigkeiten im Bereich 24000-42000 1/min
Auslegung (KSS)	Für Kühlschmierstoffe oder Öle ausgelegt (momentan mit Öl betrieben) und über Hoffmann Filtersystem geregelt
Auslegung (Abluft)	Abluftfiltration wird über das Hoffmann Filtersystem abgewickelt, als außenstehender Dunstabscheider

5.1.1.2 Periphere Anlagen

Die peripheren Anlagen des Referenzsystems beziehen sich auf die Kühlschmierstoff- sowie die Abluftfiltration für die Schleifmaschine. Beide Systeme stellen notwendige Erweiterungen zur Referenzmaschine dar, wobei ein ganzheitliches Entfernen der zusätzlichen Anlagen nicht möglich ist.

Abbildung 16 zeigt auf der linken Seite die Abluftfiltration und rechts die KSS-Filtrationsanlage inklusive des Bandfilters und der Versorgungspumpen sowie der Hebepumpe.

Die Hauptaufgaben des KSS-Filtrationssystems liegen in der Zuführung bzw. Abführung des Kühlschmierstoffes in direkter Verbindung mit der Schleifmaschine sowie der Filtration des KSS, der in diesem Fall Öl ist und in Kapitel 5.1.1.4 beschrieben wird, über ein Filterband. Für die Zuführung des Kühlschmierstoffes ist eine Pumpenanlage im Filtersystem integriert, die drei Maschinenversorgungs- sowie eine Rückführungs-(Hebe-)Pumpe umfasst. Dabei werden nicht zu jeder Zeit alle Versorgungspumpen angesteuert, sondern lediglich die für die Bearbeitung notwendige Pumpe. Bei einer

⁷² IWF/TU Braunschweig und Fritz Studer AG.

Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, sind also erhöhte Verbräuche und Aufwände zu erwarten. Die Zu- und Abfuhrpumpen sind nicht regelbar.



Abbildung 16: Periphere Anlagen des Referenzsystems (links: Abluft, rechts: KSS-Filtration)⁷³

Abbildung 17 sind entsprechende Zusammenhänge und Beziehungen innerhalb des peripheren Systems zu entnehmen. Die KSS-Filtration wird mit elektrischer Energie betrieben und gibt entölte Späne, die eine Restfeuchte aufweisen, als Abfall ab. Die Werkzeugmaschine erhält je nach Bearbeitung durch die Versorgungspumpen den Kühlschmierstoff und liefert über den Rücklauf das verwendete KSS inkl. Späne, die sich im Fluid befinden, zurück.

Die KSS-Absaugung bzw. Abluftfiltration des Referenzsystems ist direkt mit der Schleifmaschine verbunden, um jegliche Prozessluft aus dem Maschineninnenraum absaugen zu können. Betrieben wird die Absaugung über einen Lüftermotor. Die Filtration der Abluft wird über eine dreistufige Abscheidung erreicht. Dabei wird zunächst durch einen Demister vorsepariert, während darauffolgend die Vorfiltration stattfindet. Im dritten Schritt ist eine Feinfiltration durch eine Schwebstoff-Filterkassette notwendig, sodass saubere Luft aus dem Filter abgeschieden werden kann.

⁷³ H. Engel, IWF/TU Braunschweig.

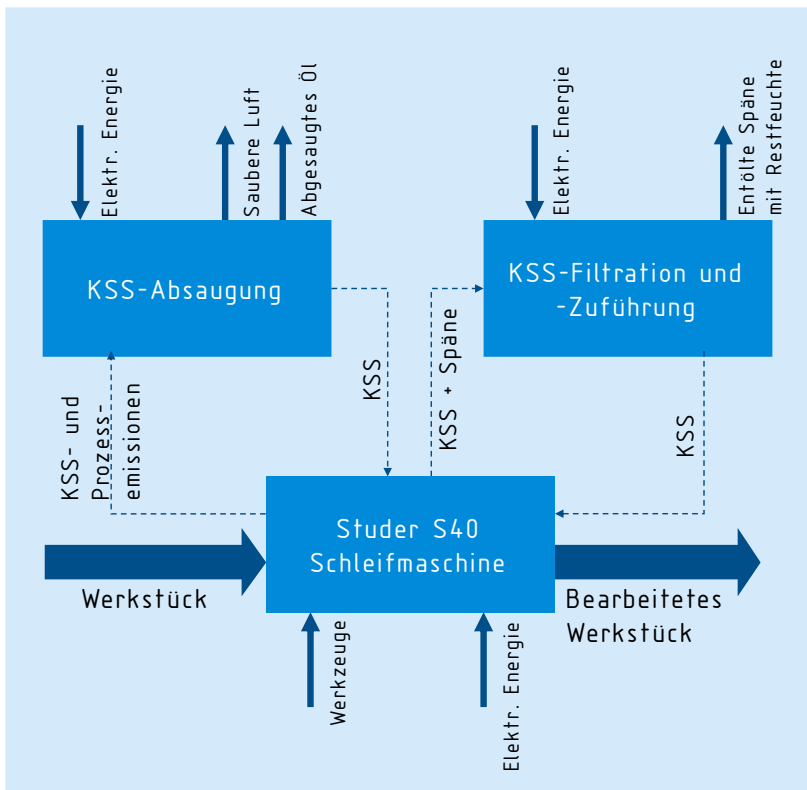


Abbildung 17: Zusammenhang der peripheren Anlagen und der Referenzmaschine⁷⁴

Gemäß der Darstellung in Abbildung 17 wird die Absaugung mit elektrischer Energie versorgt und gibt diese saubere Luft an die Umwelt ab. Zusätzlich wird im Zuge der Bearbeitung eine gewisse Menge Öl abgesaugt, die sich ungefähr auf 0,1 Gramm pro Sekunde beläuft⁷⁵. Durch die KSS-Versorgung der Maschine werden innerhalb der Bearbeitung KSS- sowie Prozess- bzw. Bearbeitungsemissionen emittiert, die durch die Absaugung gereinigt werden können. Aufgrund der gesetzlichen Richtlinien zu Arbeitsplatzgrenzwerten bei der Arbeit mit Kühlschmierstoffen kann die Abluftfiltration bzw.

⁷⁴ In Anlehnung an Madanchi, N.; Kurle, D.; Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2015).

⁷⁵ Vgl. Madanchi, N.; Winter, M. und Herrmann, C. (2015).

die Absauganlage nicht ohne weiteres vollständig abgeschaltet werden.⁷⁶ Die verbaute Absauganlage erreicht eine Absaugleistung von ca. 40 m³/min⁷⁷ und übertrifft damit etwaige Anforderungen.

5.1.1.3 Referenzwerkstück und Prozessparameter

Ein bekannter und verbreiteter Anwendungsfall für Schleifprozesse ist das Außenrundsleifen von Lagerringen. Für die Studie wird daher ein Ring aus 100Cr6 mit einer Härte von 62 HRC als Referenzbauteil eingesetzt. Der Initialdurchmesser der Ringe beträgt 150 mm bei einem Innendurchmesser von 50 mm und einer Werkstückbreite von 10 mm. Die Bearbeitung erfolgt im Gegenlauf (Abbildung 18).

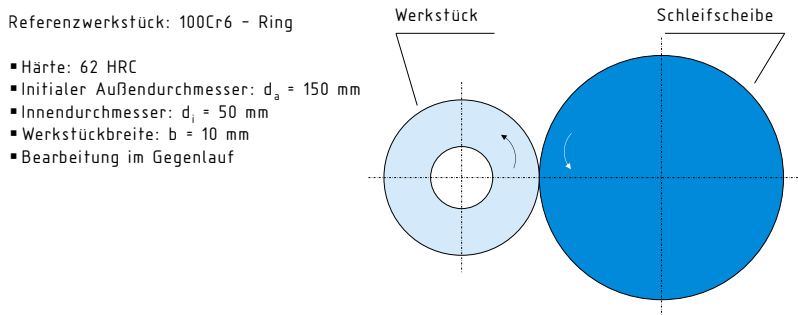


Abbildung 18: Initiale Dimensionen des Referenzwerkstücks

Die Prozessparameter für die Schleifbearbeitung bilden einen Standardversuch unter realen Produktionsbedingungen ab. Die Parameter befinden sich nicht in einem Grenzbereich der Maschine und sind in Tabelle 7 abgebildet.

Tabelle 7: Prozessparameter des Schleifvorganges

Schleifparameter	Einheit	Wert
Spanvolumen	mm ³	1.400
Schnittgeschwindigkeit	m/s	35
Werkstückgeschwindigkeit	m/s	0,3475
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	0,207 (Schruppen) bis 0,0155 (Feinschichten)

⁷⁶ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung.

⁷⁷ Vgl. Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH.

5.1.1.4 Referenzkühlschmierstoff

In der Industrie sind zum einen wasserbasierte KSS (Emulsionen), zum anderen mineralölbasierte, nichtwassermischbare KSS verbreitet. Mineralölbasierte KSS bieten einen hohen Korrosionsschutz und haben in der Regel eine längere Lebensdauer als wasserbasierte KSS. Demgegenüber stehen jedoch hohe Anschaffungskosten und Umweltauswirkungen. Um einen kosten- und emissionsrelevanten Praxisfall abzubilden, wird in der vorliegenden Studie ein mineralölbasierter KSS mit vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten zur Stahlbearbeitung eingesetzt. Der verwendete KSS Berucut SCO 310 der Firma Bechem beinhaltet Extreme-Pressure-(EP-) und Anti-Wear-(AW-)Additive und ist damit repräsentativ für handelsübliche KSS. Eine genaue Zusammensetzung des KSS ist nicht bekannt und die Rezeptur wird herstellerseitig verschwiegen, weshalb für den KSS Erfahrungs- bzw. Schätzwerte herangezogen werden. Die fehlende bzw. mangelhafte Datenbasis zu Additivpaketen wurde in einer Studie zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von KSS als nicht ausreichend bewertet, weshalb Additivpakete oftmals bilanziell nicht berücksichtigt werden⁷⁸.

5.1.1.5 Retrofit-Maßnahmen zum Aufbau eines CPPS

Das cyber-physische Messsystem resultiert aus einem grundlegenden cyber-physischen Produktionssystem, wie in Abschnitt 4.1 erläutert. Das System, das explizit in Verbindung mit der Referenzmaschine umgesetzt wurde, basiert somit auf der Wechselbeziehung zwischen der physischen und Cyber-Ebene eines CPPS. Der Retrofit der Referenz-Schleifmaschine wird unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen sowie der ausgewählten Retrofit-Maßnahmen durchgeführt. Aufgrund dessen sind verschiedene Sensoriken und die Prozessaufnahme notwendig. In Abbildung 19 ist die Aufstellung des CPPS unter Berücksichtigung der Messtechnik sowie der Beziehungen zwischen den einzelnen Bereichen dargestellt. Für den Aufbau eines solchen CPPS in Zusammenhang mit erweiterter Sensorik sind daher verschiedene Ablaufszenarien denkbar. Im vorliegenden Fall stammt die Sensorik direkt aus den Retrofit-Maßnahmen und ist aufgrund der Auswahl vorgegeben. Allerdings ist es denkbar, dass diese Vorauswahl in der Industrie nicht durchgeführt werden kann, da keine Retrofit-Maßnahmen ausgewählt werden,

⁷⁸ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017b).

sondern klare Ziele (beispielsweise Steigerung der Energieeffizienz) vorgegeben sind. Für diese Fälle gibt es in der Literatur weiterführende Auswahlmöglichkeiten und Methoden, die eine Anwendung zum Aufbau von CPPS zulassen.⁷⁹

Auf der physischen Ebene (I) befinden sich die Referenzmaschine (inkl. Abluftfiltration) und die KSS-Anlage als grundsätzliche physische Operationsgegenstände im CPPS. Zusätzlich werden für den Energie-Retrofit die entsprechenden Leistungsmessungen integriert, die die KSS-Anlagenleistung sowie die Referenzmaschinenleistung aufnehmen. Die dargestellten Sensor-knoten (Bosch XDK) werden für den Condition-Monitoring-Retrofit in den Prozess eingebracht. Diese sind in der Lage, verschiedene Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Beschleunigung, gyroskopische Lage, Geräusche u. v. m., zu monitoren. Für den Schwingungs- und Vibrationsretrofit wird eine Beschleunigungsmessung integriert, die mittels Beckhoff ELM3602-Klemme und des verbundenen piezoelektrischen Schwingungsaufnehmers realisiert wird.

Die Sensoren liefern die erforderlichen Daten, um in Bereich II des CPPS die Datenerfassung zu implementieren und diese im folgenden Schritt aufzubereiten. Die räumliche Anordnung und die zur Erfassung notwendigen technischen Hilfsmittel werden im Nachfolgenden ausführlicher erläutert.

Im dritten Bereich (III) des CPPS werden die Daten modelliert und evaluiert. Dies geschieht unter Prozessgesichtspunkten und anhand eines direkten Vergleichs der einzelnen Prozesse. Aus dieser Evaluierung können Maßnahmen abgeleitet werden, die über die Visualisierung in Bereich IV, dem Decision Support, abgebildet werden und somit wieder Einfluss auf das physische Referenzsystem (Bereich I) nehmen. Diese Maßnahmen entstehen im Anwendungsfall durch die Analyse der vorhandenen Daten. Der genaue Szenarien-Ablauf findet sich in Kapitel 5.1.3.

⁷⁹ Vgl. Rogall, C.; Mennenga, M.; Herrmann, C. und Thiede, S. (2022).

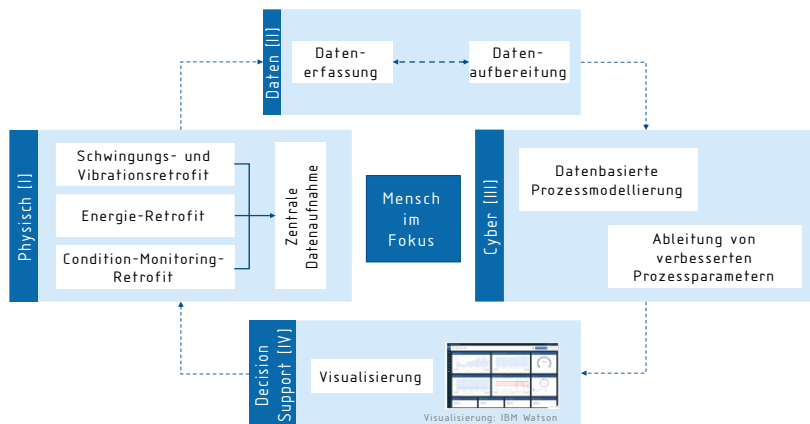


Abbildung 19: Cyber-physisches Produktionssystem des Referenzsystems

Die schematische Anordnung im Raum und die Datenaufnahme sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Leistungsmessung ist an der Kühlschmierstofffiltration sowie der Schleifmaschine angeschlossen, während über letzteres auch die Leistung der Abluftfiltration erfasst wird. Die Beschleunigungsmessung findet oberhalb der Werkstückspindel statt, damit die Vibrationen, die in das Werkstück eingeleitet werden, berechnet werden können. Die Sensorknoten werden sowohl oberhalb der Werkstückspindel als auch auf der Werkzeugspindel angebracht, um die Umgebungsfaktoren für das Condition-Monitoring erfassen zu können.

Für die Verarbeitung der Daten wird ein Raspberry Pi nahe der Maschine und Sensoren angebracht, das WLAN zur Kommunikation und MQTT, als etabliertes Internet-of-Things-Protokoll, werden zur Datenerfassung bereitgestellt. Hinzu kommt ein Computer für die Auswertung und Aufnahme der weiteren Datensätze. Das gesamte Setup bietet somit einen leichten Transfer auf andere Anwendungsfälle oder Maschinen, ist nicht in die Maschine integriert und daher jederzeit wieder demontier- und deinstallierbar. Gleichermaßen arbeitet das sensorische System im Bereich der „Low-Cost-Sensorik“, sodass es im Vergleich zu fertigen industriellen Lösungen mit niedrigen Kosten verbunden ist.

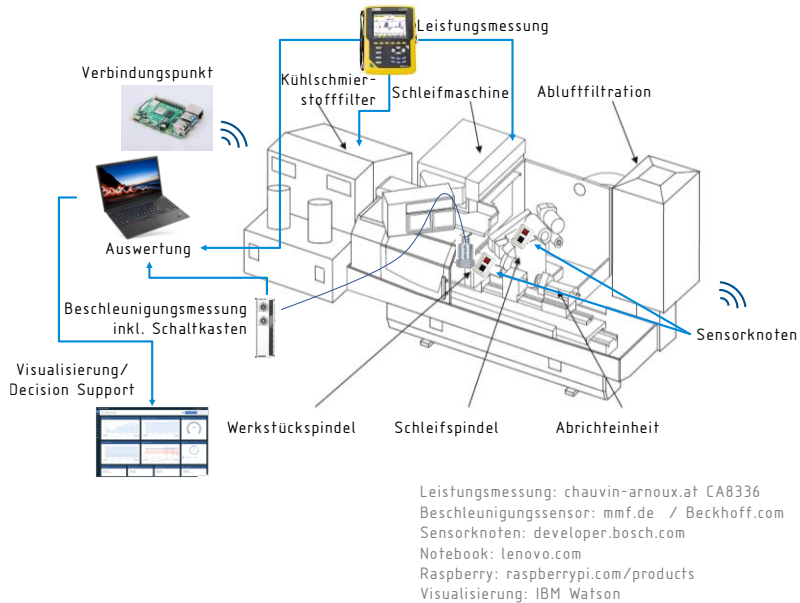


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Referenzsystems⁸⁰

5.1.2 Funktionelle Einheit

Für den bilanziellen Vergleich ist die Definition einer funktionellen Einheit erforderlich. Die funktionelle Einheit eines Systems bezeichnet nach DIN EN ISO 14044:2006 einen quantifizierten Nutzen eines produzierenden Systems, der als Vergleichseinheit verwendet wird. Im vorliegenden Fall wird für die Bearbeitung eines einzelnen Bauteils ein Spanvolumen von $1,4 \text{ cm}^3$ bei einer Bearbeitungszeit von $1,6388 \text{ min}$ als Standardversuch gewählt.

Um ein Produktionsszenario abzubilden, werden zunächst Daten eines schleifenden Produktionssystems aus der Literatur als Basis herangezogen⁸¹. Im Szenario wird die Produktionsmaschine 250 Arbeitstage im Jahr

⁸⁰ In Anlehnung an Winter, M. (2016).

⁸¹ Vgl. Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2015).

bei einer produktiven Auslastung von 80 % in einem Einschichtsystem betrieben (Tabelle 8). Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung einer achtstündigen Schicht eine produktive Maschinenauslastung von 1.600 h pro Jahr.

Tabelle 8: Funktionelle Einheit bezogen auf ein Produktionsszenario einer einzelnen Maschine

Größe	Einheit	Wert
Arbeitstage pro Jahr	Tage/Jahr	250
Schichten pro Tag	-	1
Schichtdauer pro Tag	h/Tag	8
Betriebszeit pro Jahr	%	80
Produktive Maschinenauslastung	h	1.600
Spanmenge pro Referenzwerkstück	cm ³ /Stück	1,4
Schnittzeit pro Referenzwerkstück	min/Stück	1,6388
Produzierte Stückzahl pro Jahr	Stück/Jahr	58.579
Spanvolumen pro Jahr	cm³/Jahr	82.010

Die funktionelle Einheit ist dem genannten Szenario nach entweder eine produzierte Stückzahl von 58.579 Bauteilen oder ein zerspantes Volumen von 82.010 cm³ pro Jahr. Für die finale Bilanzierung verschiedener Szenarien werden die erforderlichen Daten im Folgenden inventarisiert.

5.1.3 Szenarienbeschreibung zum Versuchsablauf

Auf Basis des erläuterten Retrofit-Maßnahmenpakets, das einen Energie-, Condition-Monitoring- sowie Schwingungs- und Vibrationsretrofit beinhaltet, werden im Folgenden die grundsätzlichen Ergebnisse und Erkenntnisse des Versuchsablaufes dargestellt. Um geeignete Werte zu generieren, die eine ökonomische und ökologische Bewertung des Retrofits zulassen, werden Referenzversuche in der dargestellten Maschinenumgebung durchgeführt, die auf das Produktionsszenario aus Kapitel 5.1.2 als vergleichbare funktionelle Einheit zurückgeführt werden können.

Innerhalb des Versuchs wird ein Referenz-Szenario betrachtet, das unterschiedlichen Retrofit-Maßnahmen mit dazugehörigen ökologischen Nachhaltigkeitszielen gegenübergestellt wird (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Gegenüberstellung des Referenz- und Retrofit-Szenarios

Referenz-Szenario	Retrofit-Maßnahme 1	Retrofit-Maßnahme 2	Retrofit-Maßnahme 3
Konventioneller Schleifprozess	Energie-Retrofit	Schwingungs- und Vibrationsretrofit	Condition-Monitoring-Retrofit
Nachhaltigkeitsziel	Energetische Verringerungen minimieren	Verbesserung der Bauteilqualität in Zusammenhang mit einem energetisch optimalen Betriebszustand	Ganzheitliche Überwachung der Anlage - energetisch - qualitativ

Das gewählte Retrofit-Szenario enthält ein Konglomerat von drei Retrofit-Maßnahmen (Energie-, Schwingungs- und Vibrations- sowie Condition-Monitoring-Retrofit). Mithilfe dieser Retrofit-Maßnahmen ist es möglich, zahlreiche Verbesserungspotenziale am Referenzsystem zu erreichen, seien diese prozessualer oder technischer Herkunft. Dabei ist zunächst – selbst mithilfe des eingeführten CPPS – keine automatische Verbesserung des Gesamtsystems zu erwarten. Der initiale Mehrwert der Retrofit-Maßnahmen liegt ausschließlich in der Transparenzschaffung innerhalb des Prozesses (Analyse des Ist-Zustandes). Erst in den Folgeschritten und der Analyse der Daten auf Cyber-Ebene des CPPS sind die Modellierung und Simulation von etwaigen Verbesserungen möglich.

Darüber hinaus werden im Folgenden beispielhafte Verbesserungen, die realistischen Szenarien entsprechen, aus dem transparenten Datenzustand der Maschine abgeleitet und für die ökonomische sowie ökologische Bewertung hinzugezogen, um eine Vergleichbarkeit von Referenz- und Retrofit-Szenario herstellen zu können. Daher wird in der vorliegenden Studie aus der genannten Transparenz heraus argumentiert und ein konkreter Anwendungsfall generiert, der allerdings auf die hohe Variantenvielfalt von Markt und Unternehmen transferierbar bleibt. Dabei werden die Verbesserungen, die aus der Datenaufnahme des CPPS entstehen und durch die Cyber-Ebene generiert werden, im Anwendungsfall nicht automatisiert. Dies begründet sich im expliziten Fall durch den weiteren Einbezug des Menschen in den Prozess.

Vor allem in diesem Punkt ist eine erhöhte Komplexität durch die Automatisierung der Verbesserungen und Datenverarbeitung für den Transfer der Lösung hinderlich und würde das Know-how und den Einfluss der Mitarbeitenden im Prozess minimieren. Daher ist in diesem spezifischen Fall eine Maßnahmenumsetzung nur auf Basis von Handlungsempfehlungen durch den Decision Support gegeben.

Die unterschiedlichen Retrofit-Szenarien liefern Prozessdaten, die eine Umsetzung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Strategien zur Steigerung der Material- und Energieeffizienzen ermöglichen. Die konkreten Daten sowie einfachen Ansätze zu deren Aufbereitung und zur Ableitung einer Entscheidungsunterstützung werden nachfolgend beschrieben.

Energie-Retrofit

Den Ansatz für diesen ökologischen und ökonomischen Vergleich und dessen Bewertung für Retrofit-Maßnahmen im Industrie-4.0-Kontext bietet die Leistungsmessung der Anlage. Durch eine echtzeitfähige Analyse des Energiebedarfs kann im Bereich der Produktionsplanung und Maschinenauslegung, aber auch während des Betriebs selbst, eine energiegetriebene Prozessoptimierung durchgeführt werden. Hierzu wurden sowohl die KSS-Anlage als auch die Schleifmaschine selbst gemessen. Abbildung 21 zeigt den beispielhaften Aufbau einer Leistungsmessung über die Zeit für die genannte Schleifmaschine. Dabei sind die Start- sowie Endpunkte des Prozesses aus der Leistung der Anlage klar interpretierbar.

Ebenfalls können signifikante Punkte innerhalb des Bearbeitungsprozesses herausgestellt werden. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Maschine eine Peak-Leistung von ca. 3 kW aufweist, während im Laufe des Bearbeitungsprozesses ungefähr 2 kW anliegen. Bildet man in diesem Diagramm nun die Flächen unter den Kurven aus, so ist die gemessene Leistung pro Zeiteinheit erkennbar, sodass der Energiebedarf der Anlage errechenbar wird.

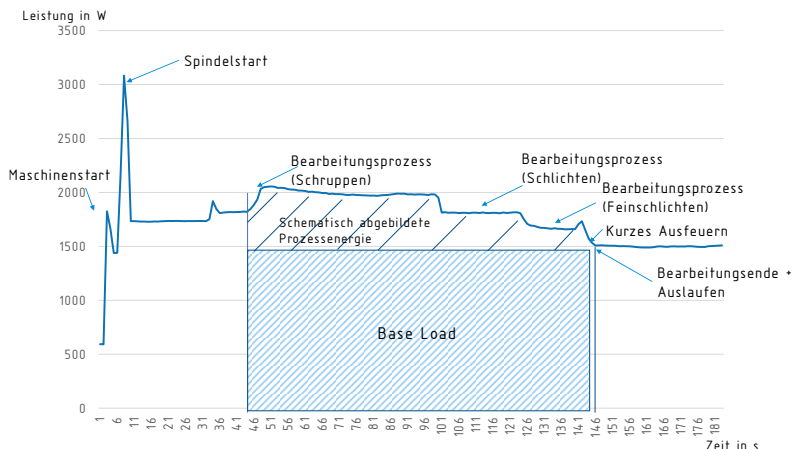


Abbildung 21: Beispiel für die Aufzeichnung der Leistung am Referenzsystem

Mittels komplexerer Aufbereitung und Darstellungsformen ist es möglich, diese Leistungsaufnahmen in einen sog. „Energy Breakdown“ zu überführen, in dem die verschiedenen Energiebereiche der Anlage herausgestellt werden können. In Abbildung 21 ist ein Ansatz eines solchen Energy Breakdowns dargestellt, um die Grundlast des Systems mit der Prozessenergie zu vergleichen. Bereits an dieser Stelle ist ohne die Durchführung komplexerer Modellierungen oder Berechnungen erkennbar, dass die Grundlast der Maschine deutlich höher ist als die Prozessleistung.

Wird unter Einbezug dieser Betrachtung die Gesamtleistung der Anlage (Schleifmaschine und KSS-Anlage) gegenübergestellt, kann aus den einzelnen Prozessabschnitten ein Vergleich erstellt werden, der in Abbildung 22 visualisiert ist. Der Energiebedarf für die Maschine (blau) gegenüber dem der KSS-Anlage (orange) ergibt in Summe einen deutlich höheren Verbrauch als bei der Betrachtung der Einzelleistung des Bearbeitungsprozesses. Dieser höhere Energiebedarf entsteht allerdings vornehmlich aus der Leistungsaufnahme der KSS-Anlage innerhalb des Prozesses.

Explizit berechnet, besteht der Gesamtbedarf aus einem 78-prozentigen Anteil der KSS-Anlage und nur zu 22 % aus dem Bedarf der Schleifmaschine. Dieser Vergleich im Umfeld der Referenzanlage lässt den Schluss zu, dass

besonders der KSS-Verbrauch im Bearbeitungsprozess ein hohes Einsparpotenzial in Bezug auf die eingebrachte Leistung birgt (vgl. Kapitel 5.1.1.2). In der nächsten Gliederungsstufe ist diese Feststellung vor allem auf die Schruppbearbeitung zu beziehen, diese ist für ca. 87 % des Energiebedarfs (bezogen auf die 78 % Gesamtanteil) verantwortlich.

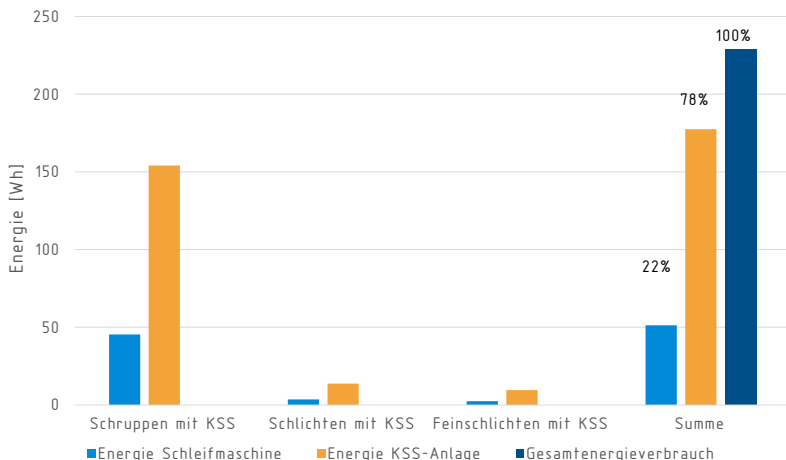


Abbildung 22: Vergleich des Energiebedarfs am Referenzsystem

Resultierend aus dieser energetischen Betrachtung werden für das Referenz- und das Retrofit-Szenario nachfolgende Betrachtungen mit einbezogen, die respektiv für die ökologische und ökonomische Bewertung verwendet werden.

- **Referenz-Szenario:** Konventioneller Schleifprozess nach den Richtlinien des Maschinenherstellers mit standardisierten Schnittparametern (Spanvolumen $1,4 \text{ cm}^3$, Schnittgeschwindigkeit 35 m/s).
- **Retrofit-Szenario:** Beispielhafte Verbesserung des Gesamtbearbeitungsprozesses. Aufnahme von Prozess- und Umgebungsdaten durch die Einbringung sensorischer und informationstechnischer Elemente. Die Analyse dieser Daten lässt die Durchführung geeigneter Maßnahmen für die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele zu. Die Maschine wird von ihrem Grundzustand (Auslieferungszustand im Jahr 2007) in ein

vergleichbares Industrie-4.0-Szenario überführt. Die Schruppbearbeitung wird auf Basis der Erkenntnisse teilweise mit und ohne KSS-Zufuhr durchgeführt, um die Leistung der Gesamtanlage zu entlasten. Die Schnittparameter werden ggü. dem konventionellen Prozess nicht verändert. Im Vergleich zum Gesamtprozess wird ein Drittel der Schruppbearbeitung ohne KSS durchgeführt.

Der Energiebedarf des Retrofit-Szenarios ist in Abbildung 23 dargestellt. Er-sichtlich wird hier, dass die Trockenbearbeitung eine erhebliche Verminderung des Bedarfs erreicht, sodass die Leistungsaufnahme der KSS-Anlage an die Leistung der Maschine angenähert wird.

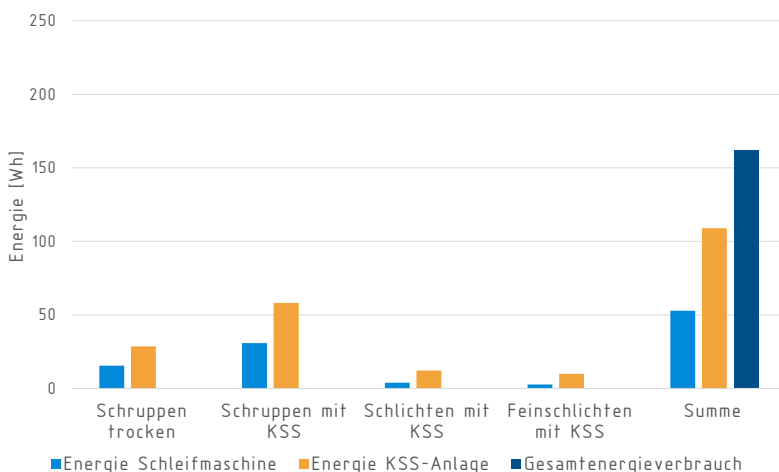


Abbildung 23: Retrofit-Szenario Energiebedarf pro Prozessschritt

Der Gesamtvergleich der beiden Szenarien zeigt die Einsparung ebenfalls sehr deutlich auf. In Abbildung 24 ist diese Gegenüberstellung abgebildet. Es ist erkennbar, dass die Einsparungen des Retrofit-Szenarios ggü. dem Referenz-Szenario circa 29,3 % betragen, was umgerechnet 67 Wh an Energiebedarf entspricht.

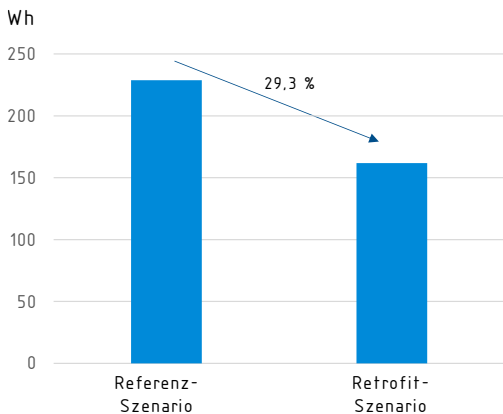


Abbildung 24: Verbesserung des Energiebedarfes durch Retrofit

Schwingungs- und Vibrationsretrofit

Das Ziel des Schwingungs- und Vibrationsretrofit ist in diesem Anwendungsfall die Qualitätsüberwachung des Bauteils und Prozesses. Dabei kann beispielsweise ebenfalls der Maschinenzustand bzgl. des Werkzeuges aufgenommen werden. Diese Art des Retrofits kann in jedem Fall auch als allein-stehende Lösung angewendet werden und bedarf nicht zwangsläufig der Einbringung des Energie-Retrofits. In diesem Anwendungsfall werden die Retrofit-Maßnahmen aufbauend betrachtet.

Die aufgenommenen Schwingungen und Vibrationen bilden die Qualität am Werkstück aufgrund des Prozessaufbaus (s. Kapitel 5.1.1.5) ab. Ein Beispiel für diese Betrachtung findet sich in Abbildung 25.

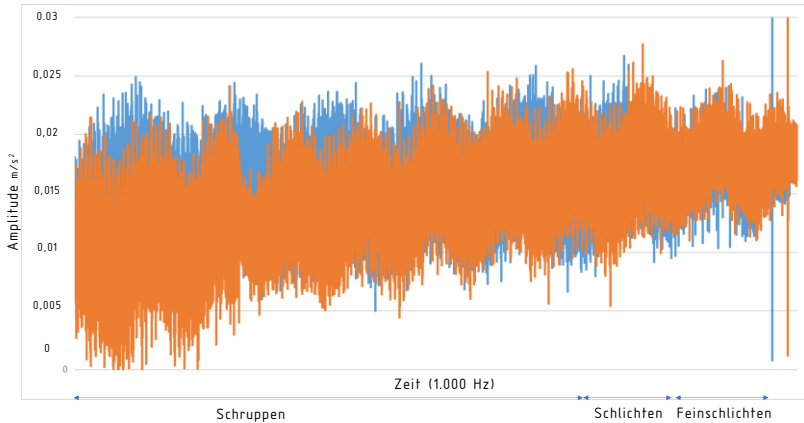


Abbildung 25: Schwingungen im Referenz-Szenario (blau) und Retrofit-Szenario (orange)

Ersichtlich sind hier die einzelnen Prozessschritte sowie die Ausschläge während der Bearbeitung. Insbesondere in weiterführenden Anwendungsfällen können durch den Schwingungs- und Vibrationsretrofit erweiterte Aussagen zur Qualität und Beschaffenheit der Werkstücke getroffen werden. Mittels langfristig angelegter Messkampagnen sind die Werte für Maschinenschwingungen, Werkstückaufnahmen oder Werkzeugvibrationen beispielsweise durch Machine-Learning-Ansätze auswertbar und können durch die Menge an Daten detaillierte Aussagen für einen vorausschauenden Betrieb der Anlage begünstigen. Im vorliegenden Anwendungsfall sind die absoluten Werte der Schwingungs- und Vibrationsanalyse insofern hilfreicher, als es sich um einen Einzelvergleich zwischen zwei Szenarien handelt (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Vergleichswerte für den Schwingungs- und Vibrationsretrofit

Prozessschritt	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario	Prozentuale Abweichung der Amplitude
Schruppen Trocken		0,0259	
Schruppen mit KSS	0,0224	0,0232	3,57 %
Schlichten	0,0142	0,0152	6,81 %
Feinschlichten	0,0129	0,0123	-4,24 %

Die Abweichung zwischen den beiden Prozessen beträgt im Höchstfall ca. 6,8 % und befindet sich innerhalb der Qualitätsgrenzen der Schleifbearbeitung für diesen Anwendungsfall. Diese Werte und Qualitätsgrenzen können je nach Anwendungsfall unterschiedlich sein und fallen sehr spezifisch aus. Ebenfalls erkennbar ist die gleichmäßige Steigerung der Rauheiten, wodurch eine direkte Korrelation mit der Amplitude herstellbar ist. Nichtsdestotrotz bewegen sich die Abweichungen der Oberflächengüten in einem ähnlichen prozentualen Rahmen (Tabelle 11). Bei Betrachtung der absoluten Werte für die R_a - bzw. R_z -Werte (Mittenrauwert bzw. Rautiefe) der Oberfläche zeigt sich die anhaltend sehr gute Qualität des Bauteils mit und ohne Retrofit-Maßnahme. Die Rauheiten bewegen sich im Toleranzbereich und entsprechen somit dem industriellen Standard. Die Vibration kann demzufolge als Nachweis für die Qualität des Bauteils herangezogen werden.

Tabelle 11: Vergleich der Oberflächengüte

Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario	Abweichung in %
1,359 μm (R_z)	1,443 μm (R_z)	6,18 % (R_z)
0,176 μm (R_a)	0,181 μm (R_a)	2,84 % (R_a)

Der Schwingungs- und Vibrationsretrofit ist demnach auch als alleinstehender Retrofit ausführbar und für die frühzeitige Erkennung von Oberflächenfehlern oder Qualitätsabweichungen hilfreich. Nichtsdestotrotz wird die Gegenüberstellung zwischen dem Grenzvergleich der Energie und Qualität als deutlich zielführender angesehen, um eine Multi-Paradigmen-Verbesserung realisieren zu können.

Condition-Monitoring-Retrofit

Der angestrebte Condition-Monitoring-Retrofit trägt in diesem Fall (s. Schwingungsmessung) nur zu einer Bestätigung der Inhalte bei. Das resultiert vor allem aus der zeitlichen Dauer des betrachteten Szenarios und des angedachten Umfangs dieser Studie. Trotz alledem ist es möglich, durch die Einbringung des Condition-Monitorings in den Schleifprozess langfristig – bei einer Betrachtung über mehrere Jahre hinweg – noch deutlichere Einsparpotenziale aufgrund einer ausgereiften Datenanalyse zu erreichen bzw. zu entdecken. Da es sich bei einem Zustandsmonitoring immer um eine

langfristige Operation handelt, können in diesem Fall nur Optionen und erwartbare Einsparungen bzw. Prozessverbesserungen genannt werden. Diese können sich im Fall des Schwingungsmonitorings beispielsweise auf den Lagerverschleiß beziehen, eine vorausschauende Instandhaltung möglich machen oder eine gleichbleibende Qualität über lange Prozesslaufzeiten hinweg sicherstellen. Hierfür dienen explizit auch die Umgebungsdaten wie die Temperatur oder die Luftfeuchtigkeit (beispielsweise XDK), um Umgebungswerte festzustellen und diese mit den Primärdaten, wie der Energie oder den Schwingungen, vergleichen zu können.

Die hier dargestellten Vergleiche und Gegenüberstellungen basieren zu einem großen Teil auf Erfahrungen mit dem Prozess und der hergestellten Transparenz durch das Retrofit-Szenario. Dennoch sind weitere Potenziale durch die tiefgehende Anwendung der Cyber-Ebene sowie eines Decision-Support-Konzeptes innerhalb des CPPS möglich. Eine Erweiterung der Datenanalyse mithilfe zusätzlicher Analysemethoden (beispielsweise statistische Analyse, deep analysis oder Analyse von Interdependenzen zwischen Variablen) ist dabei durchaus denk- und umsetzbar. Geeignete Methoden hierfür könnten sich auf weiterführende Trendanalysen, Fast-Fourier-Transformationen oder klassische Regressionen beziehen, die bereits durch geeignete Software mit den entstehenden Datensätzen umsetzbar sind. So kann auf Basis dieser Daten beispielsweise eine künstliche Intelligenz (KI) unter Berücksichtigung der Betriebszustände angelernt werden, wodurch die KI perspektivisch in der Lage ist, Anomalien zu detektieren.

Durch weiteres Expertenwissen hinterlegt, kann die KI sogar eine Aussage über die Anlagenbeschaffenheit oder Fehler tätigen, indem sie die unterschiedlichen Messdaten und Standorte korreliert. Das beschriebene CPPS und der vorliegende Anwendungsfall zum Szenarienablauf zeigen den Anfang einer solchen Analysereihe und damit auch nur einen Bruchteil der Möglichkeiten für Verbesserungen am entsprechenden Referenzsystem auf. Beginnend mit der entstehenden Transparenz, die in diesem Bericht ausführlich dargestellt wurde, können auf Basis der drei Retrofit-Maßnahmen im Szenario und unter der Voraussetzung von etwaigen weiteren Versuchs- und Produktionsdurchläufen zur Datengenerierung langfristige Verbesserungen am System erreicht werden.

Denkbar sind hier z. B. eine prädiktive Instandhaltung von Werkzeugen oder der KSS-Anlage des Systems, die bedarfsorientierte Zuführung von Kühlschmierstoffen und Abluftfiltration an Werkzeugmaschinen oder ein In-Process-Management der Bauteilqualität mithilfe der Vibrations- und Schwingungsaufnahme. Diese zusätzlichen Modellierungen und Datenanalysen können durch ein geeignetes Decision-Support-System, das auch die Steuerung der relevanten physischen Anlagen mit einbezieht, direkt in den Maschinenbetrieb eingebunden werden.

In diesem Zusammenhang könnte eine KSS-Regelanlage für die Maschinenzufuhr eine Eingriffsstufe darstellen, durch die Material- und Energiebedarf langfristig verbessert werden können. Die Eingriffstiefe beschreibt hierbei auch den Automatisierungsgrad der daraus resultierenden Anlage, wobei hier je nach Aufwand ebenso die Möglichkeit besteht, die Handlungsoptionen in einem Decision-Support-System maschinennah darzulegen und einen manuellen Eingriff in die Versorgung oder das Maschinenprogramm für darauffolgende Produktionsdurchgänge durchzuführen. Das hier beschriebene Szenario kann somit nur den Beginn einer Retrofit-Maßnahme darstellen und muss als zu erweiterndes System verstanden werden, um das volle Potenzial der Einrichtung nutzbar zu machen.

5.1.4 Inventarisierung der erforderlichen Daten

Im Folgenden werden die für die ökologische und ökonomische Bewertung inventarisierten Daten erläutert und in Tabelle 12 für die beiden Szenarien zusammenfassend dargestellt.

Betriebsalter der Maschine: In allen drei Szenarien wird eine Außenrundschleifmaschine betrachtet, die bereits 15 Jahre im Betrieb war.

Lebensdauer der Maschine: In allen Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Schleifmaschine weitere 15 Jahre benutzt werden kann und somit eine übliche Lebensdauer von insgesamt 30 Jahren erreicht. Jedoch wird oft die Hypothese aufgestellt, dass Retrofit-Maßnahmen durch die Überwachung von Zustandsparametern zu einer Lebensdauerverlängerung der Schleifmaschine führen und dadurch ökologische Vorteile mit sich bringen können. Das Ausmaß der Lebensdauerverlängerung wird von dem Zusammenspiel

Tabelle 12: Inventarisierung der Daten innerhalb der Szenarien

	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario
	Schleifprozess ohne Parameteranpassung und Retrofit-Maßnahme (konventionell)	Schleifprozess mit Schwingungs- und Energie-Retrofit
Schleifmaschine (aktuell)	15 Jahre alt + Annahme: weitere 15 Jahre (realistisch)	
Beschreibung des Prozesses	Rautiefe (Rz): 1,359 µm; Mittenrauwert (Ra): 0,176 µm	Rautiefe (Rz): 1,443 µm; Mittenrauwert (Ra): 0,181 µm
Kühlschmierstoff (KSS) Input [kg, Transport km]	1.720 kg Transport: Hagen > Braunschweig (285 km)	
Gesamtverluste KSS [kg]	582,42	414,20
Filtervlies [kg]	1,87	1,33
Energieverbrauch: Maschine + Filter [kWh]	13.401,3	9.474,9
Energiemessungsgeräte [Stk.]	keine	2 (gesamte Lebensdauer; ggf. 1 Tausch)
Beschleunigungssensor [Stk.]	keine	1 Klemme + Schaltkasten (Lebensdauer: 15 Jahre) + 3 Sensoren (Lebensdauer: 2 Jahre)
Sensorknoten [Stk.]	keine	2 (Lebensdauer: 2 Jahre)
Computer, Monitor, Tastatur, Maus [Stk.]	keine	1 (Lebensdauer: 5,8 Jahre)
Server, Monitor, Tastatur, Maus [Stk.]	keine	1 (Lebensdauer: 6 Jahre)

mehrerer Faktoren determiniert (beispielsweise Maschinentyp, Durchlaufmenge, Wartungsfrequenz, Kosten der Neuanschaffung im Vergleich zu den Kosten der Ersatzteile usw.), sodass sich in der Fachliteratur keine konkreten Angaben finden, wie viel länger eine mit Retrofit-Maßnahmen ausgestattete Schleifmaschine betrieben werden kann. Um die Lebensdauerverlängerung bei der ökologischen Bewertung dennoch zu berücksichtigen, könnten prinzipiell Sensitivitätsszenarien definiert werden, denen auch eine erweiterte Lebensdauer zugrunde liegt. Dies konnte allerdings im Rahmen dieser Untersuchung nicht erfolgen, da die Wartung und Instandhaltung der Anlage aufgrund fehlender Informationen nicht berücksichtigt werden konnte.

CPPS-Komponenten: Je nach Szenario werden unterschiedliche CPPS-Komponenten benötigt. Manche dieser Komponenten haben eine kürzere Lebensdauer als die Schleifmaschine, sodass sie während der verbleibenden Lebensdauer (mehrfach) ersetzt werden müssen.

Kühlschmierstoff, Strom, Filtervlies: Die Eigenschaften des KSS und der Späne finden sich in Tabelle 13 und sind für die Berechnung der Werte in Tabelle 14 notwendig. Die für den Schleifprozess benötigten Mengen an Kühlschmierstoff, elektrischer Energie und Filtervlies wurden im Rahmen von Versuchen ermittelt (s. Tabelle 14).

Tabelle 13: Eigenschaften des Kühlschmierstoffes und der Späne

Physikalische Größe	Maßeinheit	Wert
Dichte des Kühlschmierstoffes	kg/l	0,86
Volumen des Kühlschmierstoffes	l	2000
Masse des Kühlschmierstoffes	kg	1720
Werkstoffdichte (100Cr6)	g/cm ³	7,83
Spanvolumen	cm ³	1,4
Spanmasse	g	10,962

Die Berechnungen der Kühlschmierstoffmenge in der Abluft und an den Spänen sind Annahmen, die auf Angaben aus der Literatur basieren^{82 83}. Die Restfeuchte an Öl wird mit 1 % des Spanvolumens angenommen⁸⁴. Die durch die Abluftanlage verlorene Öl-Masse wird, basierend auf Literaturwerten⁸⁵, mit 0,1 g/s abgeschätzt. Die genauen Input-Werte werden entsprechend dem Produktionsszenario (s. Tabelle 8) im Rahmen von Arbeitspaket 3 berechnet.

Wasserverbrauch: Wasser wird in keinem der drei Szenarien als Prozess-Input in der Nutzungsphase (d. h. beim Schleifprozess) benötigt. Allerdings wird Wasser in den für das Modell verwendeten Datenbeständen berücksichtigt und ist daher nicht von der Studie ausgeschlossen.

Direkte Emissionen (Wasser, Boden, Luft): Direkte Emissionen in die Umweltkompartimente Wasser, Boden und Luft konnten nicht identifiziert werden.

⁸² Vgl. Madanchi, N.; Winter, M. und Herrmann, C. (2015).

⁸³ Vgl. Herrmann, C.; Madanchi, N.; Winter, M.; Öhlschläger, G.; Greßmann, A.; Zettl, E.; Schwengers, K. und Lange, U. (2017).

⁸⁴ Vgl. Herrmann, C.; Madanchi, N.; Winter, M.; Öhlschläger, G.; Greßmann, A.; Zettl, E.; Schwengers, K. und Lange, U. (2017).

⁸⁵ Vgl. Madanchi, N.; Winter, M. und Herrmann, C. (2015).

Tabelle 14: Experimentelle Werte für ökobilanziell relevante Parameter des Schleifprozesses

Parameter	Maßeinheit	Szenario 1: Schleifprozess ohne Retrofit	Szenario 2: Schleifprozess mit Retrofit
Laufzeit ohne KSS	s	-	28,40096618
Laufzeit mit KSS	s	98,32943571	69,92846953
Stromverbrauch Maschine	Wh	51,32181923	52,81936719
Stromverbrauch Filter	Wh	177,453607	108,9270891
KSS in der Abluft	g	9,832943571	6,992846953
KSS an den Spänen	g	0,10962	0,077957926
Filtervlies	g	x	$x \cdot (69,92487/98,32944)$
Gesamtstromverbrauch	Wh	228,7754262	161,7464563
KSS Einsatz	g	1720000	1720000
KSS Output	g	1719990,057	1719992,929

5.2 Ökologische Bewertung: Quantifizierung der Sachbilanz

Für die Sachbilanz-Definition der ökologischen Bewertung wurden Inventarinformationen und Daten mithilfe der kommerziellen Datenbanken ecoinvent V3.7.1⁸⁶ sowie der kostenlosen Datenbank „PROBAS“⁸⁷ zusammengestellt. Für die Annahmen zum Energiebedarf der CPPS-Komponenten wurde einschlägige Literatur herangezogen (diese Quellen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben). Gemäß VDI-Richtlinien VDI 4600 und VDI 4800 Blatt 2 werden Gutschriften für potenziell vermiedene Emissionen durch das Recycling von Materialien sowie Gutschriften aufgrund von Energierückgewinnung nach der Verbrennung nicht berücksichtigt.

Die gesamte Lebenszyklusanalyse ist in drei Phasen unterteilt:

- **Herstellung:** KSS, Filtervlies, CPPS-Komponenten,
- **Nutzung:** Stromverbrauch für den Prozess des Schleifens,
- **Entsorgung:** Abfallbehandlung von Materialien, die für die Schleifprozess- und Retrofit-Maßnahmen verwendet werden.

⁸⁶ Vgl. Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E. und Weidema, B. (2016).

⁸⁷ Vgl. PROBAS Datenbank (25. Januar 2022).

5.2.1 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch der Außenschleifmaschine wurde für beide Szenarien in den Versuchen gemessen (IWF). Der Stromverbrauch der CPPS-Komponenten wird mit Bezug auf die jeweilige Nutzungsphase in nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

5.2.2 KSS

Das Schmieröl ist ein nicht wassermischbarer Kühlschmierstoff auf Mineralölbasis. Diese Arten von Schmierstoffen setzen sich im Allgemeinen aus den folgenden Bestandteilen⁸⁸ zusammen: 85 - 90 % Mineralöle (Basisöle), 5 - 8 % synthetische/natürliche Esteröle, 5 - 15 % Hochdruckzusätze (org. Schwefelverbindungen, org. Phosphorverbindungen, chlorierte Paraffine), < 4 % anionische Tenside, Antioxidantien, Ölnebelverhinderer.

Allerdings werden die spezifischen Formulierungen von KSS herstellungsseitig geheim gehalten. Die genauen Rezepturen von mineralölbasierten, nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffen, die beim Schleifprozess eingesetzt werden, unterliegen im Allgemeinen dem Betriebsgeheimnis. Hierzu gehören insbesondere Additivpakete, wie bereits in Abschnitt 5.1.1.4 erläutert. Für die Grundöl-Vorketten liegen verlässliche Daten vor, für die anderen Materialien jedoch nur in begrenztem Umfang⁸⁹.

Aufgrund der zu erwartenden ökobilanziellen Dimension mineralölbasierter Kühlschmierstoffe wurden relevante Ökobilanzstudien ausgewertet, um Annahmen zu den Komponenten und deren prozentualen Anteilen treffen zu können. Als Grundlage für die Annahmen dienen die in Tabelle 15 aufgeführten Ökobilanzstudien zu Kühlschmierstoffen. Dieses Literaturscreening kann zwar für einen ersten Überblick über Hintergrundinformationen hilfreich sein, genaue Informationen über die Zusammensetzung konnten in dieser Studie jedoch nur allgemein gehalten werden.

⁸⁸ Vgl. Alex, M. (2010).

⁸⁹ Vgl. Hansen, A et al. (2005).

Tabelle 15: Ökobilanz-Studien zu Kühlschmierstoffen (Abkürzungen*)

Autor-schaft	Grund-ole	Anwendungen	Unter-suchte Lebens-phase	Unter-suchungs-gebiet	Wirkungs-kategorie
Dettmer (2006) ⁹⁰	Mineralöl, Rapsöl, Palmenöl, Tierfett, Altspeise-fett	Nwmb KSS EP-Additive: ge-schwefelte Fettöle, geschwefelte Koh-lenwasserstoffe AW Additive: Phosphor-, Phos-phor-Schwefel-Ver-bindung	Rohstoffvor-kette, Her-stellungs-, Nutzungs-phase, End-of-Life	1.000 bearbei-tete Werkstü-cke (174 kg geschliffenen Kugelnaben)	GWP, AP, ODP, KEA, POCP, PM, ADP
William-Olsson (2020) ⁹¹	Mineralöl (Petro-leum), Rapsöl, Olivenöl, Sonnen-blumenöl, Pen-taerythritol	phenolbasierte an-tioxidative Addi-tive	Rohölförde-rung, Raffi-nierung, Her-stellung, Ver-wendung, End-of-Life)	Produktion von 100 Kol-bentrommeln	GWP, Human- und Süßwasser-toxizität, EP
Herrmann et al. (2007a, b) ^{92,93}	Mineralöl, Pflanzen-öle	Nwmb KSS Variocut G500, chlorrfreies Palmitic acid ethylhexyl ester	LCA, keine Spezifizie-rung	Bearbeitung von Metallen	GWP, AP, ODP, PM, POCP, ADP, CED
Oemeta (2016) ⁹⁴	Mineralöl	Nwmb KSS	Gewinnung, Produktion, Verwendung und Entsorgung Cradle to Grave	Prozesskette zur Kurbelwellenproduktion (Fräsen, Drehen, Tiefbohren, Schleifen)	GWP, AP, EP, ADP
TUBS/ IWF (2011)	Mineralöl	Wmb KSS keine Additivspezifizierung	Rohstoffge-winnung, Herstellung, Nutzung, Entsorgung	Anzahl zu bear-beitender Werkstücke in einem be-stimmten Be-arbeitungsver-fahren	ADP, GWP, AP, EP
González-Reyes et al. (2020) ⁹⁵	Mineralöl, Syntheti-sches Öl, Bioabbaubares Öl (Esther)	keine nähere Er-läuterung	Gewinnung, Produktion, Transport, Verwendung, Recycling	Wasser- und Windenergie	Energie (kWh/l), Emis-sionen (kg CO ₂ /l)

* Nwmb KSS: Nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe; Wmb KSS. Wassermischbare Kühlschmierstoffe; ADP: Abiotic Depletion Potential; AP: Acidification Potential; CED: Cumulative Energy Demand; EP: Eutrophication Potential; GWP: Global Warming Potential; KEA: Kumulierter Energieaufwand; ODP: Ozone Depletion Potential; PM: Particulate Matter; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential

Da es sehr schwierig ist, Informationen über die reduzierte Menge an Zusatzstoffen (Additiven) zu erhalten, wird zur Modellierung eines repräsentativen KSS ein generisches Produkt auf Mineralölbasis mithilfe der ecoinvent-

Datenbank betrachtet. Die Behandlung und Entsorgung von KSS durch Verbrennung werden berücksichtigt. Die in diesem Zusammenhang berücksichtigte Literatur bezieht sich auf das Jahr 2011⁹⁶ (unterer Heizwert 34,7 MJ/kg KSS).

5.2.3 Filtervlies

Für die Filtration des Kühlschmierstoffes wird in beiden Szenarien Filtervlies verwendet. Die benötigte Menge wurde in den Versuchen für ein Referenzwerkstück ermittelt und im Produktionsszenario für die funktionelle Einheit berechnet. Im Vergleich zum Referenz-Szenario wurden im Retrofit-Szenario ca. 29 % weniger Filtervlies benötigt (entspricht etwa 0,5 kg Einsparung pro Jahr). Dieser Modellierung liegt ein Filtervlies aus Polyester (Spinnvlies) mit einem Flächengewicht von 25 g/m² zugrunde.

5.2.4 Sensoren

Im Retrofit-Szenario wurden die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von vier verschiedenen Sensorgeräten ökobilanziell betrachtet, für die jeweils gängige Beispielprodukte identifiziert wurden.

Für die Modellierung der Herstellungsphase wurden das Gewicht und die Materialzusammensetzung der Sensorgeräte (vgl. Tabelle 16) mithilfe von technischen Produktdatenblättern und Produktwebseiten eingeschätzt. Aufgrund der Unvollständigkeit der verfügbaren Daten werden weitere Annahmen getroffen. Der Leistungsanalysator wurde beispielsweise als kleinerer Laptop angenommen und sein Gewicht im Modell angepasst. Außer der in Tabelle 16 gelisteten Inputs wurden im Rahmen der vorliegenden orientierenden Ökobilanzstudie keine weiteren Verbräuche oder Produktionsschritte (z. B. Verarbeitung von Rohstoffen o. Ä.) berücksichtigt.

⁹⁰ Vgl. Dettmer, T. (2006).

⁹¹ Vgl. William-Olsson (2020).

⁹² Vgl. Herrmann, C.; Hesselbach, J.; Bock, R.; Zein, A.; Öhlschläger, G. und Dettmer, T. (2007a).

⁹³ Vgl. Herrmann, C.; Hesselbach, J.; Bock, R. und Dettmer, T. (2007b).

⁹⁴ Vgl. Oemeta (2016).

⁹⁵ Vgl. González-Reyes, G. A.; Bayo-Besteiro, S.; Vich Lobet, J. und Añel, J. A. (2020).

⁹⁶ Vgl. Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E. und Weidema, B. (2016).

Für die Nutzungsphase der Sensorgeräte wurde der Stromverbrauch als einziger ökobilanziell relevanter Parameter identifiziert. Für diese vier CPPS-Komponenten wurde, basierend auf Experteneinschätzung, insgesamt ein Stromverbrauch von 120 kWh pro Jahr (bezogen auf 1.600 Betriebsstunden im Produktionsszenario) angenommen. Somit macht der jährliche Gesamtstromverbrauch der Sensoren etwa 56 % des Stromverbrauchs des Computers und 11 % des Stromverbrauchs des Servers aus und fällt dadurch im Vergleich zu den anderen beiden CPPS-Komponenten weniger ins Gewicht.

Tabelle 16: Annahmen für die Materialzusammensetzung der Sensorgeräte

	Produktgewicht (kg)	Material/Unterkomponente	Gewichtsanteil	Quelle
Leistungsanalysator	1,9 kg	Laptop	100 %	https://docs.rs-online.com/e33b/A70000007015170.pdf
Sensorklemme	0,35 kg	Metallgehäuse aus Zink	75 %	https://www.beckhoff.com/de-de/produkte/i-o/ethercat-klemmen/elmxxxx-messtechnik/elm3602-0002.html
		Leiterplatte mit LED	25 %	
Industrie-Beschleunigungsaufnehmer	0,07 kg	Edelstahlgehäuse	71 %	https://www.mmf.de/industrieraufnehmer.htm#ks74-80
		Steckverbinder aus Polyamid	29 %	
Sensorknoten	0,054 kg	Polycarbonatgehäuse	40 %	https://www.bosch-connectivity.com/media/downloads/xdk_node_110_combined_datasheet.pdf
		Leiterplatte mit LED	40 %	
		Wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterie	20 %	

Die Entsorgung der Sensorkomponenten wurde im Einklang mit der WEEE-Richtlinie der Europäischen Union (2012/19/EU), die eine Zuführung von elektronischen Altgeräten zu bestehenden Recyclingströmen vorschreibt, durch einen entsprechenden Recyclingprozess im Modell abgebildet. Dieser repräsentiert einen globalen Durchschnitt für das Recycling von Elektroaltgeräten.

5.2.5 Computer/Server

Für die Modellierung der erforderlichen Computer und Server wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. In der Literatur wurde eine Zusammensetzung gefunden, die auf Annahmen in der ecoinvent-Datenbank beruht. Ein Computer (Desktop Computer) oder Server wird als Produkt modelliert, das unter anderem aus Grafikkarte, Netzwerkkarte, Festplatte, Leiterplatten, RAM, Batterie und anderen Materialien (z. B. Metalle, Kunststoffe, Verpackung) besteht. Alle diese Materialien wurden berücksichtigt, ebenso wie Maus, Tastatur und LCD-Monitor.

Die Nutzungsphase von Computern und Servern wurde anhand von Literaturdaten aus durchschnittlichen Verbrauchsdaten in Europa modelliert. Insbesondere der Energiebedarf für Computer (215 kWh/a) und Server (1.117 kWh/a) wurde unter Berücksichtigung einer VDI ZRE-Studie⁹⁷ modelliert. Die Lebensdauer von Computern (5,8 Jahre) und Servern (6 Jahre) wurde anhand von Durchschnittsdaten aus verschiedenen Quellen^{98 99} definiert.

Für die Abfallbewirtschaftung von Computern, Servern und Peripheriegeräten wird unter Berücksichtigung der vormechanischen Behandlung und der Reststoffbehandlung von thermischer Verwertung ausgegangen¹⁰⁰.

5.3 Ökonomische Bewertung: Auswahl und Quantifizierung der Kostenpositionen

5.3.1 Auswahl der Kostenpositionen

Die ökonomische Analyse soll insbesondere für KMU eine Entscheidungsgrundlage schaffen, da hier, vor allem bei Handwerksbetrieben und Werkstätten, die häufig noch Maschinen älterer Baujahre einsetzen, tendenziell mehr Bedarf für Retrofit-Maßnahmen besteht als in größeren Unternehmen. Der Fokus der ökonomischen Bewertung liegt daher vorrangig auf den Kosten der KSS-Anwendenden, also kleinen oder mittleren Unternehmen des

⁹⁷ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017a).

⁹⁸ Vgl. Yao, M. A.; Higgs, T. G.; Cullen, M. J.; Stewart, S. und Brady, T. A. (2010).

⁹⁹ Vgl. European Commission, D. E. (2012).

¹⁰⁰ Vgl. Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E. und Weidema, B. (2016).

metallverarbeitenden Gewerbes. In diesem Fall sind die Kosten allerdings grundsätzlich über den gesamten Lebenszyklus der beiden Szenarien relevant, da sich im Retrofit-Szenario durch die zusätzlichen Maßnahmen Komponenten aus allen Kostenkategorien in unterschiedlicher Richtung und Höhe von denen des Referenz-Szenarios unterscheiden.

Aus diesem Grund werden folgende Kostenpositionen für die ökonomische Bewertung innerhalb der Nutzungsphase bilanziert:

- Herstellungskosten des Kühlschmierstoffs (Einsatz beim turnusmäßigen Austausch sowie Ersatzbedarf durch Verluste) sowie des Filtervlieses,
- Transportkosten für Kühlschmierstoff und Filtervlies zwischen Herstellung und Nutzung,
- Nutzungskosten in Form von Verbrauch elektrischer Energie durch Maschine und Filter in beiden Szenarien sowie zusätzlich für Computer und Sensorgeräte im Retrofit-Szenario,
- Entsorgung von KSS und Filtervlies in beiden Szenarien sowie zusätzlich für Computer und Sensorgeräte im Retrofit-Szenario.

Die Transportaktivitäten zwischen Herstellung und Nutzung spielen als Kostenfaktor lediglich eine untergeordnete Rolle. Sie sind daher im Folgenden nicht als separate Kategorie dargestellt, sondern werden den Herstellungskosten zugerechnet.

Weitere anwendungsseitige Kosten, die bei der zugrunde gelegten funktionellen Einheit keine Unterschiede zwischen den beiden Szenarien erwarten lassen, werden dagegen nicht in Betracht gezogen. Da durch Berucut SCO 310 die Verwendung eines nichtwassermischbaren KSS zugrunde gelegt wurde, spielt der Wasserverbrauch beim Betrieb für die Kostenseite keine Rolle.

5.3.2 Quantifizierung ausgewählter Kostenpositionen

Die Kosten werden mit realitätsnahen Durchschnittswerten bilanziert. Für die Kostenschätzungen wurden entweder Daten aus ecoinvent oder vorrangig öffentlich zugängliche Daten, etwa Durchschnittswerte von Marktpreisen aus Internetportalen, sowie eigene Abschätzungen erhoben.

(1) Beschaffungskosten für den Kühlschmierstoff Berucut SCO 310

Der nicht wassermischbare Kühlschmierstoff Berucut SCO 310, hergestellt von der Fa. Bechem, wird in den Behältnissen eines Fasses mit 180 kg Inhalt zu 1,94 €/kg sowie einer Kanne zu 18 kg mit 2,13 €/kg angeboten¹⁰¹. Aufgrund der Höhe des jährlichen Einsatzes von 926,42 kg KSS bezogen auf die funktionelle Einheit, wird im Folgenden von einem Bezug in der größeren Mengeneinheit der 180-kg-Fässer ausgegangen.

(2) Beschaffungskosten für den Filtervlies

Die Nutzung bzw. der Verbrauch des Filtervlieses kann je nach Betriebsweise und Spanart bzw. -menge stark variieren und ist aus diesem Grund nicht festgelegt. Dabei spielen auch die geschliffenen Bauteile und die letztendliche KSS-Nutzung eine große Rolle.

Aufgrund der Erfahrung aus der eigenen Verwendung am IWF der TU Braunschweig wird auf eine Rolle Filtervlies der Fa. LANTOR aus 100 % Polyester mit der Qualität SB401 zurückgegriffen, das bei Abmessungen von 1.000 mm x 150 m ein Materialgewicht von 3,75 kg aufweist. Diese Rolle wird vom IWF zu einem Preis von 147,56 € bezogen. Im Referenz-Szenario kann mit dieser Rolle die Menge von zwei Jahren (117.158 Teile) abgedeckt werden. Somit ergibt sich für das Referenz-Szenario ein Preis von 73,78 € im Jahr oder 39,45 € je kg Filtervlies.

Im Retrofit-Szenario wird angenommen, dass durch das Schleifen ohne KSS in 28,8 % der Zeit auch ein äquivalenter Anteil an Vlies eingespart wird. Demnach werden anstelle von 1,87 kg nur 1,33 kg an Filtervlies verbraucht;

¹⁰¹ Daten des IWF der TU Braunschweig, von dem Berucut SCO 310 in 180-kg-Fässern bezogen wird

folglich würde die gleiche Rolle Filtervlies nicht für zwei Jahre, sondern für 2,81 Jahre der Produktion reichen.

(3) Beschaffungskosten für die zusätzlichen Geräte im Retrofit-Szenario

Für die Geräte, die zusätzlich im Retrofit-Szenario benötigt werden, werden die folgenden Preisannahmen zugrunde gelegt (Tabelle 17):

Tabelle 17: Preise für Geräte im Retrofit-Szenario

Gerät	Preis in €/Einheit	Quelle
Energiemessungsgerät	4.000	Geschätzter Wert, siehe z. B. Preisangabe auf der Plattform RS online ¹⁰²
Beschleunigungssensor - Sensorklemme	350	Information des Herstellers Beckhoff New Automation Technology ¹⁰³
Beschleunigungssensor (Industrie-Beschleunigungsaufnehmer)	210	Information des Herstellers MMF ¹⁰⁴ ; https://www.mmf.de/pdf/1-10.pdf
Sensorknoten	160	Mittelwert, siehe z. B. Information des Fachhändlers Conrad Electronic SE ¹⁰⁵
Computer (ohne Peripheriegeräte)	1.000	Durchschnitt aus Preisen im Internet
Server (ohne Peripheriegeräte)	600	Durchschnitt aus Preisen im Internet
Maus	10	Durchschnitt aus Preisen im Internet
Tastatur	12	Durchschnitt aus Preisen im Internet
LCD-Monitor	170	Durchschnitt aus Preisen im Internet

(4) Transportkosten für Kühlschmierstoff, Filtervlies und Geräte

Für alle Transportkosten zwischen dem Ort der Herstellung und dem der Nutzung werden Preise aus ecoinvent für die Kategorie „Transport lorry“ in Höhe von 0,156 € pro Tonnenkilometer angenommen.

(5) Kosten für den Energieverbrauch beim KSS-Einsatz (Maschine und Filter)

Für den Energieverbrauch werden Kosten in Höhe von 18,25 Cent pro Kilowattstunde Strom zugrunde gelegt. Hierbei wurden Anhaltspunkte für einen

¹⁰² Vgl. RS Online (25. Januar 2022).

¹⁰³ Vgl. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG (23. Januar 2022).

¹⁰⁴ Vgl. MMF (2021).

¹⁰⁵ Vgl. Conrad (25. Januar 2022).

im vorliegenden Fall relevanten Industriestrompreis überlegt. Dies ist nicht einfach, denn gemäß den Webseiten von Anbietern, wie z. B. e-on oder Uniper, erscheint der Strompreis für die Industriekundschaft weitgehend als individuelle Verhandlungssache und ist entscheidend vom Gesamtstromverbrauch abhängig; Stromunternehmen erfragen im Zuge von Preisfragen den bisherigen Stromtarif und -verbrauch. So gelten etwa 100.000 kWh sowie 1 Mio. kWh offensichtlich als Schwellenwerte für die Preisgestaltung.

Der Bezugspreis hängt also im Einzelfall entscheidend von der Unternehmensgröße und dem daraus resultierenden Gesamtstromverbrauch ab. Weiterhin gibt es sehr unterschiedliche Preismodelle, die sich für bestimmte Zielgruppen mehr oder weniger gut eignen.

Daher wird im Folgenden ein Durchschnittspreis für die Industrie (in der unter anderem auch KMU vertreten sind) von 18,25 ct/kWh angenommen; dieser Wert wird auch beim Statistik-Portal Statista als Industriestrompreis inklusive der Stromsteuer für das Jahr 2021 in Deutschland ausgewiesen. Konsistent mit dieser Angabe ist eine Quelle des BDEW, nach welcher der durchschnittliche Strompreis für Industriestrom zum Stand Juli 2020 17,75 ct/kWh inklusive Stromsteuer, Abgaben und Umlagen betrug.

Zu beachten ist an dieser Stelle, dass sehr kleine Handwerksbetriebe unter Umständen den höheren Tarif für private Haushalte von bis zu ca. 30 ct/kWh bezahlen. Somit kann der Einfluss eines derart erhöhten Preises auf das Gesamtergebnis hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit der Retrofit-Maßnahmen analysiert werden.

In der generellen Sensitivitätsanalyse werden keine Änderungen der Strompreise unterstellt, lediglich eine prozentuale Variation der Stromverbräuche für die Geräte des Retrofit-Szenarios, da über diese im Gegensatz zu den Stromverbräuchen der Schleifmaschine und des Filters noch keine verlässlichen Erfahrungswerte vorliegen. Es kann allerdings auf einfache Weise geprüft werden, wie sich eine Erhöhung oder Senkung des Strompreises auf die relative Vorteilhaftigkeit beider Szenarien auswirkt bzw. ob es einen kritischen Strompreis gibt, ab dem ein Break-Even-Punkt der Retrofit-Investitionen erreicht wird.

(6) Kosten für den zusätzlichen Energieverbrauch durch die Geräte für die Retrofit-Maßnahmen

Die gleichen Annahmen hinsichtlich des Strompreises gelten ebenso für den Stromverbrauch, den die zusätzlichen Geräte für die Retrofit-Maßnahmen benötigen. Auch hier werden ein Durchschnittspreis für die Industrie in Höhe von 18,25 ct/kWh als Standardwert sowie die entsprechenden alternativ verwendeten Sensitivitätswerte für KMU sowie für den EU-Strommix von 2030 angenommen. Eine separate Sensitivitätsanalyse betrifft die Höhe des Stromverbrauchs durch sämtliche zusätzliche Geräte im Retrofit-Szenario. Eine generelle Erhöhung dieser Komponente des Stromverbrauchs um 50 % und ihre Auswirkung auf das Gesamtergebnis sind im Ergebniskapitel dargestellt.

(7) Entsorgungskosten

Für die Kosten der Entsorgung werden entsprechende Durchschnittskosten für Entsorgungsprozesse aus ecoinvent zugeordnet. Diese sind als spezifische Kosten in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Preise für Entsorgung im Referenz-Szenario und im Retrofit-Szenario

Gerät	Preis in €/kg	Verwendete Kategorie der Entsorgung aus ecoinvent
Kühlschmierstoff	0,374 €	Treatment of waste mineral oil incineration
Filtervlies	0,0092 €	Fibre and plastic waste treatment, polyester
Energiemessungsgerät	0,272 €	Mechanical treatment transport WEEE
Beschleunigungssensor - Sensorklemme		
Beschleunigungssensor (Industrie-Beschleunigungsaufnehmer)		
Sensorknoten		
Computer (ohne Peripheriegeräte)		
Server (ohne Peripheriegeräte)		
Maus		
Tastatur		
LCD-Monitor		

Hierbei ist zu beachten, dass diese Kosten auch die Transportkosten für jeweils durchschnittliche Entfernungen zu der entsprechenden Anlage beinhalten. Diese werden in ecoinvent als Standardparameter genutzt, die von

der Verteilung bzw. den durchschnittlichen Entfernungen von den jeweiligen Entsorgungsbetrieben, z. B. Müllverbrennungsanlagen, abhängen. Für „fibre and plastic waste“ - der Kategorie, der das Filtervlies zugeordnet wird - ist diese Standardentfernung etwa mit 100 Kilometern angegeben. Somit werden Transportkosten zwischen Betrieb und Entsorgung nicht als zusätzliche Komponente berechnet, da sie bereits in den Preisen für die Entsorgung anteilig enthalten sind.

In der Studie des VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2017b)¹⁰⁶ wurde ein Wert von 72,50 €/m³ für die KSS-Entsorgung als an den Entsorger zu entrichtende Gate Fees (also nur der Annahmepreis für Abfälle von Entsorgern, ohne anteilige Transportkosten) angenommen. Hieraus lässt sich der Mittelwert eines Intervalls von 45 - 100 €/m³ aus einer Abschätzung von 2010 ableiten.¹⁰⁷ Dieser Wert bezieht sich jedoch auf das Volumen einer KSS-Emulsion, die zu 95 % aus Wasser besteht. Wenn vereinfachend also eine Dichte von 1 g/cm³ angenommen wird, entspricht das Kosten von 72,50 €/t oder 0,0725 €/kg - also nur etwa 20 % des Wertes aus ecoinvent. Allerdings ist diese Zahl mit dem Kostensatz aus ecoinvent nicht vergleichbar, und zwar nicht nur deshalb, weil die zugrunde liegende Abschätzung vor elf Jahren heute veraltet sein dürfte: Die bei ecoinvent ausgewiesenen höheren Kosten von 0,374 €/kg beziehen sich auf die Verbrennung von 100 % Mineralöl, also den hier zugrunde gelegten nicht wassermischbaren KSS. Diese Annahmen erscheinen im Ergebnis plausibel und auch konsistent mit den anderen Daten aus ecoinvent.

Für die ökonomische Analyse wird ebenfalls der Bezug zur funktionellen Einheit hergestellt, indem die vorgestellten spezifischen Kosten mit den Daten aus dem Mengengerüst (Stückzahlen bzw. Gewicht in kg) verknüpft werden.

¹⁰⁶ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017b).

¹⁰⁷ Vgl. Fischer, P., Itasse, S. (5. Mai 2010).

6 ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG

6.1 Ergebnisse der ökologischen Bewertung

Durch die Umsetzung von Retrofit-Maßnahmen wird der Aufwand an natürlichen Ressourcen (Energie, Rohstoffe, Wasser, Boden) über den gesamten Lebenszyklus der Werkzeugmaschine hinweg berücksichtigt. Diese Analyse wird anhand von Umweltindikatoren für die einzelnen Ressourcengruppen durchgeführt. Die Gesamtergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit)

Wirkungs-indikator	Referenz-einheit	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äquivalent	11.352,9	9.436,5
KEA (erschöpflich + regenerativ)	MJ	205.243,6	169.249,5
KRA (biotisch + Energierohstoffe + Metallrohstoffe + mineral. Rohstoffe, Steine und Erden)	kg	4.148,9	4.581,0
Wasserverbrauch	kg	60.992,2	51.265,7
Flächeninanspruchnahme, (Landwirtschaftsflächen + Siedlungsflächen)	m ² *a	402,9	344,1

6.1.1 Treibhausgaspotenzial

Die Treibhausgasemissionen wurden mit dem Indikator „EF 2.0 Climate change, total“ auf der Grundlage des Berichts von 2013¹⁰⁸ des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) berechnet. Die Emissionen werden in CO₂-äquivalenten Emissionen ausgedrückt. Die Ergebnisse der Treibhausgaspotenziale für Herstellung, Nutzung und Entsorgung finden sich in Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 20: Treibhausgaspotenzial, drei Phasen (kg CO₂-äquivalenten)

Wirkungs-indikator	Herstellung		Nutzung		Entsorgung	
	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit
Treibhauspotenzial (kg CO ₂ -äq.)	1.232,8	1.218,8	7.820,0	6.310,0	2.300,1	1.907,7

¹⁰⁸ Vgl. IPCC (2013).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus hinweg im Retrofit-Szenario um 17 % niedriger sind als im Referenz-Szenario. Dies entspricht einer Gesamtersparnis von ungefähr zwei Tonnen CO₂-Äquivalenten pro funktionelle Einheit. Der größte Anteil an Treibhausgasemissionen lässt sich in beiden Szenarien der Nutzungsphase zuschreiben. Während im Referenz-Szenario Emissionen in Höhe von etwa acht Tonnen CO₂-Äquivalenten in der Nutzungsphase entstehen, führen die Retrofit-Maßnahmen zu einer Reduktion der Emissionen auf etwa sechs Tonnen CO₂-Äquivalente. Das bedeutet, dass die größte Ersparnis in der Nutzungsphase zu verorten ist, die mit dem geringeren Stromverbrauch zusammenhängt. Die mit der Herstellungsphase assoziierten Emissionen sind in beiden Szenarien annähernd gleich. In der Entsorgungsphase kann lediglich eine minimale Reduktion im Retrofit-Szenario gegenüber dem Referenz-Szenario erzielt werden, die auf den geringeren Entsorgungsaufwand des Kühlschmierstoffes (da geringerer Verbrauch) zurückzuführen ist. Die Entsorgung und die Herstellung der CPPS-Komponenten machen im gesamten Lebenszyklus lediglich 3 % der lebenszyklusbezogenen Treibhausgasemissionen aus. Der Stromverbrauch gilt in beiden Szenarien, über alle Lebenszyklusphasen hinweg betrachtet, als wichtigster Treiber der CO₂-Emissionen und macht einen Anteil von 69 % (ohne Maßnahmen) bzw. 67 % (mit entsprechenden Maßnahmen) aus.

6.1.2 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Für die Analyse des kumulierten Energiebedarfs wird die Methodik der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand (KEA)“¹⁰⁹ verwendet. Sie zeigt die aggregierten Ergebnisse der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase. Die Angabe des KEA erfolgt i. d. R. nach Primärenergieträgern gruppiert als KEA, regenerativ und KEA, erschöpflich (siehe Tabelle 21).

¹⁰⁹ Vgl. VDI 4600 (2012:01).

Tabelle 21: Kumulierter Energieaufwand, drei Phasen (KEA) (MJ)

Wirkungsindikator	Herstellung		Nutzung		Entsorgung		Summe	
	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit
KEA, erschöpflich (MJ)	59.350	51.325	129.000	104.000	256	216	188.605,6	155.541,0
KEA, regenerativ (MJ)	1.225	1.298	15.400	12.400	13	11	16.637,9	13.708,5

In Bezug auf den kumulierten Energieaufwand zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Treibhausgaspotenzial: Der gesamte kumulierte Energieaufwand (erschöpflich und regenerativ) fällt im Retrofit-Szenario um etwa 18 % geringer aus als im Referenz-Szenario. Dies entspricht einer Ersparnis von etwa 36 GJ. Der Anteil der erneuerbaren und regenerativen Energiequellen liegt in beiden Szenarien bei jeweils 92 % und 8 %. Betrachtet man die Verteilung des kumulierten Energieaufwandes auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen, zeigt sich zudem, dass auch bei diesem Umweltindikator die Nutzungsphase eine Schlüsselrolle spielt. Mit etwa 70 % stellt sie die Lebenszyklusphase dar, in der am meisten Energie aufgewendet werden muss. Die restlichen 30 % entfallen auf die Herstellungsphase. Die CPPS-Komponenten verursachen mit 2 - 3 % einen marginalen Anteil am gesamten kumulativen Energieaufwand.

6.1.3 Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Zur Berechnung des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) wird die VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 verwendet. Die Ergebnisse dieser Studie werden in vier verschiedenen Arten des KRA zusammengefasst: Energierohstoffe, Metallrohstoffe, Mineralrohstoffe, Steine und Erde sowie biotischer Rohstoffaufwand. Die aggregierten Ergebnisse der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA), zwei Szenarien (MJ)

Wirkungsindikator	Referenzeinheit	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario
KRA, Energierohstoffe	kg	1.279,8	1.071,0
KRA, Metallrohstoffe	kg	511,8	1.249,6
KRA, Mineralrohstoffe, Steine und Erde	kg	2.355,7	2.258,7
KRA, Biotisch. Rohstoffaufwand	kg	1,6	1,7

Im Gegensatz zu den anderen betrachteten Umweltindikatoren zeigen die Ergebnisse für den kumulierten Rohstoffaufwand ein anderes Bild. Über den gesamten Lebenszyklus hinweg entsteht im Retrofit-Szenario ein um 10 % höherer Rohstoffaufwand, der etwa 430 kg Rohstoff pro Jahr entspricht. Während sich der Anteil der Mineralrohstoffe, Steine und Erde sowie der biotischen Rohstoffe im Vergleich zum Referenz-Szenario minimal veränderte (jeweils - 4 % und + 6 %), fallen die Unterschiede für die anderen Unterkategorien deutlicher aus. Der kumulierte Rohstoffaufwand für Energierohstoffe ist im Retrofit-Szenario etwa 16 % niedriger. Dies ist in erster Linie auf den geringeren Kühlschmierstoffverbrauch zurückzuführen. Eine noch auffälligere Veränderung ist jedoch für Metallrohstoffe zu beobachten: Deren Anteil fällt aufgrund der verwendeten CPPS-Komponenten mit diversen metallischen Komponenten um 59 % höher aus.

6.1.4 Wasserverbrauch

Die in GaBi implementierte Methode „ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater Consumption“¹¹⁰ wird für die Analyse des Wasserverbrauchs verwendet. Die Ergebnisse des Wasserverbrauchs für Herstellung, Nutzung und Entsorgung sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Wasserverbrauch, drei Phasen (kg)

Wirkungsindikator	Herstellung		Nutzung		Entsorgung	
	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit
Wasserverbrauch (kg)	11.755	11.548	48.500	39.100	737	618

6.1.5 Flächeninanspruchnahme

Für die Bestimmung der Flächennutzung wurden die entsprechenden Elementarflüsse in m² und Jahr pro funktionelle Einheit (m²*a/FE) der ökobilanziellen Modellierung nach VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 berechnet. Die Quantifizierung erfolgte mithilfe von ecoinvent-Datenbankeinträgen¹¹¹. Hier wurde die Kategorie „Landnutzung“ zur Quantifizierung herangezogen und die temporäre Nutzung gemäß der VDI-Richtlinie 4800 ausgeschlossen. Die

¹¹⁰ Vgl. Huijbregts, M. A. J.; Steinmann, Z. J. N.; Elshout, P. M. F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A. und van Zelm, R. (2017).

¹¹¹ Vgl. Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E. und Weidema, B. (2016).

aggregierten Ergebnisse für Herstellung, Nutzung und Entsorgung sind in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Flächeninanspruchnahme, drei Phasen (m²*a)

Wirkungs- indikator	Herstellung		Nutzung		Entsorgung	
	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit	Referenz	Retrofit
Flächeninanspruchnahme, Landwirtschaftsflächen (m ² *a)	57,2	60,2	286,0	230,0	0,6	0,5
Flächeninanspruchnahme, Siedlungsflächen (m ² *a)	17,4	19,8	41,1	33,2	0,6	0,5

Die Retrofit-Maßnahmen bringen auch bezüglich der Flächeninanspruchnahme Vorteile mit sich: Verglichen mit dem Referenz-Szenario werden im Retrofit-Szenario über den Lebenszyklus hinweg insgesamt etwa 14 % weniger Fläche benötigt. Diese Reduktion entspricht einer Einsparung von etwa 60 m² Fläche pro Jahr. Den wichtigsten Treiber für den Flächenverbrauch stellt in beiden Szenarien der Stromverbrauch bzw. die Bereitstellung des Stroms dar. Die Reduktion des Flächenverbrauchs im Retrofit-Szenario ist mit dem geringeren Strombedarf in der Nutzungsphase zu erklären. 7 % des gesamten Flächenverbrauchs können der Herstellung und Entsorgung der CPPS-Komponenten zugeschrieben werden.

6.1.6 Sensitivitätsanalyse: Worst Case eines erhöhten Stromverbrauchs von 50 % für CPPS-Komponenten im Retrofit-Szenario

Mithilfe der Sensitivitätsanalyse lässt sich die Variabilität bzw. Stabilität des ökologischen Vergleichs und der zugrundeliegenden Annahmen bewerten. Diese Analyse dient auch als Grundlage für das Verständnis potenzieller ökologischer Hotspots, die verbessert werden könnten. Die Sensitivitätsanalysen können unter Umständen den dargelegten ökologischen Vergleich und die Aussagen zur Rohstoffkritikalität beeinflussen. Die ökonomische Analyse ist hiervon nicht betroffen.

Da einer der wichtigsten Prozesse der Bedarf an elektrischer Energie ist, wird hierzu eine Sensitivitätsanalyse vorgeschlagen, um mögliche Auswirkungen auf alle betrachteten Indikatoren zu eruieren. Eine Sensitivitätsanalyse zur Simulation eines erhöhten Stromverbrauchs der CPPS-Komponenten (+ 50 %) ist hier dargestellt (siehe Tabelle 25, „Variante: Retrofit-Szenario“).

Tabelle 25: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Wirkungs-indikator	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario	Variante: Retrofit-Szenario	Relative Veränderung
Treibhauspotenzial	11.352,9	9.436,5	9.855,5	+ 4,4 %
KEA (erschöpflich + regenerativ)	205.243,6	169.249,5	176.978,5	+ 4,6 %
KRA (biotisch + Energierohstoffe + Metallrohstoffe + mineral. Rohstoffe, Steine und Erden)	4.148,9	4.581,0	4.680,4	+ 2,2 %
Wasserverbrauch	60.992,2	51.265,7	5.3862,0	+ 5,1 %
Flächeninanspruchnahme, (Landwirtschaftsflächen + Siedlungsflächen)	402,9	344,1	361,6	+ 5,1 %

Da die Angaben zum Energiebedarf aus der Literatur entnommen sind und nicht direkt gemessen wurden, werden sie als unsicher angesehen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen jedoch, dass sich auch bei einer Erhöhung des Energiebedarfs um 50 % der CPPS-Komponenten die aggregierten Gesamtergebnisse nicht ändern.

6.1.7 Rohstoffkritikalität

Für die Analyse des Versorgungsrisikos (siehe Tabelle 27) wurde die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2¹¹² verwendet. Die Richtlinie bezieht sich auf ein Bewertungssystem mit insgesamt 13 Indikatoren, die wiederum in drei Gruppen unterteilt sind. Tabelle 26 zeigt diese Indikatoren. Für jeden Indikator wird eine Bewertung pro Rohstoff angegeben. Die Bewertungsskala reicht von 0 bis 1 und es werden Stufen von 0,3, 0,5 und 0,7 aufgeführt.

¹¹² Vgl. VDI 4800 Blatt 2 (2018:03).

Tabelle 26: Indikatoren nach VDI 4800 Blatt 2

Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Geopolitische und regulatorische Indikatoren	Ökonomische Indikatoren
Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen
Grad der Koppelproduktion/Nebenproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Grad der Nachfragersteigerung
Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-(EoL-)Recyclingtechnologien	Politisches Länderrisiko	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen
Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Regulatorisches Länderrisiko	Annualisierte Preisvolatilität
Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugelände		

Die VDI-Richtlinie 4800 enthält eine Auswahl von Rohstoffen. Diese werden auf der Grundlage von Literatur, Schätzungen und Expertenmeinungen bewertet. Neben anderen Rohstoffen wird Gold in der VDI-Richtlinie 4800 nicht berücksichtigt. Daher wird in Anlehnung an eine andere VDI-Studie¹¹³ davon ausgegangen, dass die fehlenden Werte für Gold denen für Silber sehr ähnlich sind. Tabellenwerte für das Mineralöl (hauptsächlich auf Basis von Erdöl) finden sich in der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2¹¹⁴ und zeigen die kritischen Rohstoffe in beiden Szenarien.

¹¹³ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2018).

¹¹⁴ Vgl. VDI 4800 Blatt 2 (2018:03).

Tabelle 27: Rohstoffkritikalitätsanalyse (die Bewertungsskala reicht von 0 bis 1 und es werden Stufen von 0,3, 0,5 und 0,7 angegeben; Quelle: VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2¹¹⁵)

		Rohstoff/ Element	Aluminium	Chrom	Kupfer	Eisen	Lithium	Mangan	Nickel	Silizium	Silber	Titan	Zink	Erdöl
		Durchschnittliche Kritikalität des Rohstoffs	0,3	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,3
Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0,0	1,0	0,7	0,3	0,0	0,7	0,7	0,0	1,0	0,0	1,0	0,3	
	Grad der Koppelproduktion/Nebenproduktion	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,7	0,0	0,3	0,0	
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	0,3	0,3	0,3	0,3	1,0	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
	Verbreitungsgrad nat. Vorkommen bzw. Abbaubereiche	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Geopolitische und regulatorische	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	0,7	1,0	0,3	0,3	1,0	0,7	0,3	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3
Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion		1,0	1,0	0,7	1,0	1,0	0,7	0,3	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3	
Politisches Länderrisiko		0,5	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Regulatorisches Länderrisiko		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	
Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen		0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Ökonomische Kriterien	Grad der Nachfragesteigerung	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,7	
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	0,7	1,0	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	0,7	0,7	0,3	1,0	0,0	
	Annualisierte Preisvolatilität	0,7	0,7	1,0	0,7	0,7	1,0	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	

Aus dem Durchschnitt aller Werte der jeweiligen Kriterien wird die durchschnittliche Kritikalität aller Rohstoffe berechnet (zwischen 0,3 und 0,5). Im Zuge dessen kann festgestellt werden, dass ein Hauptrisiko für sämtliche Rohstoffe durch die Länderproduktion besteht. Darüber hinaus gehen zwei weitere Aspekte mit Risiken einher: die technische Machbarkeit und Wirt-

¹¹⁵ Vgl. VDI 4800 Blatt 2 (2018:03).

schaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen und die annualisierte Preisvolatilität. Beide Szenarien greifen in dieser Analyse auf die gleichen Rohstoffe zurück. Darüber hinaus ist zu beachten, dass auch alle der aufgeführten kritischen Rohstoffe in beiden Szenarien vorhanden sind. Daher wurde auf einen Vergleich der beiden Szenarien verzichtet. Die Ergebnisse der KRA-Analyse zeigen jedoch, dass das Retrofit-Szenario einen höheren Verbrauch an kritischen Elementen (Aluminiumoxid, Kupfer, Blei, Silizium, Zinn, Zink) aufweist, die bei der Herstellung von elektrischen und elektronischen CPPS-Komponenten verwendet werden.

6.1.8 Zusammenfassung

Es lässt sich feststellen, dass durch die Implementierung von Retrofit-Maßnahmen bei vier von fünf betrachteten Umweltindikatoren Einsparungen erzielt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass über den gesamten Lebenszyklus hinweg 17 % der Treibhausgasemissionen, 18 % des Energieverbrauchs, 16 % des Wasserverbrauchs und 14 % der in Anspruch genommenen Flächen eingespart werden können. Für diese Umweltindikatoren konnte die Nutzungsphase - und hierbei insbesondere der Stromverbrauch - als Treiber der Auswirkungen identifiziert werden. Zugleich ergeben sich in der Nutzungsphase die größten Einsparpotenziale mit ökologisch vorteilhaften Reduktionen für die vier Umweltindikatoren. Eine entgegengesetzte Veränderung konnte unterdessen beim kumulierten Rohstoffaufwand beobachtet werden, der im Retrofit-Szenario aufgrund der metallischen Bestandteile der CPPS-Komponenten etwa um 10 % höher ausfiel.

6.2 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

6.2.1 Herstellungs- und Transportkosten

Die für die Beschaffung des KSS erforderlichen Kosten für Anwendende betragen im Referenz-Szenario 1.912,43 €/a, wovon 1.871,23 €/a die Herstellungskosten und 41,20 €/a Transportkosten sind. Von diesen entfallen wiederum 1.838,45 €/a auf den Kühlschmierstoff und 73,98 €/a auf das Filtervlies. Im Retrofit-Szenario ist durch die Einsparung von KSS und Filtervlies der Anteil der Komponenten deutlich niedriger (1.523,51 €/a für Herstellung und 33,71 €/a für Transport). Allerdings kommen für die im Retrofit-Szenario erforderlichen Geräte nochmals 1.097,29 €/Jahr (Herstellung) und

0,23 €/a Transportkosten (insgesamt 1.097,52 €/a) hinzu. Von diesen zusätzlichen Investitionen machen die jährlichen Kosten für das Energiemessungsgerät mit 533,33 €/a den höchsten Einzelanteil aus. Insgesamt sind somit die Herstellungs- und Transportkosten im Retrofit-Szenario um 38,8 % höher als im Referenz-Szenario. Die Anteile der Komponenten an den Kosten sind in Tabelle 28 dargestellt:

Tabelle 28: Herstellungs- und Transportkosten der funktionellen Einheit in Euro/a

Produkt	Herstellungskosten	Transportkosten zwischen Herstellung und Nutzung	Summe der Kosten
Referenz-Szenario			
Kühlschmierstoff Einsatz	667,36 €	15,29 €	682,65 €
Kühlschmierstoff Verluste	1.129,90 €	25,89 €	1.155,79 €
Filtervlies	73,98 €	0,01 €	73,98 €
Summe Referenz-Szenario	1.871,23 €	41,20 €	1.912,43 €
Retrofit-Szenario			
Kühlschmierstoff Einsatz	667,36 €	15,29 €	682,65 €
Kühlschmierstoff Verluste	803,54 €	18,42 €	821,96 €
Filtervlies	52,61 €	0,00 €	52,61 €
Energiemessungsgerät	533,33 €	0,00 €	533,33 €
Beschleunigungssensor - Sensorklemme	23,33 €	0,00 €	23,33 €
Beschleunigungssensor (Industrie-Beschleunigungsaufnehmer)	42,00 €	0,00 €	42,00 €
Sensorknoten	160,00 €	0,00 €	160,00 €
Computer (ohne Peripheriegeräte)	172,41 €	0,08 €	172,49 €
Server (ohne Peripheriegeräte)	100,00 €	0,07 €	100,07 €
Maus	3,45 €	0,00 €	3,45 €
Tastatur	4,14 €	0,01 €	4,15 €
LCD-Monitor	58,62 €	0,07 €	58,69 €
Summe Retrofit-Szenario	2.620,80 €	33,95 €	2.654,75 €

6.2.2 Kosten der Nutzung (Stromverbrauch)

Der Stromverbrauch fällt im Referenz-Szenario nur für den Betrieb der Schleifmaschine und des Filters an. Für diesen Betrieb wurde ein Stromverbrauch in Höhe von 13.401 kWh/a errechnet. Bei einem zugrunde gelegten Durchschnittsstrompreis für die Industrie von 18,25 Cent/kWh (vgl. Kapitel

6.2.2) ergeben sich daraus Gesamtkosten für den Stromverbrauch in Höhe von 2.445,75 €/a.

Im Retrofit-Szenario kann durch die verringerte Gesamtdauer des Betriebs von Schleifmaschine und Filter, um dieselbe funktionale Einheit während eines Jahres herzustellen, eine Stromeinsparung in Höhe von 29,3 % auf 9.475 kWh/a erreicht werden. Dem gegenüber verbrauchen die Geräte für die Retrofit-Maßnahmen weitere 1.452 kWh/a, von denen der Betrieb des Servers mit 1.117 kWh/a den höchsten Anteil trägt. Die errechneten Stromkosten im Retrofit-Szenario belaufen sich demnach auf 1.729,17 €/a für Schleifmaschine und Filter sowie 264,99 €/a für die zusätzlichen Geräte. Die Gesamtkosten für den Stromverbrauch reduzieren sich mit 1.994,16 €/a somit um 18,5 % ggü. dem Referenz-Szenario. Stromverbrauch und Stromkosten für die einzelnen Komponenten sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Kosten für den Stromverbrauch der funktionellen Einheit während der Nutzungsphase in Euro/a

Aktivität/Gerät	Verbrauch in kWh	Preis in €/kWh	Summe der Kosten
Referenz-Szenario			
Energieverbrauch Maschine und Filter/Summe	13.401	0,1825 €/kWh	2.445,75 €
Retrofit-Szenario			
Energieverbrauch Maschine und Filter	9.875	0,1825 €/kWh	1.729,17 €
Energiemessungsgerät	96		17,52 €
Beschleunigungssensor - Sensorklemme	8		1,46 €
Beschleunigungssensor (Industrie-Beschleunigungsaufnehmer)	8		1,46 €
Sensorknoten	8		1,46 €
Computer (ohne Peripheriegeräte)	215		39,24 €
Server (ohne Peripheriegeräte)	1.117		203,85 €
Maus	Enthalten im Stromverbrauch von Computer und Server		n/a
Tastatur			
LCD-Monitor			
Summe Energieverbrauch der Retrofit-Geräte	1.452		264,99 €
Summe Retrofit-Szenario	10.927	0,1825 €/kWh	1.994,16 €

6.2.3 Entsorgungskosten

Die Entsorgungskosten beziehen sich auf den KSS, der sowohl durch den turnusmäßigen Austausch und Neueinsatz als auch durch den in den Spänen enthaltenen Verlust entsteht. Die Kosten enthalten zudem den als durchschnittlich angenommenen Transportweg zur Anlage. Im Referenz-Szenario

belaufen sich die Entsorgungskosten auf 346,50 €/a, wobei die rechnerischen Entsorgungskosten für das Filtervlies mit 0,02 €/a vernachlässigbar gering sind.

Im Retrofit-Szenario können diese Entsorgungskosten auf 283,58 €/a gesenkt werden. Das entspricht einer Einsparung von 18,2 %. Kosten für die Entsorgung aller Retrofit-Geräte, deren Behandlung sämtlich der Kategorie „Mechanical treatment transport WEEE“ aus ecoinvent zugerechnet wurde, ergeben sich zu 1,70 €/a. Der geringe zusätzliche Anteil von 0,005 % im Vergleich zu den Entsorgungskosten im Referenz-Szenario erklärt sich durch die geringen Gewichtsanteile der Geräte in der funktionellen Einheit. Somit ergeben sich für das Retrofit-Szenario in der Summe Entsorgungskosten in Höhe von 285,28 €/a – eine Einsparung von 17,7 %. Die Gewichtsanteile, spezifische Entsorgungskosten und Kostenanteile einzelner Komponenten finden sich in Tabelle 30.

Tabelle 30: Preise für Entsorgung im Referenz-Szenario und im Retrofit-Szenario

Gerät	Zu entsorgende Mengen in kg/a	Preis für Entsorgung in €/kg (ecoinvent)	Kosten der Entsorgung in €/a	
Referenz-Szenario				
Kühlschmierstoff Einsatz	344,000	0,374 €	128,66 €	
Kühlschmierstoff Verluste	582,421		217,83 €	
Filtervlies	1,875	0,0092 €	0,02 €	
Summe Referenz-Szenario	n/a	n/a	346,50 €	
Retrofit-Szenario				
Kühlschmierstoff Einsatz	344,000	0,374 €	128,66 €	
Kühlschmierstoff Verluste	414,198	0,272 €	154,91 €	
Filtervlies	1,333		0,0092 €	0,01 €
Energiemessungsgerät	0,253		0,07 €	
Beschleunigungssensor - Sensorklemme	0,023		0,01 €	
Beschleunigungssensor (Industrie-Beschleunigungsaufnehmer)	0,014		0,00 €	
Sensorknoten	0,054		0,01 €	
Computer (ohne Peripheriegeräte)	1,948		0,53 €	
Server (ohne Peripheriegeräte)	1,883		0,51 €	
Maus	0,075		0,02 €	
Tastatur	0,250		0,07 €	
LCD-Monitor	1,759	0,48 €		
Summe Retrofit-Szenario	n/a	n/a	285,28 €	

6.2.4 Gesamtkosten aus Sicht des KSS-Anwenders mit und ohne Retrofit-Maßnahmen

Vergleicht und addiert man die Kostenkomponenten aus den Kapiteln 6.2.1, 6.2.2 und 6.2.3, so ist festzustellen, dass im Referenz-Szenario die Stromkosten mit 52,0 % den höchsten Anteil der Kosten ausmachen, gefolgt von Herstellungs- und Transportkosten mit 40,6 % und Entsorgungskosten mit 5,8 %. Im Retrofit-Szenario machen hingegen aufgrund der zusätzlich benötigten Sensorikgeräte, Computer und Server die Herstellungs- und Transportkosten mit 53,8 % den höchsten Anteil aus, die Stromverbrauchskosten dagegen nur 40,4 % und die Entsorgungskosten 5,8 %.

In der Summe zeigt sich, dass die höheren Investitionen der Retrofit-Maßnahmen, die sich für die funktionelle Einheit auf 742,32 €/a belaufen, durch die Einsparungen im Stromverbrauch (451,59 €/a) und die Einsparungen in der Entsorgungsphase (61,22 €/a) nur teilweise wieder wettgemacht werden. Es verbleibt somit ein Saldo an Mehrkosten von 229,51 €/a für die Retrofit-Maßnahme. Den Gesamtüberblick über die Kostenverteilung zeigt Tabelle 31.

Tabelle 31: Kostenverteilung Herstellung (einschließlich Transport), Nutzung und Entsorgung – Vergleich von Referenz- und Retrofit-Szenario

Szenario	Herstellungs- und Transportkosten	Kosten für Stromverbrauch (Nutzungsphase)	Entsorgungskosten	Gesamtkosten
Referenz-Szenario	1.912,43 €/a	2.445,75 €/a	346,50 €/a	4.704,67 €/a
Retrofit-Szenario	2.654,75 €/a	1.994,16 €/a	285,28 €/a	4.934,18 €/a
Kostendifferenz im Retrofit-Szenario	742,32 €/a	-451,59 €/a	-61,22 €/a	229,51 €/a

6.2.5 Sensitivitätsanalyse: Worst Case eines erhöhten Stromverbrauchs von 50 % für CPPS-Komponenten im Retrofit-Szenario

Analog zur ökologischen Bewertung wird auch hier angenommen, dass der Stromverbrauch im Retrofit-Szenario für alle CPPS-Komponenten um 50 % höher gegenüber den Standardannahmen ist. Dies betrifft nicht den Strom-

verbrauch für Schleifmaschine und Filter im Retrofit-Szenario und im Referenz-Szenario. Für diesen Betrieb liegen langjährige Erfahrungswerte vor, hier herrscht also nur geringe Unsicherheit hinsichtlich der Schätzungen.

Der Stromverbrauch im Referenz-Szenario beträgt unverändert 13.401 kWh/a, was mit Blick auf den zugrunde gelegten Strompreis für die Industrie von 18,25 Cent/kWh zu Gesamtkosten für den Stromverbrauch in Höhe von 2.445,75 €/a führt. Im Retrofit-Szenario wird für diese Komponente des Stromverbrauchs eine Einsparung um 29,3 % auf 9.475 kWh/a erzielt. Die Geräte für die Retrofit-Maßnahmen verbrauchen nun jedoch annahmegemäß weitere 2.178 kWh/a (also 50 % mehr als in der Grundannahme), von denen der Betrieb des Servers mit 1.675,5 kWh/a den höchsten Anteil einnimmt. Somit belaufen sich die Stromkosten im Retrofit-Szenario auf 1.729,17 €/a für Schleifmaschine und Filter sowie 397,49 €/a für die zusätzlichen Geräte. Der Gesamtstromverbrauch (und damit auch die Gesamtstromkosten) erhöhen sich demnach um 6,6 % gegenüber der vorangegangenen Standardfall-Annahme. In Summe liegen die Gesamtkosten mit 1.994.16 €/a für den Stromverbrauch noch immer unter denen des Referenz-Szenarios, nun aber nur noch um 13,0 % anstelle von 18,5 %. Stromverbrauch und Stromkosten der einzelnen Komponenten für die alternative Annahme eines um 50 % höheren Stromverbrauchs der CPPS-Komponenten sind in Tabelle 32 dargestellt.

Die Annahme eines höheren Stromverbrauchs der Geräte wirkt sich lediglich auf die Kosten der Nutzungsphase aus und verschiebt das Ergebnis tendenziell weiter, wenn auch nur unerheblich, zu Ungunsten des Retrofit-Szenarios. Im Retrofit-Szenario machen Herstellungs- und Transportkosten mit nun 52,4 % den höchsten Anteil aus, der Anteil der Stromverbrauchskosten steigt auf 42,0 %, der der Entsorgungskosten sinkt geringfügig auf 5,6 %.

Tabelle 32: Kosten für Stromverbrauch der funktionellen Einheit während der Nutzungsphase in Euro/a – Sensitivitätsannahme mit 50 % höherem Stromverbrauch der CPPS-Geräte im Retrofit-Szenario

Aktivität/Gerät	Verbrauch in kWh	Preis in €/kWh	Summe der Kosten
Referenz-Szenario			
Energieverbrauch Maschine und Filter/Summe	13.401	0,1825 €/kWh	2.445,75 €
Retrofit-Szenario			
Energieverbrauch Maschine und Filter	9.875	0,1825 €/kWh	1.729,17 €
Energiemessungsgerät	144		26,28 €
Beschleunigungssensor – Sensorklemme	12		2,19 €
Beschleunigungssensor (Industrie-Beschleunigungsaufnehmer)	12		2,19 €
Sensorknoten	12		2,19 €
Computer (ohne Peripheriegeräte)	322,5		58,86 €
Server (ohne Peripheriegeräte)	1.675,5		305,78 €
Maus	Enthalten im Stromverbrauch von Computer und Server		n/a
Tastatur			
LCD-Monitor			
Summe Energieverbrauch der Retrofit-Geräte	2.178		
Summe Retrofit-Szenario	11.653	0,1825 €/kWh	2.126,65 €

In der Summe sinken die Einsparungen des Stromverbrauchs von 451,59 €/a auf 319,09 €/a, sodass der Gesamtsaldo an Mehrkosten für das Retrofit-Szenario gegenüber dem Referenz-Szenario von 229,51 €/a auf 362,00 €/a steigt. Den Gesamtüberblick über die Kostenverteilung zeigt Tabelle 33.

Tabelle 33: Kostenverteilung Herstellung (einschließlich Transport), Nutzung und Entsorgung – Vergleich von Referenz- und Retrofit-Szenario mit 50 % höherem Stromverbrauch der CPPS-Geräte

Szenario	Herstellungs- und Transportkosten	Kosten für Stromverbrauch (Nutzungsphase)	Entsorgungskosten	Gesamtkosten
Referenz-Szenario	1.912,43 €/a	2.445,75 €/a	346,50 €/a	4.704,67 €/a
Retrofit-Szenario	2.654,75 €/a	2.126,65 €/a	285,28 €/a	5.066,68 €/a
Kostendifferenz im Retrofit-Szenario	742,32 €/a	-319,09 €/a	-61,22 €/a	362,00 €/a

Ergänzend ist zu beachten, dass diese Annahme nur einen geringen Anteil des Stromverbrauchs betrifft und somit lediglich eine untergeordnete Auswirkung auf das Gesamtergebnis hat. Da der Stromverbrauch grundsätzlich aber eine wesentliche Komponente im Vergleich der Gesamtkosten darstellt, würde eine Erhöhung des Strompreises (etwa für KMU mit geringem Gesamtstromverbrauch oder in der Prognose einer zukünftigen Entwicklung der Strompreise) einen stärkeren Einfluss auf den Vergleich zugunsten des Retrofit-Szenarios bewirken.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel der Studie war es, die Aufwendungen an Material, Energie, Wasser und die Inanspruchnahme des Flächenverbrauchs über den Lebensweg ausgewählter Retrofit-Maßnahmen in einer geeigneten Kombination für ein typisches spezifiziertes Schleifverfahren (Außenrundscheifen als Zerspanungsprozess) unter Einsatz von Kühlschmierstoffen zu quantifizieren. Hierbei wurde die Verwendung versorgungskritischer Rohstoffe aufgezeigt, das Treibhausgaspotenzial in CO₂-Äquivalenten abgeschätzt, die relevanten Kosteneinsparungen, aber auch die zusätzlichen Kosten durch die Retrofit-Maßnahmen wurden vergleichend kalkuliert. Das Retrofit-Szenario umfasst dabei einen Schleifprozess mit einem Konglomerat von Energie-Retrofit, Schwingungs- und Vibrationsretrofit. Die funktionelle Einheit wurde alternativ anhand der Menge der produzierten Stückzahl (58.579 Stück/Jahr) oder anhand des Spanvolumens (82.010 cm³/Jahr) festgelegt.

In einer Sensitivitätsanalyse wurde abweichend von den Standardannahmen des Retrofit- sowie des Referenz-Szenarios davon ausgegangen, dass alle CPPS-Komponenten im Retrofit-Szenario einen um 50 % erhöhten Stromverbrauch verursachen.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 34 zusammengefasst und in ein Skalensystem mit „++“ als bestem sowie „-“ als schlechtestem Indikatorwert eingeteilt. Unter Verwendung der Zwischenstufen „+“, „0“ sowie „-“ wird darüber hinaus die relative Performance der Alternativen in dem Skalensystem zwischen dem besten und dem schlechtesten Indikatorwert ausgedrückt.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die einzelnen Indikatoren nicht in allen Fällen eindeutig für die Einführung der betrachteten Retrofit-Maßnahmen sprechen. Mit Ausnahme des kumulierten Rohstoffaufwands führen jedoch Retrofit-Maßnahmen tendenziell zu einer Verbesserung der Auswirkungen auf die Umwelt. Falls sich der Stromverbrauch der CPPS-Einheiten um 50 % erhöht, reduziert sich der Vorteil der Retrofit-Maßnahmen geringfügig.

Tabelle 34: Gesamtvergleich der Kriterien für das Referenz- und das Retrofit-Szenario einschließlich einer Sensitivitätsanalyse bezüglich eines erhöhten Stromverbrauchs bezogen auf die funktionelle Einheit

Wirkungs-indikator	Referenz-Szenario	Retrofit-Szenario	Sensitivitätsanalyse mit erhöhtem CPPS-Stromverbrauch
Treibhauspotenzial	-	++	+
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	-	++	+
Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	++	-	-
Wasserverbrauch	-	++	+
Flächeninanspruchnahme	-	++	+
Gesamtkosten	+	o	-

Allerdings amortisieren sich unter den gegebenen Annahmen die zusätzlichen Kosten der Retrofit-Maßnahmen nicht vollständig über die Lebensdauer der Investition. Hierbei wurde jedoch modellgemäß außer Acht gelassen, dass die Retrofit-Maßnahmen möglicherweise auch eine Verlängerung der Lebensdauer der Anlage bewirken können.

7.2 Schlussfolgerungen

Aus technischer Sicht ist die Erweiterung des Maschinensystems durch das vorgeschlagene CPPS aufgrund der entstehenden Transparenz und Möglichkeit zur Datenaufnahme und Auswertung grundsätzlich als positiv zu beschreiben. Besonders bei älteren Maschinen und Anlagen ist es häufig nicht möglich, tiefgehende Aussagen über den Erfahrungsschatz des technischen Personals hinaus zu treffen und dabei die nötige Datengrundlage zu generieren. Mithilfe der Erweiterung eines CPPS sind, wie in dieser Studie dargestellt, diese Aussagen einfacher zu generieren und zu begründen. Zudem ist die Erweiterung des Industrie-4.0-Retrofits leicht und kosteneffizient durch beispielsweise weitere Retrofits möglich, da bei der initialen Beschaffung der Gesamtanteil zur Datenerfassung und -aufbereitung bereits enthalten ist. Die gesamte informationstechnische Verarbeitung ist durch den Ersteinsatz des CPPS bereits aufgebaut und kann daher problemlos durch weitere Datenquellen (Sensorik) erweitert werden. Vorteilhaft bei der angewendeten Erweiterung ist die Schaffung von Transparenz, die im Vordergrund der beiden verglichenen Szenarien des Berichts steht. Das abgebildete Konzept bietet

die Möglichkeiten, weitere Potenziale durch Erfahrungswerte oder datenbasierte Analysen offenzulegen. Dabei ist die Retrofit-Maßnahme einzeln betrachtet zunächst nur der genannten Transparenz dienlich. Die weiteren Potenziale und Verbesserungen, insbesondere in Bezug auf den KSS-Einsatz im Schleifprozess, ergeben sich aus den erläuterten Nachhaltigkeitsstrategien, die sich auf einen grundsätzlichen Effizienzgedanken und die Substitution von konventionellem KSS durch Bioschmierstoffe beziehen, die ggf. eine detailliertere Systemüberwachung erfordern, um eine hohe Prozessqualität zu gewährleisten bzw. Ausschuss zu vermeiden.

Das Retrofit-Szenario, das insgesamt drei Retrofit-Maßnahmen beinhaltet, resultiert in der exemplarischen Anwendung des Schleifprozesses in einer Verringerung des Kühlschmierstoffeinsatzes und bewirkt so eine Energieeinsparung von 29,3 % gegenüber dem Referenz-Szenario. Besonders während der Schruppbearbeitung konnten durch das Retrofitting Potenziale herausgestellt und klar beziffert werden. Diese Gegenüberstellung beschreibt einen beispielhaften Anwendungsfall und könnte im industriellen Rahmen zu größeren Einsparungspotenzialen führen. Zudem sind weitere Verbesserungen, wie beispielsweise die prädiktive Instandhaltung oder ein schwingungsbasiertes Qualitätsmanagement der Werkstücke, denkbar.

Für Unternehmen bilden sich durch die möglichen Potenziale des Retrofits weitere Handlungs- und Ausbildungsstufen der Retrofit-Maßnahmen. Diese stufenweise Ausbildung des CPPS und die damit verbundenen Retrofit-Maßnahmen lassen sich wie folgt beschreiben.

- Stufe 1: Transparenz

Für die Schaffung von Transparenz ist primär das CPPS im Anwendungsfall angewandt worden. Für Unternehmen bietet sich hier die Möglichkeit, die physische Ebene sowie den Decision Support als visualisierende Elemente zu verwenden. Dabei können Prozesse mittels einfacher methodischer Vorgehensweisen optimiert werden. Die Transparenz ist der erste Schritt zu einer effektiven Nutzung der Cyber-Ebene des CPPS und der damit verbundenen folgenden Ausbaustufe. Durch die Daten können beispielsweise Hot-Spot-Analysen im Unternehmen durchgeführt werden, um großflächige Potenziale zu erkennen.

- Stufe 2: Effektive Nutzung der Cyber-Komponenten

Die Cyber-Komponenten des CPPS beziehen sich auf die Modellierung und Simulation der entstehenden Datenerfassung und -verarbeitung. Es ist denkbar, auf Regressionsansätze oder das breitgefächerte Machine Learning zurückzugreifen und somit datenbasierte Optimierungsverfahren anzuwenden. Die erweiterten Potenziale der Cyber-Ebene sind innerhalb der Szenarienbeschreibung erläutert und weisen eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Anwendung auf.

- Stufe 3: Automatisierung

Die Automatisierung der vorhandenen Komponenten beschreibt die dritte Ausbaustufe. Unternehmen können mittels vorhandener Transparenz und erweiterter Modellierung des eigenen Systems nun innerhalb des Decision Support auch eine Steuerung und Regelung anstreben, die die Komponenten der physischen Ebene beeinflusst, und somit ein vollständiges CPPS, wie es u. a. in der Literatur beschrieben ist, aufbauen. Die Regelung des Systems erfolgt dabei auf Basis der Erkenntnisse, die auf der Cyber-Ebene entstehen und durch die Datenverarbeitung unterstützt werden. Nichtsdestotrotz kann, auch wenn ein hoher Automatisierungsgrad in dieser Potenzial- und Ausbaustufe im Vordergrund steht, der Mensch noch in die Prozesse einbezogen werden. Vor allem durch das entstandene Know-how und die Unterstützung durch beispielsweise Handlungsempfehlungen ist eine Mensch-Maschine-Interaktion unbedingt notwendig.

Mit Retrofit-Maßnahmen zeigt die ökologische Bewertung positive Auswirkungen in vier Umweltkategorien und lediglich in einer Umweltkategorie eine negative Auswirkung. Einerseits lässt die Mehrzahl der Wirkungskategorien (Treibhausgaspotenzial, KEA, Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme) in der Umweltanalyse erkennen, dass Retrofit-Maßnahmen die Auswirkungen auf die Umwelt gegenüber der traditionellen Bearbeitung reduzieren. Mit Retrofit-Maßnahmen können Einsparungen zwischen 14 % und 18 % erzielt werden. Die Nutzungsphase ist hierbei bei allen Kategorien die wichtigste Phase des Lebenszyklus; ausschlaggebend für die Auswirkungen in der Nutzungsphase ist dabei der Strombedarf für den Prozess. Dagegen

hat die Entsorgungsphase im Allgemeinen nur minimale Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse.

Andererseits sind die Auswirkungen von Retrofit-Maßnahmen beim Indikator des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA) nicht vorteilhaft. Dies war zu erwarten, da der Materialbedarf in der Tat höher ist, wenn mehr Ressourcen eingesetzt werden, z. B. Elektronik mit CPPS-Komponenten. Die Retrofit-Maßnahmen haben jedoch einen höheren Einsatz kritischer Elemente im KRA-Indikator für die Produktion elektrischer und elektronischer CPPS-Komponenten. Dies ist auch für den Indikator des Versorgungsrisikos von Bedeutung. Die materielle Kritikalität hat einen mittleren Wert zwischen 0,3 und 0,5.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass sich bei einer Erhöhung des Energiebedarfs um 50 % der CPPS-Komponenten die aggregierten Gesamtergebnisse für die einzelnen Indikatoren kaum ändern (weniger als 5 %).

Eine Bewertung der Kosten zeigt, dass aus Sicht des Unternehmens die Investition in eine Retrofit-Maßnahme zwar zu einer Ressourceneinsparung in der Betriebsphase und zu einem geringen Ausmaß auch bei der Entsorgung führt. Diese Einsparung ist jedoch bei den gegebenen Annahmen, insbesondere der Annahme heutiger Strompreise sowie des Zeithorizonts der Anlagen, für das Unternehmen nicht rentabel. Hinzu kommt der nicht unerhebliche zusätzliche Aufwand für Datenaufnahme und Datenauswertung. Zu beachten ist weiterhin, dass über den zusätzlichen Stromverbrauch der Retrofit-Geräte weniger Erfahrungswerte und damit mehr Unsicherheit herrscht als über den Stromverbrauch beim Betrieb der Schleifmaschine selbst.

Eine deutliche Erhöhung des Strompreises in der Zukunft bzw. die realistische Annahme, dass kleine Unternehmen auch heute einen höheren Strompreis ähnlich dem für private Haushalte zahlen, könnte die Unrentabilität der Investition aus Unternehmenssicht relativieren. Auch der in dieser Analyse nicht berücksichtigte mögliche Effekt, dass die Lebensdauer der gesamten Anlage durch die Retrofit-Maßnahme ggf. um einige Jahre verlängert werden oder alternativ bei Dauerbetrieb der jährliche Output gegenüber dem

Referenz-Szenario erhöht werden kann, wirkt in umgekehrte Richtung - also zugunsten der Retrofit-Maßnahme.

Wenn ein verstärkter Einsatz von Retrofit-Maßnahmen aus Effizienz- und Umweltaspekten gesellschaftlich gewünscht ist, sollten solche Investitionen staatlich gefördert werden, um unabhängig von der Unsicherheit über die betriebswirtschaftliche Rentabilität während der Restlaufzeit der Anlage für das Unternehmen einen Anreiz zu schaffen. Gleichzeitig ist es sinnvoll, Retrofit-Maßnahmen durch flankierende Maßnahmen wie gezielte Information, wissenschaftliche Begleitung und Dokumentation von Gute-Praxis-Beispielen aus unterschiedlichen Anwendungsfeldern zu flankieren.

Da unter Umweltaspekten die Retrofit-Maßnahmen (abgesehen von dem abweichenden Ergebnis beim Indikator „Kumulierter Rohstoffaufwand“ (KRA) immer unter Umwelt- und Klimaaspekten vorteilhaft erscheinen, lässt sich eine staatliche Förderung, ggf. auch mit einem gezielten neuen Förderprogramm auf Bundesland-, deutscher und/oder EU-Ebene durchaus begründen. Hierbei wäre zu prüfen, ob sich nicht branchen-, material- und marktübergreifend Synergieeffekte - auch in Kooperation zwischen KMU und größeren Unternehmen - nutzen lassen.

LITERATURVERZEICHNIS

Alex, M. (2010): Spaltung von Emulsionen mit verdichteten Gasen, Cu-villier Verlag, Göttingen.

Al-Maeeni, S. S. H.; Kuhnhen, C.; Engel, B. und Schiller, M. (2020): Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0. In: Procedia CIRP, 88, S. 369 – 374.

Anisic, Z.; Lalic, B. und Gracanin, D. (2020): Proceedings on 25th International Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management – IJCIEOM, Basel: Springer International Publishing.

Arafat, R.; Madanchi, N.; Thiede, S.; Herrmann, C. und Skerlos, S. J. (2021): Supercritical carbon dioxide and minimum quantity lubrication in pendular surface grinding – A feasibility study. In: Journal of Cleaner Production, 296, S. 126 – 560.

Beckhoff Automation GmbH & Co. KG (2022): ELM3602-0002 | EtherCAT-Klemme, 2-Kanal-Analog-Eingang, IEPE/Beschleunigung, 24 Bit, 50 kSps, BNC [online], [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://www.beckhoff.com/de-de/produkte/i-o/ethercat-klemmen/elmxxxx-messtechnik/elm3602-0002.html>

Brinksmeier, E.; Meyer, D.; Huesmann-Cordes, A. G. und Herrmann, C. (2015): Metalworking fluids – Mechanisms and performance. In: CIRP Annals, 64 (2), S. 605 – 628.

Campitelli, A.; Cristóbal, J.; Fischer, J.; Becker, B. und Schebek, L. (2019): Resource efficiency analysis of lubricating strategies for machining processes using life cycle assessment methodology. In: Journal of Cleaner Production, S. 222.

Conrad Electronics SE (2022): Bosch Connected Devices and Solutions Prototyping-Board XDK 110 Cross-Domain Development Kit XDK 110 [online], [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://www.conrad.de/de/p/bosch-connected-devices-and-solutions-prototyping-board-xdk-110-cross-domain-development-kit-xdk-110-1421124.html>

Danelon Lopes, L. C. und Neumann, C. (2021): Research and trends in cyber-physical production systems from 2008 to 2019. In: Procedia CIRP, 99, S. 592 – 597.

Denkena, B.; Helmecke, P. und Hülsemeyer, L. (2014): Energy Efficient Machining with Optimized Coolant Lubrication Flow Rates. In: Procedia CIRP, 24, S. 25 - 31.

Dettmer, T. (2006): Nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2006, Vulkan-Verl., Essen, Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020): DGUV Regel 109-002 „Arbeitsplatzlüftung - Lufttechnische Maßnahmen“ [online], [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/regel-werk/dguv-regeln/919/arbeitsplatzlueftung-lufttechnische-massnahmen>

DIN EN ISO 14040:2006: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 14044:2006: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 69651:1981: Deutsches Institut für Normung e. V., Werkzeugmaschinen; Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung; Begriffe, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 8580:2003: Deutsches Institut für Normung e. V., Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 8589:2003: Deutsches Institut für Normung e. V., Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Engels, G. (2020): Der digitale Fußabdruck, Schatten oder Zwilling von Maschinen und Menschen. In: Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO), 51 (3), S. 363 - 370.

European Commission, D. E. (2012): Assessment of resource efficiency indicators and targets [online], [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ad=rja&uact=8&ved=2ahUKUWjQsIL1jOT4AhWjIP0HHRzoCREQFnoECAs-QAQ&url=https%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Fenvironment%2Fenv-co%2Fresource_efficiency%2Fpdf%2Freport.pdf&usg=AOv-Vaw06rxx5clX17F-DfuFy-mmd

Fischer, P., Itasse, S. (2010): Verdampferanlagen senken Entsorgungskosten von Flüssigabfällen aus der Metallbearbeitung [online]. In: Maschinenmarkt [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/verdampferanlagen-senken-entsorgungskosten-von-fluessigabfaellen-aus-der-metallbearbeitung-a-263142/>

Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft (2012): Im Fokus: Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0; Handlungsempfehlungen zur Umsetzung sowie Vorstellung der weiteren von der Promotorengruppe behandelten Initiativen; Bericht der Promotorengruppe Kommunikation, Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wirtschaft e. V., Berlin.

González-Reyes, G. A.; Bayo-Besteiro, S.; Vich Llobet, J. und Añel, J. A. (2020): Environmental and Economic Constraints on the Use of Lubricant Oils for Wind and Hydropower Generation: The Case of NATURGY. In: Sustainability, 12 (10), S. 4242.

Hamrol, A.; Ciszak, O.; Legutko, S. und Jurczyk, M. (2018): Advances in Manufacturing, Basel: Springer International Publishing.

Hansen, A.; Hallmann, C.; Schmehl, M. (2005): Produktökobilanz nicht-wassermischbarer Kühlschmierstoffe auf Basis von Mineralöl, pflanzlichen Ölen sowie Altspisefetten und technischen tierischen Fetten. Abschlussbericht DBU-Projekt AZ 19122, Braunschweig.

Herrmann, C.; Hesselbach, J.; Bock, R.; Zein, A.; Öhlschläger, G. und Dettmer, T. (2007a): Ecologically Benign Lubricants – Evaluation From a Life Cycle Perspective. In: CLEAN – Soil, Air, Water, 35 (5), S. 427 – 432.

Herrmann, C.; Hesselbach, J.; Bock, R. und Dettmer, T. (2007b): Coolants made of native ester – technical, ecological and cost assessment from a life cycle perspective, S. 299 – 303.

Hoffmann Maschinen- und Apparatebau GmbH (2007): Betriebsanleitung Dunstabscheider D40/DW 200, Lengede.

Huijbregts, M. A. J.; Steinmann, Z. J. N.; Elshout, P. M. F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A. und van Zelm, R. (2017): ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at mid-point and endpoint level. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 22 (2), S. 138 - 147.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics, Bristol.

IPCC, Hg. (2013): Climate change 2013 - The physical science basis; Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [online], New York, NY, Cambridge Univ. Press, [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf

Kitzig, H.; Jandaghi, N.; Azarhoushang, B. und Vesali, A. (2014): Optimizing the Dry Grinding Process on the Basis of Bond Materials. In: Advanced Materials Research, 1017, S. 237 - 242., Advanced Materials Research.

Kruk, R. (2011): Retrofit - ein Beispiel für die Modernisierung von Werkzeugmaschinen. In: TU Clausthal-IMW-Institutsmittteilung Nr. 36 [abgerufen am: 26.01.2022], verfügbar unter: https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmittteilungen/2011/105_108_rk_Retrofit_Werkzeugmaschine.pdf

Kumar, R.; Patil, O.; Nath S, K.; Sangwan, K. S. und Kumar, R. (2021): A Machine Vision-based Cyber-Physical Production System for Energy Efficiency and Enhanced Teaching-Learning Using a Learning Factory. In: Procedia CIRP, 98, S. 424 - 429.

Kumar, R.; Rogall, C.; Thiede, S.; Herrmann, C. und Sangwan, K. S. (2021): Development of a Decision Support System for 3D Printing Processes based on Cyber Physical Production Systems. In: Procedia CIRP, 98, S. 348-353.

Lee, J.; Noh, S. D.; Kim, H.-J. und Kang, Y.-S. (2018): Implementation of Cyber-Physical Production Systems for Quality Prediction and Operation Control in Metal Casting. In: Sensors, S. 18 (5) [online] [abgerufen am: 06.07.2022], verfügbar unter: https://mdpi-res.com/d_attachment/sensors/sensors-18-01428/article_deploy/sensors-18-01428.pdf?version=1525434411.

Madanchi, N. (2022): Model Based Approach for Energy and Resource Efficient Machining Systems, Springer International Publishing; Imprint Springer, Cham, Springer eBook Collection.

Madanchi, N.; Kurle, D.; Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2015): Energy Efficient Process Chain: The Impact of Cutting Fluid Strategies. In: *Procedia CIRP*, 29, S. 360 - 365.

Madanchi, N.; Thiede, S.; Gutowski, T. und Herrmann, C. (2019): Modeling the impact of cutting fluid strategies on environmentally conscious machining systems. In: *Procedia CIRP*, 80, S. 150 - 155.

Madanchi, N.; Winter, M. und Herrmann, C. (2015): Cutting Fluid Drag-out and Exhaust Air in Grinding Processes: Influence on the Eco-efficiency. In: *Procedia CIRP*, 29, S. 329 - 334.

Madanchi, N.; Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2017): Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design. In: *Procedia CIRP*, 61, S. 564 - 569.

Mennenga, M.; Rogall, C.; Yang, C.-J.; Wölper, J.; Herrmann, C. und Thiede, S. (2020): Architecture and development approach for integrated cyber-physical production-service systems (CPPSS). In: *Procedia CIRP*, 90, S. 742 - 747.

Metra Mess- und Frequenztechnik MMF (2021): Industrie-Beschleunigungsaufnehmer [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://www.mmf.de/pdf/1-10.pdf>

Monostori, L. (2014): Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. In: *Procedia CIRP*, 17, S. 9 - 13.

Oemeta (2016): Ökobilanzierung von Kühlschmierstoffsystemen in der Metallbearbeitung - Bewertung von Umweltauswirkungen am Beispiel der Kurbelwellenfertigung [online][abgerufen am 06.07.2022], verfügbar unter: https://de.oemeta.com/fileadmin/user_upload/germany/support/technical-information/OEkobilanzierung_von_Kuehlschmierstoffsystemen_in_der_Metallbearbeitung.pdf

PROBAS Datenbank (2022): ProBas - Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme [online], [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>

Rogall, C.; Mennenga, M.; Herrmann, C. und Thiede, S. (2022): Systematic Development of Sustainability-Oriented Cyber-Physical Production Systems. In: Sustainability, 14 (4), S. 20 - 80.

Roth, A. (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

RS Online (25.01.2022): Chauvin Arnoux CA 8335 Netzqualitätsanalysator, 1000V / 6500A [online][abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: <https://de.rs-online.com/web/p/netzqualitaetsanalysatoren/0549722>

Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R.; Krüger, A. und ten Hompel, M.: Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten - UPDATE 2020 - (acatech STUDIE), utz Verlag, München.

Suvarna, M.; Yap, K. S.; Yang, W.; Li, J.; Ng, Y. T. und Wang, X. (2021): Cyber-Physical Production Systems for Data-Driven, Decentralized, and Secure Manufacturing—A Perspective. In: Engineering, 7 (9), S. 1212 - 1223.

Tao, F.; Qi, Q.; Wang, L. und Nee, A. (2019): Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. In: Engineering, 5 (4), S. 653 - 661.

Tawakoli, T.; Westkaemper, E. und Rabiey, M. (2007): Dry grinding by special conditioning. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33 (3-4), S. 419 - 424.

Thiede, S. (2018): Environmental Sustainability of Cyber Physical Production Systems. In: Procedia CIRP, 69, S. 644-649.

Thiede, S.; Juraschek, M. und Herrmann, C. (2016): Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. In: Procedia CIRP, 54, S. 7 - 12.

Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J. und Johansson, B. (2013): Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 6 (1), S. 78 - 87.

TUBS/IWF (2011): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben „Schmierstoff auf Polymerbasis zum Ersatz von Mineralöl in der spanenden Fertigung - Integration in die industrielle Produktion“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), betreut durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Projektträger im DLR, Bonn.

VDI 4600:2012:01: Verein Deutscher Ingenieure e. V. - Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz; Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 2:2018:03: Verein Deutscher Ingenieure e. V. - Bewertung des Rohstoffaufwands. Bewertung des Rohstoffaufwands, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017a): Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2017b): Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Wassermischbare Kühlschmierstoffe. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin [abgerufen am: 06.07.2022], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Kuehlschmierstoffe_barrierefrei.pdf

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2018): Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/VDI-ZRE_Studie_Energiespeichertechnologien_2_ueberarb_Auflage_bf.pdf

VDMA (2020): Leitfaden Retrofit für Industrie 4.0., [abgerufen am: 25.01.2022], verfügbar unter: https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/55119136/Leitfaden_I40_Retrofit_Final_1604655010496.pdf/19272b88-e0ce-9896-5e8b-65dc0739b9e3

Venkatesh, K.; Sriram, G.; Sai Raj Pavan, S. und Suresh, S. (2018): Effect of Biodegradable metal cutting fluids in machining applications - A Review. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 390, S. 12083.

Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E. und Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 21 (9), S. 1218 - 1230.

William-Olsson, P. (2020): Comparative LCA between bio-based and petroleum-based lubricants [online], [abgerufen am 06.07.2022], verfügbar unter: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1394498/FULLTEXT01.pdf>

Winter, M. (2016): Eco-efficiency of Grinding Processes and Systems, Springer International Publishing, Basel.

Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2015): Influence of the cutting fluid on process energy demand and surface roughness in grinding—a technological, environmental and economic examination. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 77 (9-12), S. 2005 - 2017.

Wittmann, M. (2007): Bedarfsgerechte Kühlschmierung beim Schleifen. Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen, Dissertation, Shaker Verlag, Düren.

Yao, M. A.; Higgs, T. G.; Cullen, M. J.; Stewart, S. und Brady, T. A. (2010): Comparative assessment of life cycle assessment methods used for personal computers. In: Environmental science & technology, 44 (19), S. 7335 - 7346.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bülowstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 (0)30 2759506-0
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

