



Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von Kühlschmierstoffen in der spanenden Fertigung



Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands –
Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von Kühlschmierstoffen in der spanenden
Fertigung

Autorinnen und Autoren:

Dr. Francesco Castellani, Ramboll Deutschland GmbH, München

Alexander Greßmann, Ramboll Deutschland GmbH, München

Selina Scheer, Ramboll Deutschland GmbH, München

Elisabeth Zettl, Ramboll Deutschland GmbH, München

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Technische Universität Braunschweig, Institut für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig

Robar Arafat, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig

Oliver Schömig, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig

Christopher Rogall, Technische Universität Braunschweig, Institut für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig

Dr.-Ing Max Juraschek, Technische Universität Braunschweig, Institut für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Braunschweig

Fachliche Ansprechpersonen:

Dr.-Ing. Ulrike Lange, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Manuel Weber, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Wir danken Herrn Stefan Joksch, Geschäftsführer Technik & Produktion der Oemeta
Chemische Werke GmbH, für seine fachliche Unterstützung.

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

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH

VDI-Platz 1

40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-505

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © PantherMedia / Sergei Lykov

VDI ZRE Publikationen: Studien

**Ökologische und ökonomische
Bewertung des Ressourcenaufwands**

**Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von
Kühlschmierstoffen in der spanenden Fertigung**

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	8
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	10
KURZFASSUNG	11
1 HINTERGRUND & ZIELSETZUNG	13
1.1 Relevanz von Kühlschmierstoffen in der Fertigungs- industrie	13
1.2 Zielsetzung	15
2 GRUNDLAGEN	17
2.1 Metallbearbeitung und Werkzeugmaschinen	17
2.2 Kühlschmierstoffe in der Zerspanung	19
2.3 Verschleiß von wassergemischten Kühlschmierstoffen	20
2.4 Überwachung von KSS-Zuständen	22
2.5 Standzeitverlängernde Maßnahmen bei KSS	28
2.5.1 Allgemeine Hygienemaßnahmen	29
2.5.2 Chemische Konservierungsmaßnahmen	30
2.5.3 Chemisch-Physikalische Konservierungsmaßnahmen	33
3 VERGLEICHENDE ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG	40
3.1 Untersuchungsrahmen und funktionelle Einheit	40
3.1.1 Frässystem	40
3.1.2 KSS-System	41
3.1.3 Kühlschmierstoff	44
3.1.4 Referenzwerkstück und Bearbeitungsparameter	46
3.1.5 Produktionsszenario und funktionelle Einheit	49
3.2 Szenarien-Definition	50

3.3	Ökologische Bewertung: Quantifizierung der Sachbilanz	56
3.3.1	Stromverbrauch	57
3.3.2	KSS	58
3.3.3	Reinigungsflüssigkeit	59
3.3.4	Sensoren und zusätzliche Elektronik	60
3.3.5	pH-Pufferlösung	64
3.3.6	Biozid	64
3.3.7	Laptop	65
3.3.8	Zusammenfassung der Inventarisierung der Daten	65
4	ÖKONOMISCHE BEWERTUNG: AUSWAHL UND QUANTIFIZIERUNG DER KOSTENPOSITIONEN	72
4.1	Auswahl der Kostenpositionen	72
4.2	Quantifizierung ausgewählter Kostenpositionen	72
4.2.1	Preise für alle Szenarien	73
4.2.2	Preise für pH-Messung (alle Szenarien außer Referenz)	75
4.2.3	Preise für Ölabscheidung mit Oil-Skimmer (Szenario 1)	76
4.2.4	Preise für Biozidzugabe (Szenario 2)	76
4.2.5	Preise für Pasteurisierung (Szenario 3)	77
4.2.6	Preise für Entsorgungskosten der Geräte und Substanzen	77
5	ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG	80
5.1	Ergebnisse der ökologischen Bewertung	80
5.1.1	Treibhausgaspotenzial	82
5.1.2	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	87
5.1.3	Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	89
5.1.4	Wasserverbrauch	93
5.1.5	Flächeninanspruchnahme	96

5.1.6	Sensitivitätsanalyse	99
5.1.7	Rohstoffkritikalität	105
5.1.8	Zusammenfassung	108
5.2	Ergebnisse der ökonomischen Bewertung	108
5.2.1	Herstellungskosten	108
5.2.2	Kosten der Nutzung (Substanzen und Stromverbrauch)	110
5.2.3	Entsorgungskosten	112
5.2.4	Gesamtkosten aus Sicht des KSS-Anwendenden	114
5.2.5	Sensitivitätsanalyse	115
5.2.6	Zusammenfassung	118
6	ZUSAMMENFASSUNG & SCHLUSSFOLGERUNGEN	119
6.1	Kernaussagen der Studie	122
6.2	Ausblick	124
	LITERATURVERZEICHNIS	126

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Primärer Betrachtungsrahmen der Studie im ganzheitlichen Lebenszyklus eines Werkstücks	14
Abbildung 2:	Aufteilung der Betriebskosten bei Werkzeugmaschinen	18
Abbildung 3:	Einteilung der Kühlschmierstoffe gemäß DIN 51385	19
Abbildung 4:	Referenzmaschine Deckel Maho DMU 100	41
Abbildung 5:	Schematischer Aufbau des KSS-Kreislaufs inkl. der Verlustströme	42
Abbildung 6:	Links: KSS-Anlage mit 250-Liter-Tank, Förderpumpen und integriertem Filterkorb; rechts: Öl-/Emulsionsnebelabscheidung oberhalb des Maschinenraums	43
Abbildung 7:	Referenzbauteil vor und nach Bearbeitung mit zugehörigen Fräsoperationen	48
Abbildung 8:	Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit, FE)	81
Abbildung 9:	Treibhausgaspotenzial für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in kg CO _{2-eq} /FE)	83
Abbildung 10:	Treibhausgaspotenzial verteilt über den Lebenszyklus (in kg CO _{2-eq} /FE)	85
Abbildung 11:	Kumulierter Energieaufwand (KEA) für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in MJ/FE)	87
Abbildung 12:	Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in kg/FE)	92
Abbildung 13:	Wasserverbrauch für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in m ³ /FE)	94

Abbildung 14:	Flächeninanspruchnahme für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in $m^2 \cdot a/FE$)	97
Abbildung 15:	Treibhausgaspotenzial (GWP) im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)	100
Abbildung 16:	Kumulierter Energieaufwand (KEA) im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)	101
Abbildung 17:	Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)	102
Abbildung 18:	Wasserverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)	103
Abbildung 19:	Flächenverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber der Standardannahme)	104
Abbildung 20:	Sensitivitätsanalyse mit einer Lebensdauer von 24 Wochen (Referenzszenario)	105
Abbildung 21:	Kosten je Lebenswegphase (in €/FE)	114
Abbildung 22:	Gesamtkosten im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)	117

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Überwachungsmethoden und empfohlene Messintervalle für wassergemischte KSS	24
Tabelle 2:	Gegenüberstellung chemischer Konservierungsmethoden	33
Tabelle 3:	Gegenüberstellung chemisch-physikalischer Konservierungsmethoden	39
Tabelle 4:	KSS-Formulierung des betrachteten Emulsionskonzentrates	45
Tabelle 5:	Gegenüberstellung möglicher Referenzbauteile und zugehöriger Datenbasis	47
Tabelle 6:	Prozessdaten und -parameter der Fräsoperationen; v_c = Schnittgeschwindigkeit, P_F = mittlere Leistungsaufnahme der WZM während der Fräsoperation	49
Tabelle 7:	Funktionelle Einheit bezogen auf ein Produktionsszenario einer einzelnen Maschine	50
Tabelle 8:	Übersicht von Aufwendungen und Annahmen für die nachfolgend betrachteten Szenarien	55
Tabelle 11:	Annahmen für die Materialzusammensetzung der Sensorgeräte und der zusätzlichen Elektronik	62
Tabelle 12:	Inventarisierung der Daten innerhalb der Szenarien	66
Tabelle 13:	Preise der Entsorgung in allen Szenarien	79
Tabelle 14:	Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit – FE)	80

Tabelle 15:	Ergebnisse Treibhausgaspotenzial je Lebenswegphase (in kg CO ₂ -eq/FE)	82
Tabelle 16:	Kumulierter Energieaufwand (KEA) je Lebenswegphase (in MJ/FE)	88
Tabelle 17:	Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) nach KRA-Kategorien (kg/FE)	89
Tabelle 18:	Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) je Lebenswegphase (kg/FE)	91
Tabelle 19:	Wasserverbrauch je Lebenswegphase (in m ³ /FE)	94
Tabelle 20:	Flächeninanspruchnahme nach Kategorien (in m ² *a/FE)	96
Tabelle 21:	Flächeninanspruchnahme je Lebenswegphase (in m ² *a/FE)	98
Tabelle 22:	Indikatoren nach VDI 4800 Blatt 2	106
Tabelle 23:	Rohstoffkritikalitätsanalyse (Bewertungsskala von 0 bis 1)	107
Tabelle 24:	Herstellungskosten und zugeordnete Transportkosten in €/FE	109
Tabelle 25:	Kosten für die Nutzungsphase und zugeordnete Transportkosten in €/FE	110
Tabelle 26:	Kosten für Entsorgungsphase und zugeordnete Transportkosten in €/FE	112
Tabelle 27:	Gesamtvergleich des Einflusses auf die Wirkungsindikatoren für die vier Szenarien	121

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BGR	Berufsgenossenschaftliche Regeln
BPR	Biozidprodukte-Richtlinie
CNC	Computerized Numerical Control
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EP/AW	Extreme Pressure/Anti Wear
FE	Funktionelle Einheit
GWP	Global Warming Potential
KBE	Koloniebildende Einheit
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KSS	Kühlschmierstoff
MHK	Minimale Hemmkonzentration
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UV	Ultraviolett
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VE	vollentsalzt
WZM	Werkzeugmaschine

KURZFASSUNG

Die Studie untersucht Methoden zur Lebensdauererlängerung von Kühlschmierstoffen (KSS) im Zerspanungsprozess und analysiert sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte. Ziel ist es, die Ressourceneffizienz durch Maßnahmen wie die Kontrolle der mikrobiellen Belastung des Schmierstoffs zu steigern. Verschiedene Ansätze wie generelle Hygienemaßnahmen, chemische sowie chemisch-physikalische Verfahren wurden betrachtet.

In der Studie werden drei Methoden – Fremdölabscheidung, Biozidzugabe und Pasteurisierung – umfassend betrachtet und einem Referenzszenario gegenübergestellt. Eine ökologische Bewertung erfolgt über die Indikatoren des Treibhausgaspotenzials, des kumulativen Energieaufwands, des kumulativen Rohstoffaufwands, des Wasserverbrauchs und der Flächeninanspruchnahme. Die funktionelle Einheit umfasst ein produziertes Spanvolumen pro Jahr (m^3/a) für ein festgelegtes Referenzbauteil.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Fremdölabscheidung ökologisch bereits bei einer Standzeitverlängerung von drei Wochen vorteilhaft wird, wohingegen die Pasteurisierung nur unter bestimmten Bedingungen und ab einer Standzeitverlängerung von mehr als sieben Wochen ökologische Vorteile bietet.

Die ökonomische Analyse verdeutlicht, dass die Ausgaben primär von dem Verbrauch an Kühlschmier- und Reinigungsmitteln abhängen. Im Rahmen der untersuchten Szenarien führt die Reduktion dieser Verbrauchsmaterialien zu einer signifikanten Minimierung der Gesamtkosten, insbesondere im ersten Szenario der Ölabscheidung. Dieses und das zweite Szenario der Biozidzugabe gleichen die zusätzlichen Ausgaben für Ausrüstung und Messtechnik durch die Ersparnisse im Verbrauchsmaterial aus, während das dritte Szenario der Pasteurisierung aufgrund bedeutsamer Anschaffungskosten und erhöhten Stromverbrauchs letztlich Mehrkosten nach sich zieht.

Die Sensitivitätsanalyse enthüllt die Abhängigkeit der Ergebnisse von der angenommenen Standzeitverlängerung. Die Biozidzugabe und die Fremdölabscheidung schnitten ökologisch auch bei vermindert angenommener Standzeit besser ab als das Referenzszenario, während die Pasteurisierung nur bei einigen Umweltfaktoren Vorteile bot. Ökonomisch betrachtet, sind Fremdölabscheidung und Biozidzugabe ebenso bei Standardzeiten überlegen, wohingegen die Pasteurisierung nicht mit zusätzlich angenommenen Mehrkosten gerechtfertigt werden kann.

Abschließend lässt sich festhalten, dass einfache Maßnahmen wie die Nutzung von Bioziden oder die Fremdölabscheidung bereits nach kurzer Zeit zu einer Verbesserung der Umweltindikatoren und zu Kosteneinsparungen führen können. Allerdings hängt der Erfolg der Lebensdauererlängerung maßgeblich von der Effektivität der Maßnahmen und des produktionsspezifischen Kontextes ab. Die Studie bietet eine Grundlage für die Auswahl von Verfahren zur Standzeitverlängerung von KSS, betont dabei aber auch die Relevanz von Langzeitstudien zur Validierung der gewonnenen Daten und erzielten Effekte.

1 HINTERGRUND & ZIELSETZUNG

1.1 Relevanz von Kühlschmierstoffen in der Fertigungsindustrie

Steigende Energie- und Materialkosten, begrenzte Ressourcenverfügbarkeit und sich ändernde gesetzliche Vorschriften sind nur einige der zahlreichen Herausforderungen, denen sich die Fertigungsindustrie heutzutage stellen muss. Von weitgreifenden politischen Initiativen, wie dem europäischen Green Deal¹, bis zu konkreten, stetig steigenden regulatorischen Anforderungen stehen Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes vor der Herausforderung, ihre Wertschöpfungsketten und Produktionsprozesse ökologisch nachhaltig und weiterhin ökonomisch wettbewerbsfähig zu gestalten. Als wichtiger Baustein dieser Transformation gilt hierbei die Steigerung der Ressourceneffizienz. Für kleine und mittlere, aber auch großindustrielle Unternehmen ist die Transformation zu einer ökologisch nachhaltigen Produktion zwar notwendig, jedoch auch herausfordernd. Dies betrifft insbesondere produzierende Unternehmen in Deutschland, für die Investitionen in ökologisch nachhaltigere Anlagen und Prozesse weiterhin an Relevanz gewinnen.² Eine bedeutende Branche ist dabei die metallverarbeitende Industrie, die mit rund 500.000 Beschäftigten³ einen signifikanten Anteil der Wirtschaftsleistung erbringt. Hier werden u. a. häufig spanende Fertigungsverfahren zur Herstellung von Produkten und Halbzeugen eingesetzt.

In der ganzheitlichen Betrachtung des Lebenszyklus eines spanend gefertigten Werkstücks vom Rohmaterial bis zur Verwertung nimmt die Bearbeitung einen besonderen Stellenwert ein (vgl. Abbildung 1). Mit dem Einsatz von Energie sowie Betriebs- und Hilfsstoffen wird hier ein relevanter Anteil der Umweltwirkungen und Fertigungskosten verursacht. In einer

¹ Vgl. Europäische Kommission (2019).

² Vgl. Industrie- und Handelskammer (IHK) Köln (2021), S. 7.

³ Vgl. Wirtschaftsverband Stahl- und Metallbearbeitung e.V. WSM (2024).

Vielzahl spanender und umformender Metallbearbeitungsprozesse werden Kühlschmierstoffe (KSS) eingesetzt. Im tribologischen Kontakt von Werkzeug und Werkstück übernehmen sie primär die Funktion der Kühlung, Schmierung sowie der Spanabfuhr, was zu einer verbesserten Bauteilqualität sowie einer erhöhten Standzeit von Werkzeugen beiträgt. Trotz Ansätzen wie der Trockenbearbeitung oder der Minimalmengenschmierung ist die Bedeutung von KSS in der spanenden Fertigung nach wie vor groß. Während der Einsatz von KSS aus prozesstechnischer Sicht meist essenziell ist, ist er gleichzeitig mit einem hohen Ressourcenaufwand und -verbrauch verbunden.

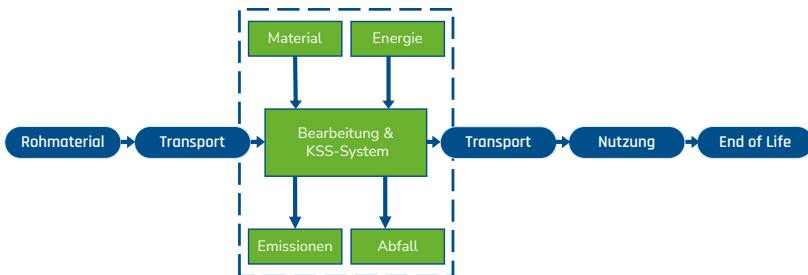


Abbildung 1: Primärer Betrachtungsrahmen der Studie im ganzheitlichen Lebenszyklus eines Werkstücks

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes lag im Jahr 2022 die Menge entsorgter Bearbeitungsfluide in Deutschland bei über 630.000 Tonnen⁴, wobei der überwiegende Teil davon auf Mineralölen sowie nichtregenerativen Zusatzstoffen basiert oder diese beinhaltet. Ein hoher Bedarf an KSS hat somit nicht nur als Kostenfaktor eine ökonomische Dimension, sondern trägt auch zu den Umweltbelastungen der metallverarbeitenden Industrie, beispielsweise während der Entsorgung, bei. Ein entscheidender Faktor ist dabei die effektive Nutzungsdauer der eingesetzten KSS, die insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) einen relevanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen der Fertigungsprozesse ausübt. Zur Bewertung des KSS-Zustandes sind geeignete Maßnahmen der

⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt (2022), Abfallschlüssel 120106-G bis 120109-G.

Zustandsüberwachung von Bedeutung, die wiederum eine Entscheidungsgrundlage für einen anstehenden KSS-Wechsel oder die Einleitung von Pflege- und Aufbereitungsmaßnahmen bilden.

Die Verlängerung der Nutzungsdauer von KSS kann ökonomisch und ökologisch vorteilhaft sein. Dabei stehen unterschiedliche Technologien und Methoden zur Standzeitverlängerung zur Verfügung, die in passive und aktive Verfahren unterteilt und entsprechend dem jeweiligen Anwendungskontext im Unternehmen ausgewählt werden können. Obwohl die Umsetzung dieser Maßnahmen die Produktivität von Unternehmen steigern könnte, werden abseits klassischer Aufbereitungsmethoden wie der Filtrierung aufgenommener Feststoffe aus dem Kreislauf oder der Fremdölabscheidung industriell eher selten weitere Maßnahmen ergriffen. Insbesondere bei KMU fehlen oftmals eine entsprechende Expertise und das notwendige Wissen über ökonomische sowie ökologische Vor- und Nachteile der möglichen Optionen. Eine Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen über den gesamten Produktionszeitraum bei der Entscheidungsfindung zur Verbesserung und Optimierung von KSS-Systemen ist in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung.

1.2 Zielsetzung

Vor dem genannten Hintergrund soll die vorliegende Studie die Optionen der KSS-Standzeitverlängerung aufzeigen, die jeweiligen Potenziale und Herausforderungen sichtbar machen und die Quantifizierung der ökologischen Auswirkungen mit den Mitteln der Ökobilanzierung ermöglichen. Unter anderem soll ermittelt werden, in welchem Verhältnis die Umweltwirkungen und Kosten von Produktionsszenarien mit standzeitverlängernden Maßnahmen im Vergleich zu Produktionsszenarien ohne Maßnahmenumsetzung stehen. Dazu werden insbesondere folgende Fragestellungen adressiert:

- (1) Welche Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von KSS stehen derzeit zur Verfügung und welche **Vorteile bzw. Hemmnisse** ergeben sich aus deren Nutzung insbesondere in Bezug auf die Ressourceneffizienz des Fertigungsprozesses?
- (2) Welche Aufwendungen an **Rohstoffen, Energie, Wasser und Fläche** müssen unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges für die Fertigung eines Referenzproduktes bei der Betrachtung ausgewählter Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von KSS aufgebracht werden?
- (3) Welche **versorgungskritischen Rohstoffe** werden bei der Fertigung des Referenzproduktes unter Betrachtung ausgewählter Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von KSS verwendet bzw. eingespart?
- (4) Welche **Treibhausgas-Emissionen**, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten, werden je Fertigungsszenario ausgestoßen?
- (5) Welche **Kosten** ergeben sich für die betrachteten Fertigungsszenarien?

Mit der Studie sollen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des metallverarbeitenden Gewerbes sowie Beratungsunternehmen und Forschungsinstitutionen eine Informationsquelle erhalten, die Unterstützung und Anleitung zur vergleichenden ökologischen und ökonomischen Bewertung von Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von Kühlschmierstoffen bietet.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Metallbearbeitung und Werkzeugmaschinen

Unter der Metallbearbeitung werden im Allgemeinen Prozesse zusammengefasst, bei denen durch mechanische, physikalische und chemische Verfahren metallische Bauteile und Komponenten gefertigt werden. Die metallbearbeitenden Verfahren werden unterteilt in verbindende (z. B. Löten, Schweißen), nichtspanende (z. B. Gießen, Walzen) sowie spanende Verfahren. Die spanenden Verfahren, welche der dritten Fertigungshauptgruppe „Trennen“ zugeordnet sind⁵, umfassen hierbei Fertigungsverfahren, bei denen durch Werkzeugschneiden Werkstückmaterial unter Erzeugung von Spänen abgetrennt wird.⁶ Die spanenden Trennverfahren werden ferner in das Spanen mit geometrisch unbestimmter bzw. Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide differenziert. Verbreitete Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide sind Schleif-, Hon- und Läppverfahren; beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide sind das Drehen, Bohren und Fräsen die bekanntesten Verfahren.

Zur Auswahl der relevantesten Bearbeitungsverfahren können Statistiken zu Werkzeugmaschinen herangezogen werden. Der Werkzeugmaschinen-sektor hat mit 20,8 Mrd. Euro (Jahr 2022) den größten Anteil am Umsatz im deutschen Maschinenbau⁷ und stellt damit einen bedeutenden wirtschaftlichen und ökologischen Einflussfaktor dar. Weit verbreitet unter den Werkzeugmaschinen sind die metallbearbeitenden Maschinen, dabei insbesondere Maschinen für die Zerspanung. Mit einem Produktionsvolumen im ökonomischen Gegenwert von ca. 7,4 Mrd. Euro kommt spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen damit ein besonders hoher Stellenwert in der deutschen Wirtschaftslandschaft zu.⁸ Dabei sind Drehmaschinen, Schleif-, Hon-, Läpp- und Poliermaschinen sowie Fräsmaschinen mit

⁵ Vgl. DIN 8580:2020-12.

⁶ Vgl. DIN 8589-0:2003-09, S. 4.

⁷ Vgl. Statistisches Bundesamt (2023).

⁸ Vgl. VDW (2023).

einem hohen Anteil vertreten. Das größte Produktionsvolumen haben Bearbeitungszentren⁹, welche wiederum Bohr-, Fräs- und Drehmaschinen kombinieren. Maschinen im Bereich der geometrisch bestimmten Zerspaltung bilden daher im Folgenden den primären Fokus der Studie.

Mit dem Einsatz von Werkzeugmaschinen sind neben dem Investitionsaufwand Betriebskosten verbunden (vgl. Abbildung 2).

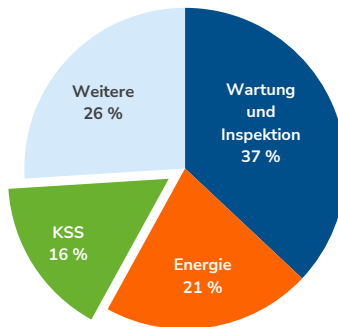


Abbildung 2: Aufteilung der Betriebskosten bei Werkzeugmaschinen¹⁰

Die drei größten Kostenfaktoren entfallen auf die Wartung und Inspektion der Maschinen (37 %), Energiekosten (21 %) sowie Kühlschmierstoff-(KSS-)Kosten (16 %).¹⁰ Die Kosten für KSS setzen sich aus Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten zusammen. Obwohl KSS einen großen Hebel für die Ressourceneffizienz im Betrieb von Werkzeugmaschinen darstellen, bleiben Potenziale aufgrund mangelnder Kenntnisse zu Möglichkeiten hinsichtlich der Zustandsüberwachung und Standzeitverlängerung industriell oft ungenutzt. Um diese Optionen zu erschließen, ist zunächst ein grundlegendes Verständnis über KSS erforderlich.

⁹ Vgl. VDW (2023).

¹⁰ Eigene Darstellung auf Basis von Statista (2023).

2.2 Kühlschmierstoffe in der Zerspantung

Bei u. a. umformenden und spanenden Metallbearbeitungsverfahren nach DIN 51385 werden Bearbeitungsmedien benötigt. Im Kontext spanender Prozesse kommen hier insbesondere KSS zum Einsatz. KSS erfüllen die Kernfunktionen der Kühlung, Schmierung und des Spantransportes.¹¹ Die beim Werkzeugeingriff entstehende Wärme wird durch das Medium aufgenommen und aus der Wirkstelle abgeführt. Gleichzeitig wird durch die Schmiereigenschaften und die damit verbundene Reduktion der Reibung der Wärmeentstehung vorgebeugt und negative Effekte, wie die Verschweißung von Rauheitsspitzen, werden vermieden. Die im Prozess anfallenden Späne werden durch den mit hohem Druck eingebrachten Volumenstrom aus der Bearbeitungszone getragen und mit dem Medium abtransportiert. Während diese drei Grundfunktionen allen KSS gemein sind, können die spezifischen Anforderungen und damit verbunden die Zusammensetzungen der Schmierstoffe je nach Anwendungsfall variieren. Nach DIN 51385 werden wassermischbare und nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe unterschieden¹² (vgl. Abbildung 3).

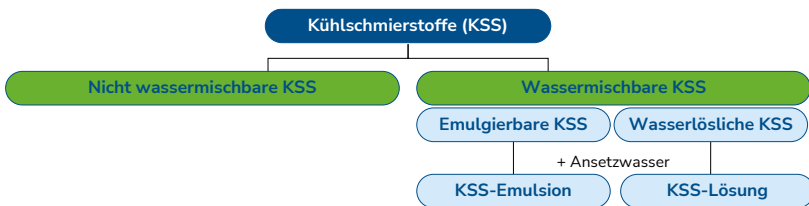


Abbildung 3: Einteilung der Kühlschmierstoffe gemäß DIN 51385¹³

Nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe bestehen aus Basisölen, die zu unterschiedlichen Anteilen mit anwendungsspezifischen Additiven versetzt werden. Diese Öle zeichnen sich durch ausgezeichnete Schmier- und

¹¹ Vgl. VDI 3397:2020-03 (Blatt 1), S. 3-4.

¹² Vgl. DIN 51385:2013-12, S. 4.

¹³ Eigene Darstellung auf Basis von DIN 51385:2013-12.

Korrosionsschutzeigenschaften aus, weisen aufgrund der niedrigen Wärmekapazität und Leitfähigkeit jedoch eine geringe Kühlleistung auf. Aus diesem Grund werden nicht wassermischbare KSS vorwiegend bei Prozessen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten eingesetzt.

Wassermischbare Kühlschmierstoffe bestehen hingegen aus einem meist ölbasierten Konzentrat, das vor der Anwendung mit Wasser gemischt wird. Grenzflächenaktive Stoffe (Emulgatoren) sorgen dafür, dass eine stabile Öl-Wasser-Emulsion entsteht. Im Falle ölfreier Basiskonzentrate sind auch vollständige Lösungen möglich. Der hohe Wasseranteil von meist über 90 % erhöht die spezifische Wärmekapazität der Schmierstoffe und sorgt für eine deutlich verbesserte Kühlleistung.¹⁴ Gleichzeitig führt der Wasseranteil zu einer Reihe unerwünschter Effekte wie Korrosionsförderung, Neigung zur Schaumbildung oder einer Anfälligkeit gegenüber Mikroorganismen, die bei der Formulierung mithilfe zusätzlicher Additivstoffe minimiert werden müssen. Wassermischbare Kühlschmierstoffe sind besonders effektiv bei Prozessen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und damit verbundener starker Wärmeentwicklung. Sie werden für ca. 90 % der spanenden Prozesse eingesetzt und sollen im Zuge dieser Studie primär betrachtet werden.¹⁵

2.3 Verschleiß von wassergemischten Kühlschmierstoffen

Kühlschmierstoffe werden in Bearbeitungsmaschinen in Kreisläufen geführt. Der wiederholte Einsatz sorgt für deutlich niedrigere Prozesskosten, zieht jedoch auch einen stetigen Verschleiß des Schmierstoffes nach sich. Bei der Bearbeitung werden sowohl feste als auch flüssige Fremdstoffe in den KSS eingetragen. Während grobe Verunreinigungen, wie Späne und Abrieb, größtenteils über geeignete Filteranlagen abgetrennt werden, kann der Eintrag von Maschinenölen, Reinigungs- und Lösemitteln oder die Verschleppung anderer KSS zu einer irreversiblen Veränderung der

¹⁴ Vgl. VDI 3397:2020-03 (Blatt 1), S. 8.

¹⁵ Vgl. Tang, L., et al. (2022), S. 1.

Fluideigenschaften führen.¹⁶ Darüber hinaus kann es bei Langzeitanwendungen unter hohen Temperaturbelastungen zu kumulativen Oxidations- und Zersetzungserscheinungen kommen. Im Falle wassermischbarer KSS treten zudem weitere Effekte, wie die Aufkonzentration durch Verdunstung sowie Ansiedlung und Wachstum von Mikroorganismen, auf. Letzteres hat einen besonders hohen Einfluss auf die Standzeit des Kühlschmierstoffes.¹⁷

Wassergemischte KSS bilden aufgrund ihres hohen Wassergehalts sowie der Additivstoffe mit biologisch verwertbareren Spurenelementen einen idealen Nährboden für das Wachstum von Bakterien oder Pilzen. Über das Ansetzwasser sowie unerwünschte Einträge durch Werkstückoberflächen und Bedienende, beispielsweise beim Rüsten oder Bauteilwechsel, gelangen Organismen in das KSS-System, wo sich diese rasch vermehren und zu einer Reihe operativer Einschränkungen führen. Durch die Verstoffwechslung von Inhaltsstoffen wie Emulgatoren oder Leistungsadditiven werden die Stabilität und technische Qualität des Schmierstoffes gestört. Die Bildung von Pilzgeflechten sowie Biofilmen führt zu Ablagerungen in Leitungssystemen, Pumpen und Filteranlagen. Auch eine erhöhte Neigung zur Schaumbildung kann die Kühl- und Schmiereigenschaften verschlechtern.¹⁸ Gleichzeitig geht von einer mikrobiellen Kontamination eine Gefahr für die Bedienenden aus. Neben der Ansiedlung von Krankheitserregern stellen durch Mikroorganismen produzierte und über Hautkontakt oder Aerosole aufgenommene Endo- und Exotoxine ein wesentliches Gesundheitsrisiko dar.¹⁹ Um diesen Effekten entgegenzuwirken, werden wassermischbare Konzentrate in der Regel mit Bioziden versetzt, die eine mikrobielle Ausbreitung im angemischten Fluid verlangsamen, das Wachstum jedoch nicht vollständig unterdrücken können. In der Praxis müssen Kühl-

¹⁶ Vgl. Baumann Mineralölvertrieb (2019), S. 8.

¹⁷ Vgl. Koch, T. (2015), S. 31–33.

¹⁸ Vgl. Tang, L., et al. (2022), S. 4.

¹⁹ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2009), S. 24.

schmierstoffe daher in regelmäßigen Abständen vollständig erneuert werden. Die notwendigen Wechselintervalle können je nach Prozessanforderungen und Auslastung zwischen wenigen Wochen und mehreren Monaten variieren.²⁰ Jeder Wechsel ist jedoch mit einem hohen ökonomischen wie auch ökologischen Aufwand verbunden.

Entsprechend der Zuordnung des Europäischen Abfallverzeichnisses (AVV) werden verbrauchte KSS als gefährliche Abfälle eingestuft und unterliegen der gesetzlichen Nachweispflicht.²¹ Eine Vielzahl der Inhaltsstoffe gilt als toxisch und gewässergefährdend und eine sachgemäße Entsorgung gestaltet sich entsprechend aufwändig und teuer. Insbesondere die Abscheidung der Wasserphase von Additiven und Ölbestandteilen ist energieintensiv und damit ökonomisch sowie ökologisch relevant. Hinzu kommen Stillstandzeiten der Anlagen während Wechsel und Reinigung sowie der Ressourcenaufwand, der sich aus der Neuproduktion der häufig überwiegend mineralölbasierten Schmierstoffe ergibt. In Anbetracht dessen ist es nicht nur im Sinne der Nachhaltigkeit, sondern auch des Anlagenbetreibers notwendig, die Einsatzdauer des Kühlschmierstoffes unter Beibehaltung der technischen Leistungsfähigkeit zu maximieren. Dazu sind geeignete Überwachungs- und Pflegemaßnahmen erforderlich, die dem primären Verschleißfaktor der mikrobiellen Kontamination entgegenwirken.

2.4 Überwachung von KSS-Zuständen

Der engmaschigen Überwachung von Kühlschmierstoffsystemen kommt in der Praxis eine immer größer werdende Bedeutung zu. Der ständige Abgleich des aktuellen KSS-Zustandes mit den festgelegten Sollwerten bietet nicht nur eine vollständige Transparenz über die Anwendung des KSS, dieser Vergleich kann ebenso bei der Antizipation von Problemen oder

²⁰ Vgl. Benedicto, E., et al. (2017), S. 108.

²¹ Vgl. VDI 3397:2016 Blatt 3, S. 3.

Fehlzuständen unterstützen.²² Dabei ist die grundsätzliche Form der Überwachung des KSS-Zustandes zunächst nicht relevant. Denkbare Varianten reichen von arbeitsintensiven Methoden, wie der regelmäßigen Überwachung mithilfe pH-Teststreifen oder Dip-Slides, bis hin zu Echtzeitlösungen, die den Zustand des KSS durchgehend automatisiert aufzeichnen und dokumentiert ablegen.^{23,24} Bei der Analyse sind jedoch die unterschiedlichen Arten von Kühlschmierstoffen zu unterscheiden (vgl. Kapitel 2.2). Für die Handhabung von Kühlschmierstoffen in der gewerblichen Anwendung existieren eine Reihe von Richtlinien und gesetzlichen Rahmenbedingungen, die einer unsachgemäßen Verwendung und den daraus resultierenden negativen Auswirkungen auf den Prozess und die Bedienenden vorbeugen. Diese Richtlinien, wie bspw. die VDI-Richtlinie 3397, TRGS 611 oder DGUV (Deutsche gesetzliche Unfallversicherung) Regel 109-003, geben Anhaltspunkte für die Überwachung des Allgemeinzustandes unterschiedlicher KSS und können auch bei der Entwicklung ganzheitlicher Echtzeitüberwachungssysteme unterstützen.^{25,26,27}

Basierend auf den Angaben und Empfehlungen der Richtlinien sind in Tabelle 1 einige der wichtigsten Zustandsindikatoren und deren Messmethoden sowie empfohlene Prüfintervalle abgebildet.

²² Vgl. Iowa Waste Reduction Center (2003), S. 1.

²³ Vgl. Myshkin, N. K.; Markova, Liubou V. (2018), S. 2-12.

²⁴ Vgl. Jurina, F., et al. (2023), S. 3.

²⁵ Vgl. VDI 3397:2020-03 (Blatt 2).

²⁶ Vgl. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2007).

²⁷ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2011).

Tabelle 1: Überwachungsmethoden und empfohlene Messintervalle für wassergemischte KSS, Zusammenstellung basierend auf VDI 3379, TRGS 611, BGR/GUV-R 143

Abweichungen	Methode	Intervall
Aussehen, Geruch und Färbung	- Sensorische Methoden	Wöchentlich
pH-Wert	- Elektrochemische Messung - pH-Messstäbchen	Wöchentlich
KSS-Konzentration	- Messung mit Refraktometer - Spaltung mit Säure - Tensidtitration und acidimetrische Titration - Teststäbchen	Wöchentlich
Nitritgehalt	- Teststäbchen - Fotometrie	Wöchentlich
Fluidtemperatur	- Thermometer	Nach Bedarf
Füllstand	- Schwimmerschalter, Schauglas	Nach Bedarf
Fremdöl	- Standtest im Messzylinder - Säulenchromatografie	Nach Bedarf
Korrosion	- Filter-Späne-Test - Plattentest nach Herbert	Nach Bedarf
Feste Fremdstoffe	- Membranfilterverfahren	Nach Bedarf
Keimzahl (Bakterien und Pilze)	- Eintauchnährböden (Dip-Slide) - Ausimpfen auf Nährböden	Nach Bedarf
Biozidkonzentration	- Fotometrie - Chromatografie	Nach Bedarf
Elektrolytgehalt	- Messung der Leitfähigkeit	Nach Bedarf
Gesamthärte	- Teststäbchen - Komplexometrische Titration	Nach Bedarf
Chloridgehalt	- Titration argentometrisch - Inductively Coupled Plasma (ICP)-Messung	Nach Bedarf

Welche konkreten Messwerte für die Indikatoren einzuhalten sind, hängt in starkem Maße von der Beschaffenheit und vor allem den Inhaltsstoffen des verwendeten KSS ab. Daher ist bei der Bewertung von Messergebnissen stets der Ausgangszustand des jeweiligen KSS zu berücksichtigen. Die Analyse der KSS-Beprobung kann je nach Messmethode direkt vor Ort oder in einem spezialisierten Labor stattfinden, sollte jedoch in jedem Fall in Abstimmung mit dem Herstellenden und durch Fachpersonal geschehen.²⁸ Im Zusammenhang mit der dauerhaften Überwachung des KSS, sind die Prüfintervalle aus Tabelle 1 ein Indiz für den einzubringenden Aufwand am System. Dem Prüfintervall entsprechend sind besonders die wöchentlich zu prüfenden Kennwerte von Bedeutung, um ein Umkippen des KSS rechtzeitig zu erkennen und ggf. zu verhindern. Einige der Messwerte können in kritischen Systemen teilweise auch täglich zu prüfen sein. Im Folgenden soll auf diese Messparameter näher eingegangen werden.

Aussehen, Geruch und Färbung

Die Abweichung von Aussehen, Geruch und Färbung gehört zu den allgemeinen Zustandsinformationen eines KSS. Bei ausreichender Erfahrung bezogen auf die visuelle und olfaktorische Beurteilung dieser Zustände können deren zugrundeliegende Ursachen direkt festgestellt und schnell behoben werden. In der Regel sollte sich bei wassermischbaren Fluiden die Farbe nicht wesentlich von einem frisch gemischten KSS unterscheiden. Die Färbung sollte weiß-gelblich und die Trübung transparent bis leicht milchig sein. Starke Einfärbungen stellen einen Indikator für Verunreinigungen dar. So deuten bspw. braune Verfärbungen auf gelöstes Eisen, graue auf ein erhöhtes mikrobiologisches Wachstum oder blaue auf gelöstes Kupfer hin. Auch eine Änderung der Dispersität z. B. auf Grund von Fremdöleinträgen oder einer mikrobiellen Zersetzung von Emulgatoren kann äußerlich durch die Änderung der Trübung oder durch eine oberflächliche Ölphasenbildung erkennbar sein. Einen weiteren allgemeinen Zustandsfaktor bildet der Geruch des Fluids. Dieser steht meist in direkter

²⁸ Vgl. VDI 3397:2020-03 (Blatt 2), S. 7.

Korrelation mit der Färbung. Fauliger Geruch kann so ebenfalls auf einen erhöhten mikrobiologischen Befall hindeuten.²⁹

pH-Wert

Der pH-Wert lässt im Gegensatz zur Beurteilung des Aussehens eine quantifizierte Einordnung des Fluidzustandes zu. Die empfohlene Toleranz des pH-Wertes bewegt sich in der Regel um den Faktor 9 im leicht alkalischen Bereich.³⁰ Dabei liegt die Breite des Toleranzbereiches in der Regel zwischen 8,5 – 9,4.³¹ pH-Werte deutlich unter 8,7 weisen auf größere Bakterien- und Pilzbelastungen hin und können sich auf Dauer negativ auf die Emulsionsstabilität und Leistungsfähigkeit des Korrosionsschutzes auswirken. Dagegen kann ein zum Ausgangszustand deutlich erhöhter pH-Wert bei häufigem Kontakt zu Hautunverträglichkeiten wie Reizungen und Entfettung führen.³² Messbar ist der pH-Wert mit Messmitteln verschiedener Komplexität. pH-Papiermessstreifen sind das einfachste und günstigste Mittel, wobei diese sich nicht zur kontinuierlichen Messung in Messsysteme integrieren lassen. Präzisere und bewährte Messmittel stellen pH-Messgeräte dar, die analoge oder digitale Signale ausgeben bzw. über einen längeren Zeitraum erfassen und speichern können.³³ Hierfür können sowohl mobile Handheld-Geräte als auch maschinenintegrierte und echtzeitfähige Inline-Lösungen angewendet werden. Für die ausgeweitete Messung von Maschinenparks sind dabei weitestgehend automatisierte Lösungen zu bevorzugen.^{34,35,36}

²⁹ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017a), S. 15-16.

³⁰ Vgl. Astakhov, V. P., et al. (2012), S. 329

³¹ Vgl. Iowa Waste Reduction Center (2003), S. 28.

³² Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2011), S. 22.

³³ Vgl. Astakhov, V. P., et al. (2012), S. 330.

³⁴ Vgl. Güth, F., et al. (2015), S. 153.

³⁵ Vgl. Gerulová, K., et al. (2016), S. 28.

³⁶ Vgl. Peterka, J. et. al. (2023), S. 3.

KSS-Konzentration

Die Konzentration des KSS, also das Verhältnis von Wasser zu KSS-Konzentrat, sollte ebenfalls mindestens wöchentlich kontrolliert werden. Abweichungen in der Konzentration können beispielsweise durch Fremddöleinträge, Verdunstungsverluste oder eine kontinuierliche Ausschleppung über ausgefilterte Späne hervorgerufen werden. Die Messung der Konzentration kann manuell, mithilfe tragbarer Refraktometer oder automatisiert anhand prozessintegrierbarer digitaler Messgeräte erfolgen.³⁷ Die Konzentration des Fluids steht in direktem Zusammenhang mit der Bearbeitungsqualität des Zerspanungsprozesses. Zu geringe Konzentrationen minimieren die Prozessstabilität, wohingegen eine Abweichung von mehr als 20 % über der Standardkonzentration eine unerwünschte Bildung von Gelen und Schäumen zur Folge haben kann.³⁸

Fluidtemperatur und -füllstand

Zwei Parameter, deren regelmäßige Kontrolle nicht durch Richtlinien vorgeschrieben wird, aber in ganzheitlichen Messsystemen dennoch erfasst werden sollten, sind die Fluidtemperatur und der Füllstand. Beide stellen wichtige operationelle Größen dar, deren Überwachung das Eintreten unerwünschter Betriebszustände verhindert. Dazu gehören das Ansaugen von Luft bei zu niedrigem Füllstand oder die verminderte Kühlwirkung bei hohen Fluidtemperaturen. Da die Temperatur auch einen direkten Einfluss auf das mikrobielle Wachstum im KSS-Tank ausübt, ist deren Überwachung im Kontext einer Standzeitbetrachtung von zusätzlichem Interesse. Die Messung kann beispielsweise mithilfe von Temperaturmesssonden direkt im Tank erfolgen. Im Fall des Füllstandes können Parameter optisch oder mit Schwimmern erfasst werden.^{39,40}

³⁷ Vgl. Astakhov, V. P., et al. (2012), S. 331.

³⁸ Vgl. Peterka, J. et. al. (2023), S. 2.

³⁹ Vgl. Peterka, J. et. al. (2023), S. 2-3.

⁴⁰ Vgl. Jurina, F., et al. (2023), S. 3.

2.5 Standzeitverlängernde Maßnahmen bei KSS

Wassermischbare Kühlschmierstoffe können durch zahlreiche Alterungs- und Verschleißmechanismen während der Anwendung in ihren Eigenschaften verändert werden (vgl. Abschnitt 2.3). Sind die geforderten Leistungs- oder Arbeitssicherheitsgrenzen unterschritten, muss der Kühlschmierstoff erneuert werden. Das Intervall zwischen zwei Wechseln wird dabei als Standzeit bezeichnet. Die individuelle Standzeit eines KSS hängt im starken Maße von der Produktqualität und dem jeweiligen Bearbeitungsprozess ab, kann aber durch geeignete Pflegemaßnahmen zusätzlich verlängert werden. Als einer der Hauptgründe für den Leistungsabfall und die Anwendergefährdung fokussiert sich diese standzeitverlängernde Maßnahme in der Regel auf die Kontrolle der mikrobiellen Belastung des Schmierstoffes (Konservierung).^{41,42} Diese Konservierung verfolgt das Ziel ein „gegebenes Produkt oder Medium über einen genügend langen Zeitraum bei den vorhandenen ortsüblichen Bedingungen vor mikrobiell bedingter Materialzerstörung zu schützen“⁴³. Ein vollständig keimfreier bzw. steriler Kühlschmierstoff im Produktionsumfeld ist in diesem Zusammenhang jedoch weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll und wird auch als nicht realistisch umsetzbar angesehen.⁴⁴ Ziel ist es vielmehr, mit geeigneten Maßnahmen und Eingriffen während des Betriebs das Wachstum von Bakterien, Pilzen und Hefen in KSS und KSS-Anlagen über einen langen Zeitraum auf einem möglichst niedrigen Niveau zu halten. Gemäß der VDI Richtlinie 3397, Blatt 4 unterteilen sich die Maßnahmen zur langfristigen Minimierung mikrobiellen Wachstums in allgemeine Hygienemaßnahmen sowie chemische und physikalische Konservierungsmaßnahmen. Auf diese Kategorien soll im Folgenden näher eingegangen werden.

⁴¹ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4).

⁴² Vgl. Fraunhofer IGB (2023).

⁴³ Koch, T. (2015), S. 69.

⁴⁴ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 6.

2.5.1 Allgemeine Hygienemaßnahmen

Damit die mikrobielle Belastung im Kühlschmierstoffsystem über einen möglichst langen Zeitraum konstant niedrig gehalten werden kann, sind bereits bei der Befüllung erste Hygienemaßnahmen sinnvoll. So sollte die Anlage vor der Neubefüllung sowohl manuell als auch chemisch gereinigt und desinfiziert werden.⁴⁵ Eine gründliche Entfernung verbliebener und belasteter KSS-Restbestandteile stellt die Grundvoraussetzung dar, um eine rasche Rekontamination der frischen Emulsion zu verhindern. Eine mechanische Reinigung gut zugänglicher Stellen sollte stets mit einer chemischen Desinfektion kombiniert werden, um auch schwer und unzugängliche Stellen zu desinfizieren.⁴⁶

Insbesondere Rohrleitungen und Totzonen mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit neigen zur Bildung resistenter, konglomerierter Mikroorganismen, sogenannter Biofilme, die bei nicht ausreichender Entfernung ein permanentes Rekontaminationspotenzial darstellen.⁴⁷ In der Praxis werden hierfür spezielle Systemreiniger angewendet, die mithilfe von Emulgatoren Ölreste binden und über chemische Mikrobiozide verbleibende Organismen abtöten. In der Praxis hat sich dabei folgende Vorgehensweise bewährt:⁴⁸

- Systemreiniger zu gebrauchtem KSS begeben
- System 8 bis 24 h umpumpen
- KSS absaugen
- Tanks und Späneförderer mechanisch reinigen
- Mit frischer Emulsion spülen
- KSS absaugen
- System mit frischer Emulsion befüllen

⁴⁵ Vgl. Koch, T. (2015), S. 63-64.

⁴⁶ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b), S. 11.

⁴⁷ Vgl. Koch, T. (2015), S. 32.

⁴⁸ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b), S. 11.

Bei der Neuansetzung ist auf die Verwendung von Ansetzwasser geeigneter mikrobiologischer Qualität zu achten. In der Regel empfiehlt sich hierfür die Verwendung von Leitungswasser in Trinkwasserqualität.⁴⁹ Dieses ist behördlich kontrolliert und muss eine Keimzahl von weniger als 100 Koloniebildenden Einheiten (KBE) pro ml aufweisen. Behandeltes Wasser z. B. aus Enthärtungs- oder Osmoseanlagen (Osmose-/VE-Wasser) kann je nach Anlagenzustand mikrobiell stärker belastet sein als Trinkwasser und sollte daher nur nach vorheriger Prüfung eingesetzt werden.⁵⁰ Eine Bevorratung von Ansetzwasser oder angemischten Emulsionen sollte weitestgehend vermieden werden.⁵¹

2.5.2 Chemische Konservierungsmaßnahmen

Da trotz ausgiebiger Hygienemaßnahmen eine Besiedlung des KSS mit Mikroorganismen in der Praxis nicht auszuschließen ist, werden die meisten KSS-Konzentrate mit chemischen Konservierungsmitteln versetzt, um eine Neubesiedelung zu verlangsamen. Hierbei kann zwischen klassischen Konzepten wie dem Einsatz von Bioziden oder neuartigen bzw. experimentellen Maßnahmen wie dem Einsatz von Ozon unterschieden werden.

Biostatika und Biozide

Die gängigste Form der chemischen Konservierung ist die Behandlung mithilfe von Biostatika und/oder Bioziden. Während Biostatika Wachstum und Ausbreitung von Mikroorganismen hemmen, üben Biozide eine abtötende Wirkung auf enthaltene Organismen aus.⁵² Je nach Zielrichtung werden die Stoffe weiterhin in Bakterizide (Wirkung auf Bakterien) und Fungizide (Wirkung auf Pilze) differenziert.⁵³ In der Praxis kommen meist Kom-

⁴⁹ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 7.

⁵⁰ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 7.

⁵¹ Vgl. Koch, T. (2015), S. 64.

⁵² Vgl. Koch, T. (2015), S. 69-70.

⁵³ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b), S. 11.

bipräparate zum Einsatz, um ein möglichst breites Spektrum an Mikroorganismen zu bekämpfen.⁵⁴ Für den Einsatz in wassergemischten Kühlschmierstoffen müssen die Stoffe eine möglichst hohe Temperaturstabilität aufweisen, sollten die technischen Eigenschaften des Schmierstoffes nicht negativ beeinflussen und dürfen insbesondere keine Nebenwirkungen auf die Bedienenden der Maschine ausüben.

Die Anforderungen an den Anwenderschutz begrenzen hierbei die maximale Konzentration der meist gesundheitsgefährdenden Stoffe drastisch.⁵⁵ Hinzu kommt, dass die Präventiv- bzw. Vorkonservierung des KSS-Konzentrats nur einen zeitlich begrenzten Schutz bietet, dessen Dauer je nach Umwelt und Rahmenbedingungen stark variieren kann. Gründe für ein Nachlassen der Schutzwirkung können ein Abbau der chemisch wirksamen Stoffe, ungeeignete Rahmenbedingungen wie ein zu niedriger pH-Wert oder eine Adaption bzw. Resistenzbildung des Mikrobioms gegenüber den Biozidwirkstoffen sein.⁵⁶

Um einer zu starken Ausbreitung der Organismen nach Verbrauch der Vorkonservierung entgegenzuwirken, kann der Anlage frisches Biozid entweder kontinuierlich nachdosiert oder in regelmäßigen Abständen eine Stoßkonservierung mit dem gleichen oder im Fall von Resistenzbildung einem alternativen Wirkstoff durchgeführt werden. Eine Nachkonservierung ist jedoch ausschließlich von geschultem Personal unter der Anwendung geeigneter Schutzmaßnahmen auszuführen. Eine Überschreitung der maximal zulässigen Konzentration muss durch eine geeignete Dokumentation und ggf. regelmäßige Messung der tatsächlichen Konzentration vermieden werden.

⁵⁴ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b), S. 11.

⁵⁵ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2024).

⁵⁶ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 23-25.

Es hat sich zudem gezeigt, dass sich aufgrund der Konzentrationsgrenzen die Zellzahlen langfristig trotz regelmäßiger Auffrischung auf ein kontinuierlich hohes Niveau einpendeln können, so dass ein KSS-Wechsel nicht beliebig hinausgezögert werden kann.⁵⁷

Ozonbehandlung

Eine in der Literatur diskutierte alternative Methode der chemischen Konservierung stellt der Einsatz von Ozon dar. Anders als bei Bioziden wird das Ozon dem Kühlschmierstoff nicht zugegeben, sondern durch Elektrolyse direkt im Tank produziert. Das Ozon führt zu einer Oxidation organischer Verbindungen und dadurch zur Abtötung der Mikroorganismen.⁵⁸ Die Wirksamkeit dieser Behandlung konnte in mehreren Studien erfolgreich nachgewiesen werden.⁵⁹ Die Ozonmoleküle konnten in den Untersuchungen jedoch auch zur Oxidation anderer KSS-Bestandteile führen und damit die technischen Eigenschaften des Kühlschmierstoffs ggf. negativ beeinflussen. Eine breite praktische Umsetzung der Ozonbehandlung für KSS-Systeme blieb bis auf wenige Einzelanwendungen bisher aus.⁶⁰

Ein Überblick über die Vor- und Nachteile der genannten chemischen Verfahren zur Standzeitverlängerung ist nachfolgend in Tabelle 2 gegeben.

⁵⁷ Vgl. Koch, T. (2015), S. 72.

⁵⁸ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 39.

⁵⁹ Vgl. Madanchi, N., et al. (2017a).

⁶⁰ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), S. 3.

Tabelle 2: Gegenüberstellung chemischer Konservierungsmethoden⁶¹

Maßnahme	Vorteile	Nachteile	Industrielle Anwendung
Biozid Präventiv	<ul style="list-style-type: none"> - Bewährtes Verfahren - Keine Handhabung von Konzentraten beim Anwendenden - Wirkt auch auf Biofilme 	<ul style="list-style-type: none"> - Wirkungsdauer begrenzt - Max. Konzentration begrenzt - Umweltschädlich 	Bei vielen wasser-gemischten KSS Stand der Technik
Biozid Nachdosierung	<ul style="list-style-type: none"> - Bedarfsgerechte Dosierung - Gleichbleibende KSS-Qualität - Wirkt auch auf Biofilme 	<ul style="list-style-type: none"> - Langfristig Ausbildung von Resistenzen möglich - Anwendergefährdung - Ggf. Analysen zur Konzentrationsbestimmung nötig 	Stoßkonservierung industriell üblich
Ozon	<ul style="list-style-type: none"> - Bewährt zur Desinfektion von Trinkwasser - Ozongenerator kann direkt in den Tank eingebracht werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Schädigung des KSS möglich - Keine Wirkung auf Biofilme 	Bisher kein Nachweis über realen Einsatz

2.5.3 Chemisch-Physikalische Konservierungsmaßnahmen

Aufgrund ihres Gefährdungspotenzials für Mensch und Umwelt stehen chemische Konservierungsverfahren immer wieder in der Kritik. Dies zeigt sich nicht zuletzt in der EU Biozidverordnung (BPR, Verordnung (EU) Nr. 528/2012), mit der die Anzahl einsetzbarer Biozide stark eingeschränkt wurde. Aus diesem Grund versuchen Herstellende seit Jahren, alternative chemisch-physikalische Verfahren zur Reduktion mikrobieller Belastung in Kühlschmierstoffen zu entwickeln. Einen Überblick der derzeit relevantesten Verfahren gibt die DGUV-Information FB-HM-044.

⁶¹ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b); Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung(2020); VDI 3397:2020-06 (Blatt 4); Madanchi, N., et al. (2017a) sowie Ma, S., et al. (2018).

Demnach werden vier Verfahrensansätze unterschieden:⁶²

1. UV-Behandlung
2. Ultraschallbehandlung
3. Pasteurisierung
4. Einsatz antimikrobieller Metalle

Zu den genannten Verfahren soll im Folgenden zudem die Fremdölab-scheidung den physikalischen Konservierungsmaßnahmen zugeordnet und erörtert werden, auch wenn ihr Anwendungsbereich nicht ausschließ-lich in der Bekämpfung mikrobieller Belastungen liegt.

UV-Behandlung

Die UV-Behandlung ist ein bekanntes Verfahren aus der Wasseraufberei-tung. Durch eine Bestrahlung mit ultraviolettem Licht im Wellenlängen-bereich von 250 bis 270 nm wird das Erbgut von Mikroorganismen irrepa-rabel geschädigt, was zu einer Wachstumshemmung bis hin zur Abtötung der Organismen führt.⁶³ Für die UV-Entkeimung von Kühlschmierstoffen sind verschiedene Systeme am Markt erhältlich.

Entscheidend für den erfolgreichen Einsatz der UV-Bestrahlung ist die Ein-dringtiefe der Strahlung in die Flüssigkeit. Aufgrund der KSS eigenen Trü-bung können nur wenige Millimeter Flüssigkeit effektiv behandelt werden. Der Aufbau der Anlagen erfolgt daher meist als dünner Spalt, durch den kontinuierlich ein KSS-Bypass geleitet wird. Das Verfahren hat sich als ef-fektiv bei geringen Keimbelastungen erwiesen, der enge Durchfluss und die Anfälligkeit gegenüber Verschmutzungen begrenzen jedoch bislang die praktische Anwendung.⁶⁴ Durch die lokale Wirkung der UV-Strahlung

⁶² Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), S. 1.

⁶³ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), S. 2.

⁶⁴ Vgl. Koch, T. (2015), S. 66.

kann ein Einfluss auf Biofilme mit diesem Verfahren zudem nicht erreicht werden.⁶⁵

Ultraschallbehandlung

Ein weiteres Verfahren, um die Keimbelastung in Flüssigkeiten zu reduzieren, ist die Behandlung mit Ultraschall. Durch hochfrequente Schwingungen und die dadurch erzeugten Kavitationsblasen kann die Zellmembran der Organismen aufgebrochen und die Zellen können somit zerstört werden. Das Verfahren ist eine bewährte Methode zum Zellaufschluss in Laboranwendungen. Für den Einsatz in Kühlschmierstoffsystemen können Ultraschallgeber in den Schmierstoff eingebracht werden.⁶⁶

Da die Wirkung mit dem Abstand zur Schallquelle stark abnimmt, empfiehlt sich auch hier eine Anwendung als Bypass zur kontinuierlichen Behandlung kleinerer Volumina. Bisweilen existieren nur wenige eigenständige Ultraschallsysteme zur Behandlung von KSS, das Verfahren kann aber mit anderen Ansätzen wie der UV-Behandlung gekoppelt werden.^{67,68} Zusätzlich können mit geeigneten Ultraschallanlagen auch Biofilme im Rohrleitungs- und Tanksystem reduziert werden. Die Oberfläche wird hierzu durch Aktuatoren kontinuierlich mit Ultraschallwellen niedriger Frequenz und Energie beaufschlagt, was die Anhaftung und das Wachstum von Mikroorganismen minimieren kann.⁶⁹ Die Technologie findet unter anderem in Trinkwassersystemen Anwendung und ist auf KSS-Systeme übertragbar.⁷⁰

⁶⁵ Vgl. Koch, T. (2015), S. 66.

⁶⁶ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), S. 2-3.

⁶⁷ Vgl. Koch, T. (2015), S. 66-67.

⁶⁸ Vgl. Environmental Systems GmbH (2017).

⁶⁹ Vgl. Mathieu, L., et al. (2019).

⁷⁰ Vgl. KHS (2024).

Pasteurisierung

Eine in der Lebensmittelindustrie bewährte Methode zur Entkeimung von Fluiden ist die kurzzeitige Erwärmung, auch Pasteurisierung genannt. Durch Erhitzung und etwa 5- bis 10-minütiges Halten bei einer Temperatur von ca. 70 bis 100 °C werden nahezu alle vegetativen Zellen abgetötet.⁷¹ Da resistente Sporen den Prozess jedoch teilweise überleben und nach der Behandlung zu einer Wiederverkeimung führen können, wird bei dem Verfahren auch von einer Teilentkeimung gesprochen.

Für KSS-Anlagen existieren verschiedene Konzepte, eine Pasteurisierung zu implementieren. Bei Bypass-Lösungen wird kontinuierlich ein Teil des Fluidvolumens nach der Bearbeitung in einem Durchlauferhitzer auf Desinfektionstemperatur gebracht und anschließend dem Tank wieder zugeführt.⁷² Der Vorteil liegt darin, dass das geringere Fluidvolumen leichter erhitzt und anschließend schneller heruntergekühlt werden kann, was die Temperaturbelastung für den KSS auf ein Minimum beschränkt. Gleichzeitig ist eine vollständige Desinfektion des gesamten Tankvolumens nur bei ausreichender Laufzeit gewährleistet. Sollte eine Pasteurisierung im laufenden Betrieb der Maschine durchgeführt werden, muss zudem darauf geachtet werden, die Kühlleistung des Schmierstoffes durch den Wärmeinput nicht zu stark zu beeinflussen.⁷³ Eine zweite Möglichkeit ist die Pasteurisierung des gesamten KSS-Tanks. Hierbei wird das Tankvolumen vollständig über 60 °C erhitzt und bei aktivem Pumpen zirkuliert.

Das Verfahren garantiert eine gleichzeitige Entkeimung des gesamten KSS-Systems, setzt den Schmierstoff aufgrund der langen Aufheiz- und Auskühlphasen aber einer deutlich höheren Temperaturbelastung aus. Bei allen Arten der Pasteurisierung ist langfristig eine Verdunstung von Bestandteilen mit niedrigem Siedepunkt, insbesondere dem enthaltenen

⁷¹ Vgl. Koch, T. (2015), S. 68.

⁷² Vgl. ph-cleantec GmbH (2021).

⁷³ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), S. 3.

Wasser, zu beobachten. Diese muss durch regelmäßige Konzentrationsmessungen und ggf. Zugabe von Ansetzwasser ausgeglichen werden. Zudem kann es, je nach Zusammensetzung, zu einer Beeinträchtigung temperatursensibler KSS-Bestandteile kommen.⁷⁴

Einsatz antimikrobieller Metalle

Metalle wie Silber, Kupfer und Zink besitzen antimikrobielle Eigenschaften. Ihre hochreaktiven Metallionen können sich an Zellwänden von Mikroorganismen binden und dort lebenswichtige Prozesse verhindern.⁷⁵ In KSS-Anlagen können die Metalle entweder als Nanopartikel direkt dem Fluid beigemischt oder als Oberflächenbeschichtung eingesetzt werden.⁷⁶ Letzteres kann in Regionen geringer Strömungsgeschwindigkeiten die Ansiedelung von Biofilmen deutlich erschweren. Für die praktische KSS-Anwendung außerhalb von Laborversuchen liegen bisher kaum dokumentierte Erfahrungen vor, es ist jedoch davon auszugehen, dass der Einsatz antimikrobieller Metalle nur in Kombination mit anderen Verfahren oder bei Bedarf an lokalen Hotspots (Regionen starker Biofilmbildung) sinnvoll ist.⁷⁷

Fremdölabscheidung

Im Betrieb ist ein Eintrag von Fremdölen wie Spindel- und Hydraulikölen, Bettbahnölen oder Korrosionsschutzölen in das KSS-System unvermeidlich. Nicht emulgierte Ölbestandteile können im KSS-Behälter auf der Oberfläche aufschwimmen und einen luftdichten Ölfilm bilden. In Folge ist der Sauerstoffaustausch des darunterliegenden Fluids behindert, was in einer raschen Verbreitung anaerober Bakterien resultieren kann.⁷⁸ Um die-

⁷⁴ Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 39

⁷⁵ Vgl. Fraunhofer FEP (2005).

⁷⁶ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), S. 3-4.

⁷⁷ Vgl. Koch, T. (2015), S. 68-69.

⁷⁸ Vgl. helcotec Chemie u. Technik GmbH (2023b).

sem Effekt entgegenzuwirken, können Abscheider bzw. Skimmer eingesetzt werden. Die Wirkungsweise beruht auf der Adhäsion von Ölpartikeln an ausgewählten Haftmaterialien.⁷⁹ Aufschwimmende Ölpartikel können so beispielsweise durch in den Tank eingebrachte rotierende Scheiben von der Oberfläche abgeschöpft und anschließend in Sedimentationsbecken vom KSS getrennt werden.

Häufig verfügen die Systeme zusätzlich über Impeller, um für eine zusätzliche Umwälzung und Belüftung des Tankvolumens zu sorgen.⁸⁰ Skimmer sind industriell weit verbreitet und bieten eine gängige und kostengünstige Methode der Fremdölabscheidung.⁸¹ Ihre tatsächlichen Auswirkungen auf das mikrobielle Wachstum sind bisher jedoch wissenschaftlich wenig untersucht.

Die Vor- und Nachteile der beschriebenen chemisch-physikalischen Konservierungsverfahren sind abschließend in Tabelle 3 zusammengefasst. Allen Verfahren gemein ist, dass sie wie auch die chemischen Verfahren eine mikrobielle Schädigung des Kühlschmierstoffes nicht dauerhaft unterbinden können. Die meisten Verfahren können nach aktuellem Kenntnisstand die konventionelle Biozidbehandlung zudem nicht vollständig ersetzen und werden daher in der Regel zur Standzeitverlängerung komplementär zu einer Präventivkonservierung eingesetzt.⁸²

Voraussetzung für jede betriebliche Anwendung sollte eine Prüfung sein, ob die Methode tatsächlich wirksam ist und die KSS-Bestandteile nicht verändert werden.

⁷⁹ Vgl. Baumann Mineralölvertieb (2019), S. 22.

⁸⁰ Vgl. Hans Bussmann GMBH (2024).

⁸¹ Vgl. Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b), S. 13.

⁸² Vgl. VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), S. 33.

Tabelle 3: Gegenüberstellung chemisch-physikalischer Konservierungsmethoden ⁸³

Maßnahme	Vorteile	Nachteile	Industrielle Anwendung
UV-Behandlung	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Gefährdung für Anwendende - Keine Umweltgefährdung 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur geringe Eindringtiefe (Bypass nötig) - Keine Wirkung auf Biofilme - Energieintensiv - Störanfällig (Verschmutzung) 	Bypass-Geräte verschiedener Herstellfirmen verfügbar
Ultraschallbehandlung	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Gefährdung für Anwendende oder Umwelt - Proaktive Reduktion der Biofilmbildung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Schädigung des KSS möglich (Spaltung Emulsionstropfen) - Lokal stark begrenzte Wirkung (Bypass nötig) 	Erste Prototypen für Bypassgeräte verfügbar
Pasteurisierung	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Gefährdung für Anwendende oder Umwelt - Wirkt teilweise auch auf Biofilmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermische Schädigung des KSS möglich - Energieintensiv - Für kontinuierlichen Betrieb ggf. Gegenkühlung notwendig 	Bypass-Geräte verschiedener Hersteller verfügbar
Einsatz Antimikrobieller Metalle	<ul style="list-style-type: none"> - Kann lokal und bedarfsgerecht die Biofilmbildung stören 	<ul style="list-style-type: none"> - Wirkung auf freischwimmende Organismen begrenzt 	Kein Nachweis über realen Einsatz
Ölabscheidung (mit oder ohne Belüftung)	<ul style="list-style-type: none"> - Einfach und kostengünstig nachzurüsten 	<ul style="list-style-type: none"> - Antimikrobielle Wirkung nicht vollständig untersucht 	Stand der Technik zur Fremdölabscheidung

⁸³ Vgl. Madanchi, N., et al. (2017a), Baumann Mineralölvertieb (2019), VDI 3397:2020-06 (Blatt 4), VDI 4800:2018-03 (Blatt 2), Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020), ph-cleantec GmbH (2021), sowie Environmental Systems GmbH (2017).

3 VERGLEICHENDE ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

3.1 Untersuchungsrahmen und funktionelle Einheit

In den folgenden Kapiteln sollen ausgewählte Maßnahmen zur Standzeitverlängerung von KSS gegenübergestellt und mithilfe einer Nutzen-Aufwand-Analyse ökologisch sowie ökonomisch bewertet werden. Dazu werden Szenarien mit je unterschiedlichen chemischen bzw. chemisch-physikalischen Konservierungsmaßnahmen betrachtet und im Rahmen einer Ökobilanzierung mit einem Referenzszenario ohne KSS-Konservierung verglichen. Gemäß ISO 14044 muss zur Durchführung einer Ökobilanzierung der Untersuchungsrahmen des betrachteten Systems, also dessen genaue Funktionen und Leistungsmerkmale, eindeutig definiert sein. Für die vorliegende Studie soll als Bezugsgröße für alle Maßnahmen ein realistisches Produktionsszenario festgelegt werden, welches die Fertigung einer definierten Menge Fräsbauteile beinhaltet, für die eine bestimmte Menge KSS einzusetzen ist. Die Anzahl pro Jahr produzierter Bauteile (bzw. das dabei entstehende Gesamtspanvolumen) stellt eine Vergleichsbasis und damit die funktionelle Einheit der Studie dar. Die für diesen Untersuchungsrahmen getroffenen Annahmen werden im Folgenden näher beschrieben.

3.1.1 Frässystem

Als Frässystem für das Produktionsszenario wird ein universelles CNC-Bearbeitungszentrum DMU 100 MonoBLOCK der Firma Deckel MAHO gewählt. In Bezug auf Schnittleistung, Stromaufnahme und KSS-System repräsentiert die Anlage eine typisch industriell eingesetzte Fräsmaschine. Die hier betrachtete Maschine wurde 2011 in Betrieb genommen und ist Teil des Maschinenparks des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig (vgl. Abbildung 4).

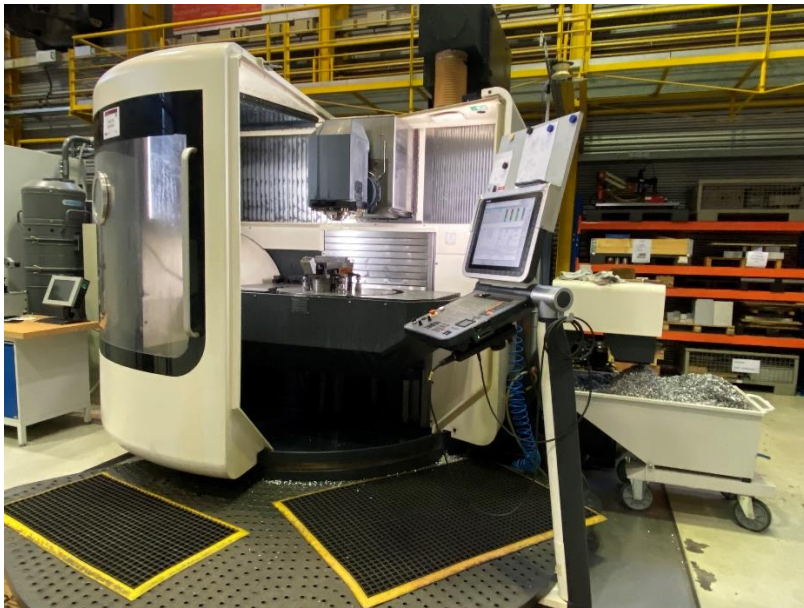


Abbildung 4: Referenzmaschine Deckel Maho DMU 100 © TU Braunschweig, IWF (Hans Engel)⁸⁴

Die Maschine verfügt über einen 5-Achsaufbau mit NC-Rundtisch und einem schwenkbaren Fräskopf mit einer Antriebsleistung von 15 kW. Sie ist ausgelegt für die Verwendung von wassermischbaren KSS und umfasst ein internes Spanfördersystem, eine Volleinhausung mit peripherer KSS-Nebelabsaugung sowie eine extern angeschlossene KSS-Zufuhranlage (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Gesamtleistungsaufnahme der Maschine inklusive peripherer Anlagen beträgt 50 kW.

3.1.2 KSS-System

Das KSS-System der beschriebenen Produktionsmaschine besteht aus drei Komponenten: i) KSS-Anlage, ii) Nebelabsaugung und iii) Späneförderer. Der Aufbau wird in Abbildung 5 verdeutlicht.

⁸⁴ Abbildung der TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (Hans Engel).

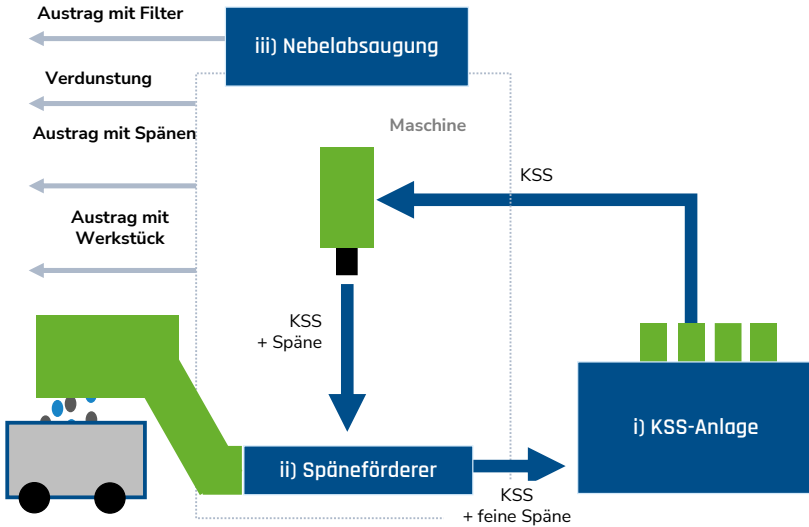


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des KSS-Kreislaufs inkl. der Verlustströme⁸⁵

Kern des Systems bildet die extern angeschlossene KSS-Anlage, welche die Emulsion nach dem Einsatz in der Maschine aufreinigt, in einem Vorratstank vorhält und bei Bedarf dem Frässystem über Pumpen zur Verfügung stellt. Die hier verwendete Anlage besitzt ein Arbeitsvolumen von 250 l, drei Förderpumpen zum Transport des KSS an die Prozessdüsen, eine Sprühpistole und Spänespülung sowie einen serienmäßigen feinmaschigen Filterkorb zur Spanabscheidung. Werksseitig ist der Tank mit einer Sensorik zur Überwachung des KSS-Niveaus sowie einem Druckschalter ausgestattet, der bei starker Beladung des Filters eine automatische Reinigung auslöst. Die Oberseite des Tanks ist zur Vermeidung externer Kontamination weitestgehend geschlossen, verfügt jedoch über mehrere Wartungsklappen, die einen externen Zugang für die Wartung und Befüllung ermöglichen. Der Aufbau des Tanksystems ist nachfolgend in Abbildung 6 (links) dargestellt.

⁸⁵ Eigene Darstellung.



Abbildung 6: Links: KSS-Anlage mit 250-Liter-Tank, Förderpumpen und integriertem Filterkorb; rechts: Öl-/Emulsionsnebelabscheidung oberhalb des Maschinenraums © TU Braunschweig, IWF (Hans Engel)⁸⁶

Aus dem KSS-System gelangt der Schmierstoff mithilfe einer Förderpumpe in die Maschine und wird mit einem Arbeitsdruck von 4,8 bar über Düsen am Fräskopf der Bearbeitungszone zugeführt. Bei Bedarf ist zudem eine Versorgung des Prozesses mit KSS über das Innere von Werkzeugen möglich. Ein geringer Teil des KSS wird hier durch den hohen Zuführdruck zerstäubt und über einen Öl-/Emulsionsnebelabscheider im oberen Teil der Maschine ausgefiltert (vgl. Abbildung 6, rechts). Der überwiegende Teil reichert sich während der Bearbeitung hingegen mit den im Prozess freigesetzten Spänen an und sammelt sich in einem Behälter im unteren Teil der Maschine. Dieser Sammeltank ist Teil des Späneförderers (vgl. Abbildung 5) und beinhaltet je nach Füllstand ein zusätzliches Speichervolumen von maximal 200 l KSS. Ein Förderband im Inneren des Behälters transportiert die ausgewaschenen Späne aus dem Arbeitsraum zu einem Späneauswurf an der Seite der Maschine. Der an den Spänen anhaftende Schmierstoff wird größtenteils durch im Band innenliegende Spaltsiebe abgetrennt und verbleibt im Behälter. Eine Förderpumpe am Rand des Tanks pumpt den von groben Spänen befreiten KSS anschließend aus dem

⁸⁶ Abbildung der TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (Hans Engel).

Behälter zurück in die externe KSS-Anlage, wo kleinteilige Spananteile über den enthaltenen Siebkorb ausgefiltert werden.

Durch die offene Bauweise ist das System einem kontinuierlichen Verlust von Schmierstoff ausgesetzt, der in regelmäßigen Abständen ausgeglichen werden muss. Ursache dafür sind Verdunstungsverluste aus den teilweise offenen Tanks und Maschinen, Ausschleppungen durch Anhaftungen am Werkstück, Restfeuchte der abgetrennten Späne sowie durch Abscheidungen der abgesaugten KSS-Nebel.

3.1.3 Kühlschmierstoff

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird ein typischer KSS-Ansatz für Fräsoperationen gewählt. Weit verbreitet sind hier Öl-in-Wasser-Emulsionen (vgl. Abschnitt 2.2), wobei abhängig vom spezifischen Prozess sowie spezifischen KSS verschiedene Konzentrationen angesetzt werden. Für die Studie wird eine einsatztypische Konzentration von 7,5 % Konzentrat-in-Wasser festgelegt. Als Ansatzwasser wird entsprechend den Empfehlungen aus Kapitel 2.5.1 Leitungswasser in Trinkwasserqualität verwendet. Es wird zudem davon ausgegangen, dass das KSS-System vor jeder Neubefüllung sowohl mechanisch als auch chemisch gereinigt und desinfiziert wird.

Für die Bilanzierung ist vor allem die genaue KSS-Formulierung von Bedeutung. Die in der Studie verwendete Zusammensetzung ist in Tabelle 4 aufgeschlüsselt. Es ist zu beachten, dass es sich dabei um eine Beispielformulierung handelt, die einer typischen KSS-Zusammensetzung nachempfunden wurde. Im Allgemeinen sind die herstellereinspezifischen KSS-Rezepturen vertraulich. Die Inhaltsstoffe inklusive der Konzentrationen der einzelnen Bestandteile sind daher in der Regel nicht einsehbar. Durch Daten- und Sicherheitsblätter haben Verbrauchende zwar Anhaltspunkte über Stoffgruppen und Konzentrationsbereiche einiger Bestandteile, die finalen Formulierungen von KSS sind jedoch für Endverbraucher nicht zugänglich. Zudem können Bestandteile von KSS je nach KSS-Typ und Endanwendung deutlich variieren. Die in Tabelle 4 gezeigte Formulierung

dient daher als Richtwert und Referenz für die ökobilanziellen Untersuchungen, individuelle, industrielle Formulierungen können von dieser Formulierung ggf. abweichen.

Tabelle 4: KSS-Formulierung des betrachteten Emulsionskonzentrates

Anteil im Konzentrat	Stoff	Hauptfunktionen im KSS
50 %	Mineralöl: Paraffinöl	Trägerfunktion, Schmierfunktion
15 %	Emulgator: Polysorbat 80	Emulgator (Verbindung von Öl-zu-Wasser)
10 %	Ester: Ethylhexylester	Schmierfunktion
10 %	Amin: Triethanolamin	pH-Regulierung, Korrosionsschutz
5 %	Aldehyd: Formaldehyddepotstoffe	Konservierung, Biozid (insbesondere Bakterizid)
7 %	Anwendungsabhängige Additivpakete: Triethylenglykol-Monobutylether als Schaumhemmer, Zinkdialkyldithiophosphat 2 – 3 % als EP/AW-Additiv	z. B. Hochdruck- (Extreme-Pressure) Additive, Verschleißschutz- (Anti-Wear) Additive, Additive zur Schaumhemmung, Geruchshemmung
3 %	Weitere: Tolyltriazol	Buntmetallschutz

Wie die meisten KSS-Konzentrate ist auch die hier betrachtete Formulierung mit Biozidstoffen vorkonserviert. Als einer der volumenbezogenen Hauptbestandteile des in der Regel komplex aufgebauten Biozidgemischs werden Formaldehyddepotstoffe betrachtet. Formaldehyddepotstoffe haben gegenüber reinen Formaldehyden vorteilhaftere Eigenschaften wie eine geringere Flüchtigkeit und geringe Geruchsbildung. Die Depotstoffe werden jedoch im Laufe der KSS-Verwendung durch chemische, physikalische oder biologische Prozesse zerstört, was eine erneute Freisetzung des flüchtigen Formaldehyds zur Folge hat. Auslöser für die Freisetzung

können verschiedene Faktoren sein, wie ein pH-Wert-Abfall, hohe Temperaturen oder mikrobiologische Prozesse. Der letztendlich unvermeidbare Verbrauch des Formaldehyds hat eine kontinuierliche Abnahme der bioziden Wirkung zur Folge.

Aufgrund der hohen Anzahl verfügbarer Wirkstoffe und der verschiedenen Aktivierungsmechanismen der Formaldehydfreisetzung ist eine generalisierte Aussage über die genaue Zusammensetzung eines Biozids herausfordernd. Daher wird der als Biozid wirkende Bestandteil im Referenz-KSS vereinfacht als reines Formaldehyd angenommen und der Verbrauch des Formaldehyds erfolgt mit der Lebensdauer des KSS, d. h., der Zeitpunkt des Formaldehydverbrauchs entspricht der Standzeit des wassergemischten KSS.

3.1.4 Referenzwerkstück und Bearbeitungsparameter

Zur Definition eines Produktionsszenarios muss ein Referenzwerkstück inklusive zugehöriger Schnitt- und Bearbeitungsdaten definiert werden. Diese Daten bestimmen im Zusammenhang mit Arbeits- und Auslastungszeiten die Anzahl der realistisch gefertigten Teile pro Jahr (hier ausgedrückt in Form eines Spanvolumens pro Jahr). Zur besseren Vergleichbarkeit soll als Referenzwerkstück der Studie eine in der Literatur beschriebene Referenzgeometrie verwendet werden. Ein Überblick der dazu in Frage kommenden Werkstücke ist nachfolgend in Tabelle 5 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsfälle, die den Bauteilen zu Grunde liegen, ist auch die jeweilige verfügbare Datenbasis unterschiedlich. Geometrie und zugehörige Prozessparameter, insbesondere die notwendige Schnittzeit, müssen zur Berechnung der funktionellen Einheit eindeutig definiert sein. Die individuelle geometrische Ausprägung ist hingegen zunächst zweitrangig. Im Kontext der KSS-Betrachtung sind neben Prozessdaten zur aktiven Schnittzeit auch Informationen hinsichtlich der für die Produktion eingesetzten KSS-Menge von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus sind Daten über den tatsächlichen Energieverbrauch der Fräsoperationen zur Kostenbetrachtung wünschenswert. Auf Basis dieser

Vorgaben soll im folgenden Bauteil 5 als Referenz herangezogen werden. Anders als bei den Bauteilen 1 bis 4 sind hierfür neben den primären Daten ebenso ausreichende Informationen bezüglich des Energieverbrauchs der peripheren Anlagen (KSS-System), Angaben zum Spanvolumen sowie der effektiven Bearbeitungsdauer direkt verfügbar.

Tabelle 5: Gegenüberstellung möglicher Referenzbauteile und zugehöriger Datenbasis

Bauteil	Quelle	Anwendung	Datenverfügbarkeit			
			Energie	KSS	Maße	Prozess
	87 88	Energieverbrauch von Fräsoperationen	X	O	X	X
	89	Genauigkeitsbewertung von WZM	O	O	X	O
	90	Energieverbrauch von Fräsoperationen	X	O	X	O
	91	Vergleich von Werkzeugstandzeiten	O	O	X	O
	92	Energie- und Ressourcenverbrauch von WZM	X	X	X	X

⁸⁷ Vgl. Behrendt, T., et al. (2012).

⁸⁸ Vgl. Bernstein, W. Z., et al. (2021).

⁸⁹ Vgl. Weck, M. (2006), S. 424.

⁹⁰ Vgl. Westermann, H.-H., et al. (2015).

⁹¹ Vgl. Schmidt, J., et al. (2023).

⁹² Vgl. Madanchi, N. (2022), S. 81-85.

Bei dem durch Madanchi et al. beschriebenen Bauteil (vgl. Abbildung 7) handelt es sich um ein kombiniertes Dreh- und Frästeil, welches aus dem im Maschinenbau häufig eingesetzten Vergütungsstahl C45E (1.1191) besteht. Zur Vereinfachung werden im Rahmen der Studie ausschließlich die beschriebenen Fräsoperationen betrachtet und die zusätzlich für die gezeigte Form notwendigen Dreh- und Schleifprozesse vernachlässigt.



Abbildung 7: Referenzbauteil vor und nach Bearbeitung mit zugehörigen Fräsoperationen⁹³

In Bezug auf Fräsoperationen besitzt das Bauteil vier 10 x 10 mm große Nuten an der Oberkante, eine sternförmige 8 x 3 mm umfassende Tasche im Innenbereich sowie eine entlang der Stirnfläche verlaufende 3 x 2 mm ausmachende Einfräsung (vgl. Abbildung 7, rechts). Die zur Herstellung dieser Merkmale benötigten Einzeloperationen sind inklusive der zugehörigen Schnittparameter in Tabelle 6 dargestellt. Aus den vorgegebenen Prozessparametern (Durchmesser des Fräasers, Tiefenzustellung je Schnitt und Schnittgeschwindigkeit) ergeben sich die aktiven Schnittzeiten pro Werkstück. Das Spanvolumen (benötigt beispielsweise für die Austragung von KSS mit den Spänen) errechnet sich aus dem abgetragenen Volumen der Einschnitte. In Summe ergibt sich für die Fertigung ein Gesamtspanvolumen von 12,48 cm³ bei einer effektiven Schnittzeit (aktive Spindel + aktives KSS-System) von 165 s. Alle Schnitteingriffe finden mit aktivierter Kühlschmierung und der in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen 7,5%igen KSS-

⁹³ Vgl. Madanchi, N. (2022), S. 81-85.

Emulsion statt. Die KSS-Zugabe erfolgt als Überflutungsschmierung, also durch großflächige Überspülung der Bearbeitungszone bei niedrigem Fluiddruck.

Tabelle 6: Prozessdaten und -parameter der Fräsoperationen; v_c = Schnittgeschwindigkeit, P_F = mittlere Leistungsaufnahme der WZM während der Fräsoperation

Prozessschritt	Spanvolumen	Schnittdauer	Leistung P_F	Schnitttiefe	Fräser	v_c
1	4,76 cm ³	69 s	5,9 kW	1,5 mm	10 mm	120 m/min
2	6,26 cm ³	51 s	6,2 kW	1,5 mm	8 mm	90 m/min
3	1,46 cm ³	45 s	7,8 kW	1 mm	3 mm	90 m/min
Gesamt	12,48 cm³	165 s	-	-	-	-

3.1.5 Produktionsszenario und funktionelle Einheit

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1.4 gegebenen Prozessdaten kann nachfolgend ein Produktionsszenario mit einer Jahresproduktionsmenge als funktionelle Einheit (FE) der Studie festgesetzt werden (vgl. Tabelle 7). Die Skalierung der Ergebnisse auf ein für die Produktionstechnik relevantes Szenario gewährleistet, dass der Anwendungsfall über ein breites, industriell relevantes Spektrum verfügt und insbesondere für KMU von Bedeutung ist.

Die Fertigungskapazität wird auf Basis von insgesamt 250 Arbeitstagen pro Jahr, in einem Ein-Schicht-Modell, mit einem Achtstundentag angenommen. Die Betriebszeit der Maschine pro Jahr wird mit 80 % festgesetzt, was neben den aktiven Fräsoperationen Stillstandzeiten für das Rüsten und den Bauteilwechsel beinhaltet. Somit ergibt sich insgesamt eine aktive Betriebsdauer (Spindel + KSS-Zufuhr aktiv) von 1.600 Stunden/Jahr.

Unter Betrachtung der produktiven Schnittzeit pro Referenzwerkstück von 165 s errechnet sich die Jahresproduktion zu 34.909 Werkstücken, was

wiederum einem Gesamtspanvolumen von ca. 436.000 cm³ entspricht. Dieses jährliche Spanvolumen bildet die funktionelle Einheit der Studie und wird in allen Szenarien als zentrale Bezugsgröße herangezogen. Die Arbeitszeiten und produktive Maschinenauslastung bilden zudem weitere wichtige Grundlagenwerte für die nachfolgenden Berechnungen.

Tabelle 7: Funktionelle Einheit bezogen auf ein Produktionsszenario einer einzelnen Maschine

Größe	Einheit	Wert
Arbeitstage pro Jahr	Tage/Jahr	250
Schichten pro Tag	Anzahl	1
Schichtdauer pro Tag	h/Tag	8
Betriebszeit pro Jahr	%	80
Produktive Maschinenauslastung	h	1.600
Spanvolumen pro Referenzwerkstück	cm ³ /Stück	12,48
Aktive Schnittzeit pro Referenzwerkstück (Produktive Betriebszeit)	s/Stück	165
Resultierende funktionelle Einheit der Studie		
Produzierte Stückzahl pro Jahr	Stück/Jahr	34.909
Spanvolumen pro Jahr	cm ³ /Jahr	436.000

3.2 Szenarien-Definition

Aufbauend auf dem beschriebenen Untersuchungsrahmen werden nun vier Szenarien für die Studie definiert – ein Referenzszenario, in dem keine zusätzlichen standzeitverlängernden Maßnahmen getroffen werden, sowie drei darauf aufbauende Szenarien mit ausgewählten Standzeitverlängerungs- bzw. Pflegemaßnahmen für das KSS-System.

Es ist darauf hinzuweisen, dass in jedem Szenario nur eine einzelne Pflegemaßnahme betrachtet wird, auch wenn in der Praxis Kombinationen mehrerer Maßnahmen möglich und teilweise auch üblich sind. Aufgrund der verfügbaren Datenlage und zur besseren Abgrenzung der Ergebnisse untereinander werden die Szenarien hier ausschließlich unabhängig betrachtet.

Wegen einer nicht ausreichenden Praxisdatenlage zur tatsächlichen Effektivität (beispielsweise einer realistisch erzielbaren Standzeitverlängerung unter gegebenen Bedingungen) chemischer und chemisch-physikalischer Pflegemaßnahmen wird für jedes Szenario eine auf Literaturangaben gestützte realistische Schätzung einer erzielbaren Standzeitverlängerung in Wochen angenommen. Diese Annahme wird im weiteren Verlauf der Studie im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (vgl. Abschnitt 5.2.5) um ein breites Fehlerintervall ausgeweitet und somit validiert.

Allen Szenarien mit Standzeitverlängerungsmaßnahmen ist gemein, dass sie mit einem echtzeitfähigen pH-Messsystem zur Überwachung des KSS-Zustandes ausgestattet sind. Das System besteht aus einer im Tank eingebrachten digitalen pH-Messsonde und einem Messlaptop zur Speicherung und Visualisierung der Daten. Die kontinuierliche Messung gewährleistet auch beim Ausbleiben manueller Kontrollen ein Mindestmaß an Qualitätssicherung und kann eine Entscheidungsgrundlage dahingehend darstellen, wann zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Referenzszenario

Ausgangspunkt und Benchmark für die Maßnahmenbetrachtung ist ein Referenzszenario, welches auf den Annahmen aus Abschnitt 3.1 beruht und ein statisches, nichtadaptives System ohne Pflegemaßnahmen repräsentiert. Das KSS-Volumen im Gesamtsystem (450 l) wird hierbei nach einem Turnus von zwölf Wochen ausgetauscht, ohne dass Informationen über die tatsächliche mikrobielle Keimbelastung oder die momentane Zusammensetzung des KSS bekannt sind. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass beim Einsatz moderner KSS-Formulierungen ggf. längere Standzeiten von sechs bis zwölf Monaten erreichbar und industriell auch durchaus üblich sind. Da die tatsächliche Lebensdauer in der Anwendung jedoch von zahlreichen äußeren Faktoren abhängig sein kann, wurde zu Beginn ein vergleichsweise niedriger Referenzwert angesetzt. Die Auswir-

kungen längerer initialer Standzeitannahmen auf die Ergebnisse der nachfolgenden ökologischen und ökonomischen Bewertungen wurden in Kapitel 5.1.6 im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse qualitativ geprüft.

Szenario 1: Fremdölabscheidung

In Szenario 1 wird als standzeitverlängernde Maßnahme ein kombiniertes System zur Fremdölabscheidung und Belüftung eingesetzt, um die Oberfläche des Kühlschmierstoffes kontinuierlich von Verunreinigungen zu befreien und zusätzlich den Tank mit Sauerstoff anzureichern. Wie in Abschnitt 2.5.3 beschrieben ist das Verfahren in der industriellen Praxis durchaus üblich und kann bei Bedarf mit vergleichsweise geringem Aufwand kostengünstig nachgerüstet werden. Im hier betrachteten Szenario wird ein mittelgroßer Bandskimmer in den Kühlschmierstofftank eingebracht, der in regelmäßigen Intervallen aufschwimmende Verunreinigungen und Fremdöle von der Oberfläche abschöpft und über einen Sedimentationsbehälter vom Kühlschmierstoff abtrennt. Ein im unteren Teil des Skimmers verbauter Impeller sorgt zusätzlich für die Umwälzung und Belüftung des Tanks. Aufgrund des geringen Energiebedarfs kann der Skimmer präventiv und damit unabhängig vom tatsächlichen KSS-Zustand betrieben werden. Im Szenario soll hierzu eine übliche Betriebszeit von 1 h pro Werktag angenommen werden. Die erzielte Standzeitverlängerung wird entsprechend von Literaturwerten^{94,95} auf fünf Wochen festgesetzt, was in einer Gesamtstandzeit von 17 Wochen resultiert. Die Annahme soll später im Rahmen der Sensitivitätsanalyse vergleichend eingeordnet werden.

Szenario 2: Biozidzugabe

In Szenario 2 wird dem KSS in regelmäßigen Abständen ein Biozid zugesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Kombipräparat aus Bakteriziden und Fungiziden. Wie auch in den anderen Szenarien wird davon ausgegangen,

⁹⁴ Vgl. Kiechle, A. (1996), S. 8.

⁹⁵ Vgl. Herrmann, C., et al. (2017), S. 38.

dass der frische Kühlschmierstoff bereits werksseitig mit einem präventiven Biozidgemisch vorkonserviert ist. Ziel von Szenario 2 ist es, durch eine kontinuierliche Nachadditivierung den zeitlichen Verbrauch und Abbau dieser Biozidstoffe (überwiegend Formaldehydstoffe) im KSS auszugleichen und so das mikrobielle Wachstum und die damit verbundene Biofilmbildung längerfristig zu verlangsamen. Die Biozidzugabe soll hier bedarfsgerecht durch Unterschreiten eines kritischen pH-Wertes von 8 ausgelöst werden.

Auf Basis vorhandener Studiendaten erreicht die Bakterienkonzentration im KSS-System typischerweise ca. 3 – 5 Wochen nach Erstbefüllung mit einem präventiv konservierten KSS bzw. nach der erneuten Zugabe von Bioziden einen lokalen Maximalwert.^{96,97,98} Für das Szenario wird daher eine Nachadditivierung alle vier Wochen angesetzt und die dadurch erzielte Verlängerung der Standzeit basierend auf Literaturwerten auf vier Wochen geschätzt.^{99,100} Dies entspricht im betrachteten Produktionsszenario einer Gesamtstandzeit von 16 Wochen, bevor der Kühlschmierstoff aufgrund kumulierter Verkeimung und Ablagerung vollständig erneuert und das System gespült werden muss.

Szenario 3: Pasteurisierung

In Szenario 3 soll der mikrobiellen Belastung mithilfe wiederholter Pasteurisierung des Kühlschmierstoffes entgegengewirkt werden. Die Pasteurisierung wird hier stellvertretend für ein physikalisch-chemisches Verfahren gewählt, welches zwar nach aktuellem Kenntnisstand nicht weit verbreitet ist, mit der voranschreitenden Entwicklung jedoch zukünftig an Relevanz gewinnen könnte. In Szenario 3 werden dazu zwei 9-kW-Heiz-

⁹⁶ Vgl. Mattsby-Baltzer, I., et al. (1989), S. 2658.

⁹⁷ Vgl. Canter, N. (2019).

⁹⁸ Vgl. Kapoor, R., et al. (2024), S. 7.

⁹⁹ Vgl. Kiechle, A. (1996), S. 8.

¹⁰⁰ Vgl. Herrmann, C., et al. (2017), S. 38.

stäbe in den bestehenden KSS-Tank eingebracht und mithilfe der Leistungselektronik und einem Temperatursensor bedarfsgerecht angesteuert. Innerhalb von 1,5 Stunden kann so das gesamte Tankvolumen auf 65 °C erwärmt werden. Ein kontinuierliches Umpumpen während der Erhitzungsphase sorgt für eine Wirkung über das gesamte KSS-System. Es wird angenommen, dass damit ein Großteil der vegetativen Zellen von Bakterien und Pilzen im System abgetötet wird. Auch hier erfolgt die Pasteurisierung bedarfsgesteuert nach dem Unterschreiten eines kritischen pH-Wertes. Anders als bei Szenario 2 und 3 kann die Konservierung nicht im laufenden Betrieb stattfinden, sondern wird ausschließlich außerhalb der Betriebszeiten durchgeführt. Mit gleichen Annahmen zum Keimwachstum aus Szenario 2 wird ein Erhitzungszyklus alle vier Wochen angesetzt. Diese Annahme deckt sich mit den Empfehlungen der Herstellenden von Systemen zur Bypass-Pasteurisierung.^{101,102}

Die Standzeitverlängerung wird mit fünf Wochen leicht über der Biozidzugabe eingeordnet, da durch die Erhitzung ggf. ein breiteres Spektrum unterschiedlicher Mikroorganismen adressiert werden kann.¹⁰³ Eine Abweichung von diesem Wert wird später im Rahmen der Sensitivitätsanalyse geprüft. Wie auch bei der Biozidzugabe ist trotz regelmäßiger Anwendung mit einer kumulierten Zunahme an Mikroorganismen und Ablagerungen zu rechnen, was einen vollständigen Austausch sowie die Spülung des Systems nach Erreichen der siebzehnten Woche erfordert.

Die besprochenen Szenarien und die darin getroffenen Annahmen und benötigten Aufwendungen werden nachfolgend in Tabelle 8 zusammengefasst.

¹⁰¹ Vgl. ph-cleantec GmbH (2021).

¹⁰² Das Bypass-Verfahren wurde als Datengrundlage für die Abschätzung der Daten hinsichtlich der Pasteurisierung zur Bewertung des Ressourcenaufwands herangezogen. Die Pasteurisierung ist aktuell nicht weit verbreitet, mit der voranschreitenden Entwicklung könnte sie jedoch zukünftig an Relevanz gewinnen.

¹⁰³ Vgl. ph-cleantec GmbH (2021).

Tabelle 8: Übersicht von Aufwendungen und Annahmen für die nachfolgend betrachteten Szenarien

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	KSS-Wechsel nach Wartungsplan	Fremdölabscheidung	pH-geregelte Biozidzugabe	pH-geregelte Pasteurisierung
KSS-Standzeit [Wochen]	12	17	16	17
Gesamtvolumen KSS [l/Jahr]	1.677 l	1.184 l	1.258 l	1.184 l
Mehraufwände (qualitativ)	-	pH-Sensorik Bandskimmer	pH-Sensorik Biozid	pH-Sensorik Heizstäbe Leistungselektronik Temperatursensor
Energieaufwand (qualitativ)	-	pH-Sensorik (kontinuierlich) Skimmerband (1 h/Tag) Umwälzpumpe (1 h/Tag)	pH-Sensorik (kontinuierlich)	pH-Sensorik (kontinuierlich) Batch-Erhitzung (1,5 h alle 4 Wochen)
Fräsmaschine	DMG Mori DMU 100 monoBlock – vgl. Kapitel 3.1.1			
Zusammensetzung KSS-Konzentrat	50 % Mineralöl, 15 % Emulgator, 10 % Ester, 10 % Amin, 5 % Aldehyd, 10 % Additive – vgl. Kapitel 3.1.3			
Kühlschmierstoff- Transport	285 km (vom Herstellungsort bis zur Verbrauchsstelle)			
Zusammensetzung KSS-Emulsion	7,5 % Konzentrat in Wasser (bei 450 l: 33,75 l KSS-Konzentrat, 416,25 l Leitungswasser)			

3.3 Ökologische Bewertung: Quantifizierung der Sachbilanz

Um die Sachbilanz-Definition der ökologischen Bewertung zu erstellen, wurden Inventarinformationen und Daten mithilfe der kommerziellen Datenbank ecoinvent V3.10¹⁰⁴ sowie der frei zugänglichen Datenbank PROBAS zusammengetragen. Die erforderlichen zusätzlichen Informationen werden in der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur und in früheren Studien auf demselben Wissensgebiet gesammelt. Weitere Daten in den folgenden Abschnitten stammen aus IWF-Experten- und Expertinnen-Einschätzungen¹⁰⁵ oder experimentellen Messungen.

Den Empfehlungen der VDI-Richtlinien 4600¹⁰⁶ und 4800 Blatt 2¹⁰⁷ folgend, finden keine Anrechnungen für vermiedene Emissionen, etwa durch Materialrecycling oder Energiegewinnung über Verbrennungsprozesse, statt. Dies erfolgt nach dem Cut-off-Ansatz, bei dem nur der tatsächliche Rohstoffaufwand erhoben und davon ausgegangen wird, dass Recyclinganteile zu Beginn des Lebenszyklus in das System eingehen.

Die Lebenszyklusanalyse ist in drei Phasen unterteilt:

- **Herstellungsphase:** KSS; Reinigungsflüssigkeit, Biozid, Lösungsmittel (pH-Puffer), Sensorik wie pH-Sonde und pH-Messumformer, Ölabscheider mit Zubehör und Ersatzteilen (Skimmerband), und Geräte zur Steuerung der Pasteurisierung wie Temperatursonde, SPS-Steuerung, Laptop und Heizstäbe,
- **Nutzungsphase:** Stromverbrauch (Sensoren, Laptop, Elektrogeräte) sowie

¹⁰⁴ Vgl. Wernet, G., et al. (2016).

¹⁰⁵ Mit „IWF-Experten- und Expertinnen-Einschätzungen“ sind in diesem Kontext Aussagen und Erfahrungswerte der an dieser Studie beteiligten Experten und Expertinnen des Instituts für Werkzeugmaschinen & Fertigungstechnik gemeint, die auf deren Fachwissen und praktischen Erfahrungen basieren.

¹⁰⁶ Vgl. VDI 4600:2021-01.

¹⁰⁷ Vgl. VDI 4800:2018-03 (Blatt 2).

- Entsorgungsphase: Abfallbehandlung der genutzten Materialien (KSS, Reinigungsflüssigkeit, Biozid, pH-Puffer), Sensoren (pH-Sonde und pH-Messumformer) und weiteren Geräte (Ölabscheider inklusive Zubehör, Temperatursonde, SPS-Steuerung, Laptop und Heizstäbe).

Die Materialien für die einzelnen Szenarien wurden für die ökologische Bewertung in Verbrauchsgüter (V), Investitionsgüter (IG) und Nutzung differenziert. Zu den Verbrauchsgütern gehören KSS und Reinigungsflüssigkeit sowie deren Transport und zu den Investitionsgütern Biozid, pH-Puffer, Sensorik und Geräte sowie deren Transport. Die Nutzung besteht nur aus dem Stromverbrauch der Sensoren, Geräte und der Reinigung.

Da die Lebensdauer der Maschine für jedes Szenario als unverändert betrachtet wird, wird sie von der Vergleichsbewertung ausgeschlossen. Die erforderlichen Rohstoffmengen werden unter Berücksichtigung des Zeitrahmens der funktionellen Einheit von einem Jahr betrachtet.

Im Folgenden werden die für die ökologische und ökonomische Bewertung inventarisierten Daten erläutert und in Kapitel 3.3.8 für die vier Szenarien zusammenfassend dargestellt.

3.3.1 Stromverbrauch

Wie bei jeder vergleichenden Bewertung wird die elektrische Energie, die im Referenzszenario und in den Szenarien gleichbleibt, nicht berücksichtigt (der Stromverbrauch der Werkzeugmaschine). Strom wird beim KSS-Wechsel sowie in allen Prozessen verwendet, in denen Elektrogeräte vorhanden sind, und er wird ebenfalls im End-of-Life-Behandlungsprozess von Kühlschmierstoffabfällen und Reinigungsflüssigkeit (für den Verdampfungsprozess) genutzt. Der Stromverbrauch des KSS-Wechsels sowie der Sensoren und zusätzlichen Elektronik wird mit Bezug auf die jeweilige Nutzungsphase in nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.3.2 KSS

In diesem Fall handelt es sich um einen repräsentativen Vertreter wasser-mischbarer KSS, die in den meisten spanabhebenden Bearbeitungsprozessen wegen ihrer Eigenschaften zur Kühlung und Schmierung eingesetzt werden. Die wichtigsten Komponenten des KSS werden mit Hilfe von wissenschaftlicher Literatur und Datenbanken modelliert, die der KSS-Formulierung am nächsten kommen.

Basierend auf den Annahmen in Tabelle 4 setzen sich diese Arten von Kühlschmierstoffen im Allgemeinen aus 50 % Mineralöl, 15 % Emulgator, 10 % Ester, 10 % Amin, 5 % Aldehyd und weiteren Inhaltsstoffen zusammen, die von den Herstellenden geheim gehalten werden bzw. Betriebsgeheimnisse darstellen. Bezüglich der Dichte des KSS wird von einem Wert von 0,86 kg/l ausgegangen.

Der KSS-Wechsel verbraucht laut IWF-Experteneinschätzung 2 kWh je 450 l KSS. Da die Intervalle der KSS-Wechsel je Szenario variieren, wird diese elektrische Energie berücksichtigt.

Der durch KSS bedingte Wasserverbrauch errechnet sich entsprechend der festgesetzten KSS-Konzentration auf 7,5 % (vgl. Kapitel 3.1.3). Demnach werden je Liter KSS neben 75 ml KSS-Konzentrat, 925 ml Wasser¹⁰⁸ benötigt. Außerdem wird Wasser in den für das Modell verwendeten Datenbeständen berücksichtigt. Direkte Emissionen in die Umweltkompartimente Wasser, Boden und Luft konnten bei keiner Komponente identifiziert werden.

Das Ende des Lebenszyklus von KSS wird der Entsorgungsphase zugeschrieben. Der KSS wird nach Benutzung als chemischer Abfall zur Aufbereitung abgeholt. Basierend auf der Aussage des Entsorgers wird der

¹⁰⁸ Wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, wird zum Ansetzen keimarmer KSS die Verwendung von Leitungswasser empfohlen. In der folgenden Berechnung wird daher bei „Wasser“ stets von Leitungswasser ausgegangen.

Wasseranteil mithilfe der Verdampfung vom Öl getrennt, über Osmoseverfahren gereinigt und der lokalen Kanalisation zugeführt. Das Öl (ca. 5 % der Gesamtmenge) wird direkt verbrannt. Der Energiebedarf für die Verdampfung ist dem Datenblatt¹⁰⁹ der Vakuumdestillation entnommen (0,06 kWh/Liter KSS).

Die Standzeitverlängerung definiert die Menge des in einem Jahr verbrauchten Kühlschmierstoffs. Die drei Maßnahmen und ihre unterschiedlichen Standzeitverlängerungen haben Auswirkungen auf die Kühlschmierstoffmenge, die in allen drei Szenarien reduziert wird.

3.3.3 Reinigungsflüssigkeit

Die Reinigungsflüssigkeit kommt bei jedem KSS-Wechsel zum Einsatz, indem vor der KSS-Neubefüllung der 450-Liter-Tank mit 450 Liter Reinigungsflüssigkeit gereinigt wird.

Die Reinigungsflüssigkeit setzt sich aus 97 % Wasser und 3 % Konzentrat aus nichtionischem Tensid zusammen. Die Dichte der Reinigungsflüssigkeit wird mit 1,004 kg/l angenommen. Die Menge der Reinigungsflüssigkeit entspricht für jedes Szenario der Menge der KSS. Das Wasser sowie das nichtionische Tensid werden über den Standarddatensatz in der ecoinvent-Datenbank anhand des Gewichts modelliert.

Das Ende des Lebenszyklus der Reinigungsflüssigkeit wird der Entsorgungsphase zugeschrieben. Der Behandlungsprozess für Reinigungsflüssigkeit am Ende der Lebensdauer ist identisch mit dem für KSS: Verdampfung zum Trennen der Öl- und Wasserphasen, Verbrennung von Mineralöl und Abwasserbehandlung für das Wasser.

¹⁰⁹ Vgl. KMU LOFT Cleanwater GmbH (2021), S. 2.

3.3.4 Sensoren und zusätzliche Elektronik

Bei der ökobilanziellen Betrachtung der eingesetzten Sensoren und zusätzlichen elektrischen Geräte werden die Herstellung, Nutzung und Entsorgung verschiedener Sensorgeräte ökobilanziell betrachtet:

- pH-Sensorik (Szenarien 1, 2 und 3): Zur Überwachung des Kühlschmierstoffes im Produktionsprozess werden pH-Sensoren genutzt, die zusammen mit spezifischen Kalibrierchemikalien und einem Messumformer ein Bild über den pH-Zustand liefern.¹¹⁰
- Band-Ölabscheider (Szenario 1): Zur Trennung von Fremdülen in der Werkzeugmaschine wird ein Band-Ölabscheider mit einer Bandabscheiderwanne und einem Skimmerband eingesetzt.
- Temperatursensor und Heizstab zur Pasteurisierung des Tanks (Szenario 3): Ein System, bestehend aus Temperatursensor und Heizstab, dient der Pasteurisierung des KSS-Tanks. Es ermöglicht eine kontrollierte Temperaturführung.
- SPS-Steuerung (Szenario 3): Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Prozessautomation.

Im Allgemeinen werden die Sensoren und die Elektronik in der Herstellungsphase mit Hilfe der Datenblätter und geeigneter Datensätze für elektrische Geräte modelliert, wobei Annahmen über die Gewichtsaufteilung der Materialzusammensetzung getroffen und über den Standarddatensatz in der ecoinvent-Datenbank anhand der Gewichte modelliert werden.

¹¹⁰ Die pH-Sensorik wurde im Rahmen der Studie als minimal notwendiger Kennwert zur Erkennung einer mikrobiellen Belastung angesehen. Eine Erweiterung zur umfangreichen Überwachung des KSS-Systems z. B. um einen Konzentrationssensor wurde hier nicht berücksichtigt.

Für die Entsorgung von Sensoren und Elektronik werden Rücknahmeinformationen und Annahmen aus der wissenschaftlichen Literatur berücksichtigt. Außer der in Tabelle 9 gelisteten Inputs wurden im Rahmen der vorliegenden orientierenden ökologischen Bewertung keine weiteren Verbräuche oder Produktionsschritte (z. B. Verarbeitung von Rohstoffen o. Ä.) berücksichtigt.

Für die Nutzungsphase der Sensorgeräte wurde der Stromverbrauch als einziger ökobilanziell relevanter Parameter identifiziert. Hinsichtlich der Messtechnik, die aus der Temperatursonde, den SPS-Steuerungen, der pH-Sonde und dem pH-Messumformer besteht, wurde, basierend auf Strommessungen (IWF-Messung bei 0,11 kW), insgesamt ein Energieverbrauch von 220 kWh pro Jahr (bezogen auf 2.000 Betriebsstunden) festgestellt. Der Energieverbrauch eines Heizstabs wurde auf 469 kWh pro Jahr gemessen, die dazugehörige Pumpe verbraucht zusätzliche 39 kWh pro Jahr. Der Band-Ölabscheider hat einen gemessenen Energieverbrauch von 1,61 kWh pro Jahr (bezogen auf 252 Betriebsstunden).

Basierend auf Einschätzungen der IWF-Experten und -Expertinnen und weiteren Quellen hat die Temperatursonde eine Lebensdauer von zehn Jahren¹¹¹, der Heizstab von zehn Jahren, die SPS-Steuerungen von zehn Jahren^{112,113} die pH-Sonde von drei Jahren, der pH-Messumformer von sieben-einhalb Jahren, der Band-Ölabscheider von zehn Jahren, die Bandabscheiderwanne von 20 Jahren und das Ersatz-Skimmerband von eineinhalb Jahren.

¹¹¹ Vgl. Webber, A.; Haj-Omar, Amr (2018), S. 2.

¹¹² Vgl. Eller, R. (2015), S. 1.

¹¹³ Vgl. Siemens AG (2022), S. 101.

Tabelle 9: Annahmen für die Materialzusammensetzung der Sensorgeräte und der zusätzlichen Elektronik

	Produktgewicht (g)	Material/Unterkomponente	Gewichtsanteil	Quelle
Temperatursonde	250	Edelstahl	95 %	ifm electronic GmbH ¹¹⁴
		Elektronik	4 %	
		Pt100-Element	1 %	
Heizstab	1.800	Incoloy-Legierung (Nickel-Eisen)	64 %	Omega ¹¹⁵
		Aluminium	32 %	
		Messing	4 %	
		Netzteil	/	
SPS-Steuerung (Leistungsschutz)	450	Eisen	80 %	Siemens AG ¹¹⁶
		HDPE	15 %	
		Kupfer	5 %	
SPS-Steuerung (CPU)	500	Steuereinheit	100 %	Siemens AG ¹¹⁷
SPS-Steuerung (Netzteil)	300	Steuereinheit	100 %	Siemens AG ¹¹⁸

¹¹⁴ Vgl. ifm electronic gmbh (2023).

¹¹⁵ Vgl. Omega (2014).

¹¹⁶ Vgl. Siemens AG (2024b).

¹¹⁷ Vgl. Siemens AG (2024a).

¹¹⁸ Vgl. Siemens AG (2024c).

pH-Sonde	300	Glas	70 %	Endress + Hauser ¹¹⁹
		Polyphenylsulfid (PPS) Kunststoff	20 %	
		Silber/Silberchlorid Sensorik	3 %	
		Elektrolyt	7 %	
pH-Messumformer	400	Steuergerät	80 %	Endress + Hauser ¹²⁰
		Flüssigkristallanzeige	20 %	
Band-Ölabscheider	3.600	Edelstahl	25 %	Hans Busmann GmbH ¹²¹
		Polyurethan	25 %	
		Elektromotor	40 %	
		Nylon	5 %	
		Teflon	5 %	
		Netzteil	/	
Zubehör Bandabscheiderwanne	3.000	Edelstahl	100 %	IWF-Experten-einschätzung
Ersatz-Skimmerband	1.000	Polyurethan	90 %	Ilube ¹²²
		Aramidfaser	10 %	

¹¹⁹ Vgl. Endress+Hauser (2021b), S. 8.

¹²⁰ Vgl. Endress+Hauser (2021a), S. 7.

¹²¹ Vgl. Hans Busmann GMBH (2024), S. 2.

¹²² Vgl. Ilube – Florian Denifl (2024).

3.3.5 pH-Pufferlösung

Die pH-Pufferlösung ist Teil des pH-Messsystems zur Überwachung des KSS-Zustandes. Die pH-Pufferlösung wird in allen drei Szenarien zu gleichen Teilen verwendet.

Die pH-Pufferlösungen bestehen aus Wasser, Zitronensäure und Dinatriumphosphat mit unterschiedlichen Anteilen je nach pH-Pufferlösung 7,0 (5%ige Konzentration in Wasser) und pH-Pufferlösung 9,0 (1%ige Konzentration in Wasser).^{123,124} Eine feste Menge an pH-Pufferlösung in Höhe von 250 ml wird jeweils alle zwei Monate verwendet

Die pH-Pufferlösungen werden nach Benutzung als chemischer Abfall separat zur Aufbereitung abgeholt. Die pH-Pufferlösung wird in den drei Maßnahmenzenarien alle zwei Monate mit der gleichen Quantität gewechselt. Daher werden hier die gleichen Umweltemissionen und Kosten berücksichtigt und es ist ein Unterschied zwischen dem Referenzszenario und den drei Maßnahmenzenarien zu erwarten.

3.3.6 Biozid

In der Regel sind KSS-Konzentrate bereits vorkonserviert. Entsprechend der für die Studie ausgelegten KSS-Formulierung (vgl. Tabelle 4) wird der als Biozid wirkende Bestandteil im Referenz-KSS vereinfacht als reines Formaldehyd angenommen. Diese Annahme wird auf das Biozid, das dem KSS-Gemisch zusätzlich zugegeben wird, übertragen. Das Biozid wird als Beimengung des KSS zusammen mit diesem auf dem gleichen Weg entsorgt.

¹²³ Vgl. Endress+Hauser (2022), S. 4.

¹²⁴ Vgl. Endress+Hauser (2017), S. 4.

3.3.7 Laptop

Im Rahmen der Modellierung wird in dem dritten Szenario der Pasteurisierung ein Laptop benötigt. Hierbei wird auf Daten aus der ecoinvent-Datenbank zurückgegriffen, um die Materialzusammensetzung des Geräts zu ermitteln. Alle genannten Bestandteile wurden in die Analyse eingeschlossen, einschließlich des Aufladekabels.

Die Nutzungsdauer von Computern basiert auf Literaturdaten, die den durchschnittlichen Verbrauch in Europa widerspiegeln. Basierend auf Daten unterschiedlicher Studien und Verbrauchsangaben^{125,126} wurde der Energieverbrauch des Laptops mit 100,8 kWh (basierend auf 2016 Betriebsstunden) kalkuliert. Die durchschnittliche Lebenserwartung der Geräte wurde mit 5,8 Jahren angesetzt, gestützt auf Daten aus einer vorherigen Studie, die basierend auf verschiedenen Quellen^{127,128,129} modelliert wurde. Für die Abfallbewirtschaftung von Computern, Servern und Peripheriegeräten wird unter Berücksichtigung der vormechanischen Behandlung und Reststoffbehandlung von einer thermischen Verwertung ausgegangen.¹³⁰

3.3.8 Zusammenfassung der Inventarisierung der Daten

Die zusammenfassende Tabelle mit den im Modell verwendeten Werten ist nachfolgend dargestellt (Tabelle 10).

¹²⁵ Vgl. co2online (2022).

¹²⁶ Vgl. Lois-Benoit, D., et al. (2014), S. 24.

¹²⁷ Vgl. Yao, M. A., et al. (2010), S. 7338.

¹²⁸ Vgl. European Commission - DG Environment (2012), S. 85.

¹²⁹ Vgl. Kastanaki, E.; Giannis, Apostolos (2021), S. 79.

¹³⁰ Vgl. Wernet, G., et al. (2016).

Tabelle 10: Inventarisierung der Daten innerhalb der Szenarien

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	Fräsprozess ohne Parameteranpassung	Fräsprozess mit Bandölabscheider und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Biozidzugabe und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Pasteurisierung des Tanks und pH-Überwachung
Herstellung				
pH-Sonde (Stk.)	0	1 (Lebensdauer 3 Jahre)	1 (Lebensdauer 3 Jahre)	1 (Lebensdauer 3 Jahre)
pH-Messumformer (Stk.)	0	1 (Lebensdauer 7,5 Jahre)	1 (Lebensdauer 7,5 Jahre)	1 (Lebensdauer 7,5 Jahre)
Biozid	0	0	1,5 g/kg KSS	0
Temperatursonde (Stk.)	0	0	0	1 (Lebensdauer 10 Jahre)
SPS-Steuerung (CPU) (Stk.)	0	0	0	1 (Lebensdauer 10 Jahre)
SPS-Steuerung (Netzteil) (Stk.)	0	0	0	1 (Lebensdauer 10 Jahre)
SPS-Steuerung (Leistungsschütze) (Stk.)	0	0	0	2 (Lebensdauer 10 Jahre)

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	Fräsprozess ohne Parameteranpassung	Fräsprozess mit Bandölabscheider und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Biozidzugabe und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Pasteurisierung des Tanks und pH-Überwachung
Band-Ölabscheider (Stk.)	0	1 (Lebensdauer 10 Jahre)	0	0
Zubehör Bandabscheiderwanne (Stk.)	0	1 (Lebensdauer 20 Jahre)	0	0
Ersatz-Skimmerband (Stk.)	0	1 (Lebensdauer 1,5 Jahre)	0	0
Heizstab (Stk.)	0	0	0	2 (Lebensdauer 10 Jahre)
Laptop (Stk.)	0	0	0	1 (Lebensdauer 5,8 Jahre)
Netzteil pH-Messung (Stk.)	0	1 (Lebensdauer 10 Jahre)	1 (Lebensdauer 10 Jahre)	1 (Lebensdauer 10 Jahre)
Netzteil Pasteurisierung (Stk.)	0	0	0	1 (Lebensdauer 10 Jahre)

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	Fräsprozess ohne Parameteranpassung	Fräsprozess mit Bandölabscheider und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Biozidzugabe und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Pasteurisierung des Tanks und pH-Überwachung
Nutzung				
Kühlschmierstoff (KSS)	1.677 kg/FE Transport: Hagen > Braunschweig	1.184 kg/FE Transport: Hagen > Braunschweig	1.258 kg/FE Transport: Hagen > Braunschweig	1.184 kg/FE Transport: Hagen > Braunschweig
Reinigungsflüssigkeit	1.950 Liter/FE Transport: Delbrück > Braunschweig	1.376 Liter/FE Transport: Delbrück > Braunschweig	1.463 Liter/FE Transport: Delbrück > Braunschweig	1.376 Liter/FE Transport: Delbrück > Braunschweig
pH-Pufferlösung 7,0	0	1,5 kg/FE	1,5 kg/FE	1,5 kg/FE
pH-Pufferlösung 9,0	0	1,5 kg/FE	1,5 kg/FE	1,5 kg/FE
Biozid	0	0	1,5 g/kg KSS	Kein
Energieverbrauch KSS-Wechsel	2 kWh/450 l KSS (4,33 KSS-Wechsel pro Jahr)	2 kWh/450 l KSS (3,06 KSS-Wechsel pro Jahr)	2 kWh/450 l KSS (3,25 KSS-Wechsel pro Jahr)	2 kWh/450 l KSS (3,06 KSS-Wechsel pro Jahr)
Energieverbrauch Band-Ölabscheider	0	1,61 kWh/Jahr	0	0

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	Fräsprozess ohne Parameteranpassung	Fräsprozess mit Bandölabscheider und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Biozidzugabe und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Pasteurisierung des Tanks und pH-Überwachung
Energieverbrauch der Messtechnik (Temperatursonde, SPS-Steuerungen, pH Sonde, pH-Messumformer)	0	110 kWh/Jahr	110 kWh/Jahr	220 kWh/Jahr ¹³¹
Energieverbrauch des Laptops	0	0	0	101 kWh/Jahr
Energieverbrauch der Heizstäbe (2 Stk) und Pumpe (1 Stk)	0	0	0	468 kWh/Jahr (je Heizstab) + 39 kWh/Jahr (Pumpe)

¹³¹ Es wird angenommen, dass der Strombedarf das Zweifache des Energiebedarfs der beiden anderen Szenarien beträgt. Diese Annahme wird anhand von Informationen des IWF der TU Braunschweig getroffen.

70 Vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	Fräsprozess ohne Parameteranpassung	Fräsprozess mit Bandölabscheider und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Biozidzugabe und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Pasteurisierung des Tanks und pH-Überwachung
Entsorgung				
KSS (Verbrennung und Abwasserbehandlung)	1.677 kg/FE	1.184 kg/FE	1.258 kg/FE	1.184 kg/FE
KSS (Stromverbrauch Verdampfung)	117 kWh/FE	83 kWh/FE	88 kWh/FE	83 kWh/FE
Reinigungsflüssigkeit (Verbrennung und Abwasserbehandlung)	1.950 Liter/FE	1.376 Liter/FE	1.463 Liter/FE	1.376 Liter/FE
Reinigungsflüssigkeit (Stromverbrauch Verdampfung)	136 kWh/FE	96 kWh/FE	102 kWh/FE	96 kWh/FE

	Referenzszenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	Fräsprozess ohne Parameteranpassung	Fräsprozess mit Bandölabscheider und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Biozidzugabe und pH-Überwachung	Fräsprozess mit pH-geregelter Pasteurisierung des Tanks und pH-Überwachung
Biozid	0	0	1,5 g/kg KSS	Kein
pH-Sonde und Messumformer	0	0,1 und 0,1 kg	0,1 kg und 0,1 kg	0,1 kg und 0,1 kg
Temperatursonde	0	0	0	0,025 kg
SPS-Steuerung für Pasteurisierung, Heizstab und Laptop	0	0	0	2,76 kg
Band-Ölabscheider, Zubehör und Ersatz-Skimmerband	0	1,23 kg	0	0

4 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG: AUSWAHL UND QUANTIFIZIERUNG DER KOSTENPOSITIONEN

4.1 Auswahl der Kostenpositionen

Die folgende ökonomische Analyse für Anwendende von KSS, überwiegend kleine und mittlere Unternehmen des metallverarbeitenden Gewerbes, soll die Frage beantworten, ob sich die beschriebenen Maßnahmenpakete ebenfalls unter ökonomischen Aspekten rechnen. Auch hierbei sind Kosten über den gesamten Lebenszyklus relevant. Folgende Kostenpositionen werden innerhalb der Nutzungsphase bilanziert:

- Herstellungskosten von Geräten und Zubehör für Betrieb und Steuerung, deren Lebensdauer über den Zeitraum der funktionellen Einheit hinausgeht,
- Transportkosten zwischen den betreffenden Phasen (diese werden jeweils entsprechend den Herstellungs-, Nutzungs- oder Entsorgungskosten zugeschlagen),
- Nutzungskosten von KSS und weiteren Verbrauchsmaterialien sowie elektrische Energie in allen Szenarien,
- Entsorgung von KSS und Reinigungsflüssigkeit in allen Szenarien sowie für weitere Geräte und Substanzen in den Maßnahmenzenarien, einschließlich des Stromverbrauchs für die Vakuumverdampfung.

4.2 Quantifizierung ausgewählter Kostenpositionen

Die Kosten werden mit Durchschnittswerten bilanziert, die den üblicherweise zu diesem Zweck eingesetzten Produkten in der Realität entsprechen, etwa mit den Konditionen, die das IWF der TU Braunschweig für seine Versuchs- und Laborzwecke vorlegt. Die Preise beziehen sich auf Marktpreisrecherchen sowie im Fall von Spezialgeräten auch auf typische handelsübliche Repräsentanten solcher Geräte, die die gewünschten

Funktionen optimal erfüllen. Weiterhin wurden entweder Daten aus ecoinvent¹³² oder öffentlich zugängliche Daten wie z. B. durchschnittliche Werte von Marktpreisen aus Internetportalen verwendet, ergänzt durch eigene Abschätzungen und Anfragen bei Unternehmen.

4.2.1 Preise für alle Szenarien

- Beschaffungskosten für den Kühlschmierstoff

Der verwendete wassermischbare Kühlschmierstoff wurde laut Produktbeschreibung des Herstellers speziell für Anwendungen in der Automobil- und Zulieferindustrie entwickelt und ist aufgrund seiner hohen Emulsionsstabilität und seines guten Spülvermögens für die vorliegende funktionelle Einheit passend. Er wird zu 4,50 Euro pro Liter Konzentrat angeboten.

- Beschaffungskosten für die Reinigungsflüssigkeit

Der Preis des Systemreinigers für wassermischbare Kühlschmierstoffe, der universell bei Zentralsystemen, einzelbefüllten Maschinen oder Anmisch tanks verwendet werden kann, wird von Händlern und Händlerinnen mit durchschnittlich 7,40 Euro pro kg angegeben. Pro KSS-Wechsel ist eine Zugabe von 18 kg Systemreiniger erforderlich.

- Transportkosten für Substanzen (KSS, Reinigungsflüssigkeit, Biozid) und Geräte

Für alle Transportkosten zwischen dem Ort der Herstellung und dem der Nutzung werden Preise aus ecoinvent für die Kategorie eines Transports per LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 3,5 und 7,5 Tonnen¹³³ pro Tonnenkilometer angenommen.

¹³² Preise stammend aus der ecoinvent-Datenbank werden aus Lizenzierungsgründen nicht dargestellt.

¹³³ Bezeichnung der Kategorie in ecoinvent: Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURo5 (RER Europe).

- Stromkosten

Ein Stromverbrauch tritt auf verschiedenen Stufen des KSS-Prozesses auf, so beim Wechsel des KSS während des Betriebs, bei der Vakuum-Verdampfung während des Entsorgungsprozesses (alle Szenarien), des Betriebs der pH-Sonde (alle Szenarien außer dem Referenzszenario), des Band-Ölabscheiders (Szenario 1) und der Messtechnik, der Heizstäbe und der Pumpe (Szenario 3). Hier wird einheitlich ein Durchschnittspreis für die Industrie in Höhe von 19,1 ct/kWh angenommen, der laut dem Statistik-Portal Statista für das Jahr 2024 (Stand Februar) inklusive der Stromsteuer ausgewiesen ist. Dabei ist zu beachten, dass kleine Handwerksbetriebe unter Umständen höhere Tarife, die auch für private Haushalte gelten, zahlen müssen; Ergebnisse hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit können dadurch theoretisch ebenso von der Höhe des Strompreises abhängen. Die Ergebnisse unter Standardannahmen zeigen jedoch, dass der Kostenanteil durch Stromverbräuche, gerade in der Nutzungsphase, also bei den betroffenen Unternehmen des metallverarbeitenden Gewerbes, nur von untergeordneter Bedeutung ist. Dadurch erschien eine gesonderte zusätzliche Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Strompreises als Einflussparameter im Rahmen dieser Studie als nicht relevant.

- Preis für Wasserverbrauch

Aus der betrieblichen Praxis ist davon auszugehen, dass sowohl der KSS als auch die Reinigungsflüssigkeit mit herkömmlichem Leitungswasser gemischt wird. Als aktueller Durchschnittswert für Deutschland wird der Preis von einem Liter Trinkwasser in Höhe von 0,2 ct/kg (bei regional starken Schwankungen) angenommen.¹³⁴

¹³⁴ Vgl. Verivox (2024).

4.2.2 Preise für pH-Messung (alle Szenarien außer Referenz)

- Beschaffungskosten für die pH-Sonde

Als verwendete pH-Sonde wird ein pH-/Redox-Sensor angenommen, der der gleichzeitigen Messung des pH- und Redox-Werts dient und seine Anwendung auch u. a. in der chemischen Industrie, in Kraftwerken oder in Wasseraufbereitungsanlagen findet. In der hier eingesetzten Variante mit einer Schaftlänge von 425 mm ist er im Handel zu einem Preis von 638 Euro erhältlich.

- Beschaffungskosten für den pH-Messumformer

Der modulare Zwei-Draht-Messumformer für Anwendungen in allen Bereichen der Verfahrens- und Prozesstechnik ist für 440 Euro im Handel erhältlich.¹³⁵

- Beschaffungskosten für die Anschlussleitungen (Verkabelung)

Für die Anschlussleitungen der Verkabelung bestehen keine besonderen Anforderungen. Deren Kosten in der Anschaffung werden als vernachlässigbar betrachtet.

- Beschaffungskosten für die pH-Pufferlösungen

Die pH-Pufferlösungen, jeweils mit dem pH-Wert von 7 bzw. 9 zur Kalibrierung von pH-Elektroden, sind auf dem Markt zum Preis von je 15 Euro pro 250 ml erhältlich. Die spezifischen Gewichte werden von den betreffenden Herstellenden (aufgrund der unterschiedlichen Beimengungsanteile von Zitronensäure und Dinatriumphosphat) mit 1,019 g/cm³ (pH-Wert 7,0) sowie 1,005 g/cm³ (pH-Wert 9,0) angeführt. Daher ergeben sich rechnerisch Nettopreise von 58,88 Euro pro kg (pH-Wert 7,0) bzw. 59,70 Euro pro kg (pH-Wert 9,0).

¹³⁵ Vgl. Endress+Hauser (2021a).

4.2.3 Preise für Ölabscheidung mit Oil-Skimmer (Szenario 1)

- Beschaffungskosten für den Band-Ölabscheider

Der CNC Oil Skimmer für tiefe Becken mit Magnethalter F450 ist bei einschlägigen Fachhändlern und -händlerinnen für die Industrie zu einem Preis von 685 Euro erhältlich.

- Beschaffungskosten für den Abscheider für Oil Skimmer

Ergänzend zum CNC Oil Skimmer dient der Abscheider zum Separieren des KSS aus dem abgeführten Gemisch, so dass dieser in die Maschine zurückgeführt wird. Er ist bei denselben Händlern und Händlerinnen zu 95 Euro vorrätig.

- Beschaffungskosten für den Ersatz des Skimmerbands

Das Skimmerband hat als Verschleißteil eine Lebensdauer von etwa 1,5 Jahren und wird daher rechnerisch 0,667-mal pro Jahr ersetzt. Ein Ersatz-Skimmerband für den CNC Oil Skimmer F450 ist im Zubehörhandel für 51,95 Euro erhältlich.

4.2.4 Preise für Biozidzugabe (Szenario 2)

- Beschaffungskosten für das Biozid

Das eingesetzte Biozid ist ein Kombinationsprodukt zur Konservierung wassergemischter Kühlschmierstoffe und technischer Emulsionen. Es hat sowohl eine biozide als auch fungizide Wirkung und wird vom Hersteller beispielsweise in 10-kg-Kanistern zu einem Preis von 34,75 Euro pro kg angeboten.

4.2.5 Preise für Pasteurisierung (Szenario 3)

- Beschaffungskosten für die Temperatursonde

Die Temperatursonde, ein kompakter Temperaturtransmitter für den Industrieinsatz, wird vom herstellenden Unternehmen zu einem Listenpreis von 194 Euro angeboten.

- Beschaffungskosten für die SPS-Steuerung

Die SPS-Steuerung ist ein Produkt des führenden deutschen Herstellers in der Steuerungselektronik und besteht aus folgenden Komponenten: einer Kompakt-CPU (im Handel, hier bei einem Online-Shop mit umfassendem Angebot, für 576 Euro), einem Netzteil (82,80 Euro) sowie zwei Leistungsschützen (je 116,90 Euro).

- Beschaffungskosten für die Heizstäbe

Der Heizstab in Industrieausführung mit Thermostat, von dem zwei Geräte parallel in Betrieb sind, besitzt einen Mantel aus Incoloy. Von der Artikelserie der Heizstäbe mit einer Versorgung von 240 Volt Wechselstrom (eine Phase) hat der verwendete Heizstab eine für die Anlage optimale Eintauchlänge von 356 mm. Der Thermostat ist bei einer Länge von 276 mm auf 5 – 80 °C ausgelegt. Er ist zu einem Preis von 289,22 Euro erhältlich.

4.2.6 Preise für Entsorgungskosten der Geräte und Substanzen

Für die Kosten der Entsorgung werden, soweit verfügbar, entsprechende Durchschnittskosten für Entsorgungsprozesse aus ecoinvent zugeordnet.

Bei den Entsorgungskosten der Mengen an KSS (im Fall von Szenario 2 auch der Menge des Biozids, das dem KSS beigemischt ist) und Reinigungsflüssigkeit wurde in der Studie von Herrmann et al.¹³⁶ ein Mittelwert von 150 Euro/t verwendet, der durch Abfrage bei deutschen Entsorgern

¹³⁶ Vgl. Herrmann, C., et al. (2017), S. 52-55.

als Gate Fees, also Annahmepreis für Abfälle bei Entsorgern, zustande kam. Auch neuere Quellen liegen im Intervall von 120 – 180 Euro/m³, etwa die Quelle von helcotec Chemie & Technik¹³⁷, die von Entsorgungskosten pro m³ in Höhe von 145 Euro ausgeht. Daher wird ebenfalls in dieser Studie ein mittlerer Wert von 150 Euro/t verwendet. Für die Entsorgung des KSS und der Reinigungsflüssigkeit wurde ein Transport über eine durchschnittliche Entfernung von 100 km zum nächstgelegenen Entsorger in Deutschland zusätzlich berechnet und den Kosten der Entsorgung zugeschlagen.

Die pH-Pufferlösungen hingegen werden getrennt der Entsorgung zugeführt. Für die Kosten wird die entsprechende Kategorie aus ecoinvent einer Verbrennung von gefährlichem Abfall verwendet.¹³⁸ Eine aktuelle Anfrage bei einem Entsorgungsunternehmen in Norddeutschland (Stand 04.06.2024) lieferte überschlägig einen Durchschnittspreis von 1,525 Euro pro kg. Auch für die Entsorgung der pH-Pufferlösungen wurde ein Transport über eine durchschnittliche Entfernung von 100 km zusätzlich berechnet und den Kosten der Entsorgung zugeschlagen.

In den Fällen der zu entsorgenden Geräte (pH-Sonde und Messumformer) bei der pH-Messung in allen drei Maßnahmenzenarien, Bad-Ölabscheider mit Zubehör und Skimmerbändern in Szenario 1, Temperatursonde, SPS-Steuerung, Laptop und Heizstäbe in Szenario 3, sowie der zugehörigen Anschlussleitungen werden die Entsorgungskosten der übergeordneten Kategorie einer mechanischen Abfallbehandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten aus ecoinvent zugrunde gelegt.¹³⁹ Hierbei ist zu beachten, dass diese Kosten laut ecoinvent auch die Transportkosten für jeweils durchschnittliche Entfernungen zu dem Entsorgungsbetrieb, z. B. einer Müllverbrennungsanlage, beinhalten. In diesen Fällen wurden die Transportkosten zwischen Betrieb und Entsorgung nicht als zusätzliche

¹³⁷ Vgl. helcotec Chemie u. Technik GmbH (2023a).

¹³⁸ Bezeichnung der Kategorie in ecoinvent: Market for hazardous waste, for incineration.

¹³⁹ Bezeichnung der Kategorie in ecoinvent: Mechanical treatment transport WEEE.

Komponente berechnet, da sie bereits anteilig in den Preisen für die Entsorgung enthalten sind. Alle verwendeten Entsorgungskosten sind als spezifische Kosten in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Preise der Entsorgung in allen Szenarien

Substanz/Gerät	Preis in Euro/kg	Kategorie der Entsorgung aus Ecoinvent (Proxy)
Kühlschmierstoff	█ Euro	Treatment of wastewater, average
Reinigungsflüssigkeit		
Biozid		
pH-Pufferlösung 7,0	1,525 Euro	Market for hazardous waste, for incineration (basierend auf dem Angebot eines deutschen Entsorgungsunternehmens)
pH-Pufferlösung 9,0		
pH-Sonde	█ Euro	Market for waste electric and electronic equipment
pH-Messumformer		
Anschlussleitungen pH-Sonde		
Band-Ölabscheider		
Zubehör Bandabscheiderwanne		
Ersatz Skimmerband		
Temperatursonde		
SPS-Steuerung (CPU, Netzteil, 2 Leistungsschütze)		
Laptop		
2 Heizstäbe		
Anschlussleitungen Netzteil		

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

5 ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG

5.1 Ergebnisse der ökologischen Bewertung

Der Verbrauch an natürlichen Ressourcen (Energie, Rohstoffe, Wasser, Boden) wird – bezogen auf die funktionelle Einheit von 34.909 Werkstücken in einem Jahr – für alle vier Szenarien über den gesamten Lebenszyklus der Werkzeugmaschine hinweg berücksichtigt. Diese Bewertung erfolgt anhand von fünf Umweltindikatoren – Treibhausgaspotenzial, Kumulativer Energieaufwand, Kumulativer Rohstoffaufwand, Wasserverbrauch und Flächeninanspruchnahme – für die verschiedenen Szenarien. Die Gesamtergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit – FE)

Wirkungsindikator	Referenzeinheit je FE	Referenz-Szenario	Szenario 1 (Ölab-scheidung)	Szenario 2 (Biozid-zugabe)	Szenario 3 (Pasteurisierung)
Treibhausgaspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -eq	2.232,5	1.698,0	1.793,4	2.147,5
KEA	MJ	28.730,7	21.930,9	23.246,2	30.186,0
KRA	kg	1.409,8	1.189,6	1.221,4	2.130,7
Wasserverbrauch	m ³	15,1	11,0	11,6	13,7
Flächeninanspruchnahme	m ² *a	173,5	125,9	133,0	152,4

Die Lebenszyklusphasen Rohstoffgewinnung, Produktherstellung, Nutzung (inkl. Wartungen) und Entsorgung sowie die wichtigsten Transportprozesse zwischen diesen Lebenszyklusphasen wurden für die einzelnen Szenarien in drei Phasen unterteilt, in die Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung (die Zugehörigkeiten der Geräte und Prozesse sind in Tabelle 10, Seite 66, dargestellt).

Abbildung 8 zeigt die Gesamtergebnisse, wobei die Daten auf das Referenzszenario normalisiert sind (d. h., die Referenzdaten sind auf 100 % normiert). Insgesamt zeigt das Szenario 1 (Ölabscheidung) bei allen Wirkungsindikatoren die geringsten Umweltauswirkungen, gefolgt vom Szenario 2 (Bioizidzugabe). Die größte Reduktion der Umweltauswirkungen im Vergleich zum Referenzszenario erreicht die Ölabscheidung im Wasser- und Flächenverbrauch mit einem Rückgang von jeweils 27 %, die geringste Reduktion wird mit 16 % beim kumulierten Rohstoffaufwand erreicht. Die Bioizidzugabe erreicht im Vergleich zum Referenzszenario die größte Reduktion der Umweltauswirkungen durch einen 23 % geringeren Wasser- und Flächenverbrauch sowie die geringste Reduktion mit 13 % beim kumulierten Rohstoffaufwand. Das Szenario 3 (Pasteurisierung) hat einen um 51 % höheren kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) und einen um 5 % höheren kumulierten Energieaufwand (KEA) als das Referenzszenario, was durch den vermehrten Einsatz von Geräten und deren Stromverbrauch begründet wird.

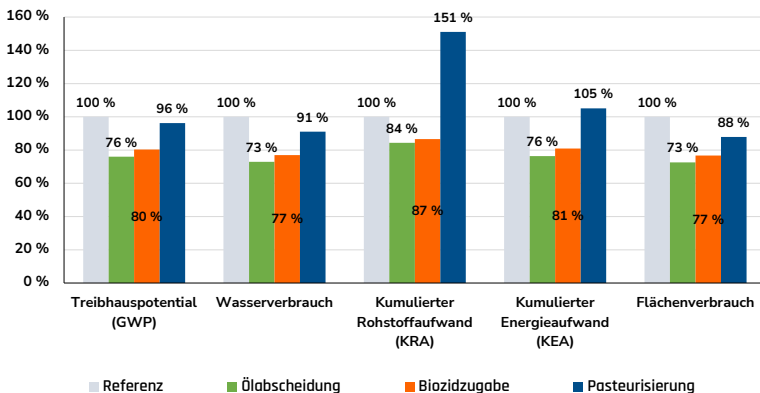


Abbildung 8: Ergebnisse der ökologischen Bewertung (pro funktionelle Einheit, FE)^{140,141}

¹⁴⁰ Eigene Darstellung.

¹⁴¹ Normalisierte Abbildung: Die Werte sind auf das Referenzszenario normalisiert (Referenzszenario ist bei 100 %).

5.1.1 Treibhausgaspotenzial

Die Treibhausgasemissionen wurden mithilfe des Indikators „IPCC 2021“ berechnet, basierend auf dem Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) von 2021.¹⁴² Die Emissionen werden in CO₂-Äquivalenten (CO_{2-eq}) angegeben. Die Ergebnisse der Treibhausgaspotenziale (englisch: Global Warming Potential, GWP) sind in Tabelle 13 und Abbildung 9 dargestellt.

Tabelle 13: Ergebnisse Treibhausgaspotenzial je Lebenswegphase (in kg CO_{2-eq}/FE)

		Treibhausgaspotenzial (kg CO _{2-eq} /FE)
Herstellung	Referenz-Szenario	1.058,1
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	766,5
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	805,7
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	884,8
Nutzung	Referenz-Szenario	3,4
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	95,7
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	95,2
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	426,4
Entsorgung	Referenz-Szenario	1.171,0
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	835,8
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	890,2
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	836,3
Gesamt	Referenz-Szenario	2.232,5
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	1.698,0
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	1.793,4
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	2.147,5

¹⁴² Vgl. IPCC (2021).

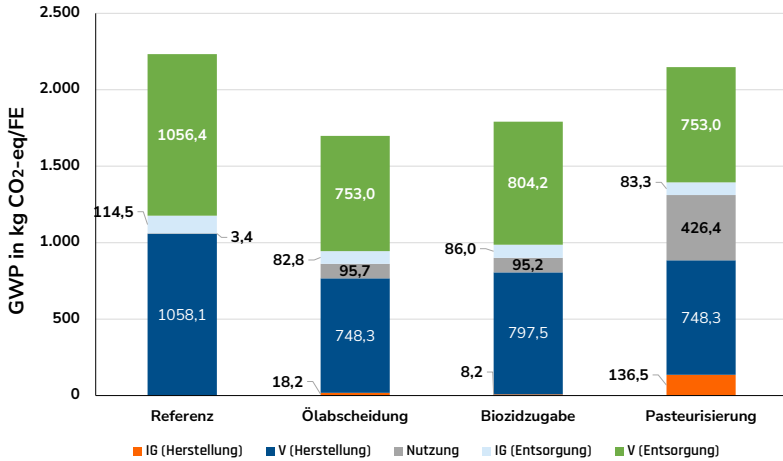


Abbildung 9: Treibhausgaspotenzial für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in kg CO₂-eq/FE)¹⁴³

Die Ergebnisse zeigen, dass die Treibhausgasemissionen in allen Szenarien über den gesamten Lebenszyklus hinweg geringer sind als im Referenzszenario. Die geringsten Treibhausgasemissionen weist das Szenario 1 (Ölabscheidung) auf, mit 24 % weniger Emissionen als das Referenzszenario. Dies entspricht einer Einsparung von etwa 534 kg CO₂-Äquivalenten pro funktionelle Einheit. Die zweitgeringsten Treibhausgasemissionen weist das Szenario 2 (Biozidzugabe) mit 20 % weniger Emissionen als das Referenzszenario auf, gefolgt vom Szenario 3 (Pasteurisierung) mit 4 % weniger Emissionen.

Die Emissionen fallen in allen vier Szenarien hauptsächlich in der Herstellung und Entsorgung der Verbrauchsgüter (V), also der KSS und Reinigungsflüssigkeit, an. Sowohl die Ölabscheidung als auch die Biozidzugabe und die Pasteurisierung führen zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen im Vergleich zum Referenzszenario. Die größte Reduktion der Treibhausgase findet in der Pasteurisierung statt, gefolgt von der Biozidzugabe. Die Reduktion der Treibhausgase im Vergleich zum Referenzszenario ist

¹⁴³ Eigene Darstellung.

auf den verminderten Einsatz von KSS und Reinigungsflüssigkeit durch die standzeitverlängernden Maßnahmen zurückzuführen. Damit müssen weniger KSS und Reinigungsflüssigkeit hergestellt, transportiert und entsorgt werden, was sich direkt positiv auf die Emissionen auswirkt. Die Herstellung der Investitionsgüter hat nur eine geringe Auswirkung auf die Treibhausgase der einzelnen Szenarien, gefolgt von der Entsorgung. Die Emissionen der Nutzungsphase sind vor allem bei der Pasteurisierung, aber auch Ölabscheidung und Biozidzugabe relevant, da Sensorik und zusätzliche Geräte für die standzeitverlängernden Maßnahmen eingesetzt werden, und diese mehr Strom verbrauchen als im Referenzszenario.

Die Emissionen fallen in allen Szenarien zu fast gleichen Teilen hauptsächlich in der Entsorgung und Nutzung an, wobei die Emissionen der Entsorgung im Referenzszenario ein wenig höher sind als die Emissionen der Nutzung, im Gegensatz zu den anderen drei Szenarien, wo die Emissionen der Nutzung etwas höher liegen. Somit findet die größte Reduktion von Emissionen im Vergleich zum Referenzszenario für Szenario 1, 2 und 3 im Bereich der Entsorgung statt, was auf den geringeren Entsorgungsaufwand des Kühlschmierstoffs und der Reinigungsflüssigkeit (vor allem den Stromverbrauch der Beseitigung), bedingt durch den verringerten Verbrauch, zurückzuführen ist. In Szenario 1 (Ölabscheidung) entstehen dadurch 335 kg CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit weniger als in Referenzszenario, in Szenario 2 (Biozidzugabe) 280 kg CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit weniger und in Szenario 3 (Pasteurisierung) 334 kg CO₂-Äquivalente pro funktioneller Einheit weniger.

Abbildung 10 stellt das Treibhausgaspotenzial für jedes Szenario über den Lebenszyklus aufgeteilt nach den einzelnen Prozessbeiträgen dar. Im Folgenden werden die Treibhausgasemissionen der relevanten Prozessbeiträge für jedes Szenario genauer beschrieben.

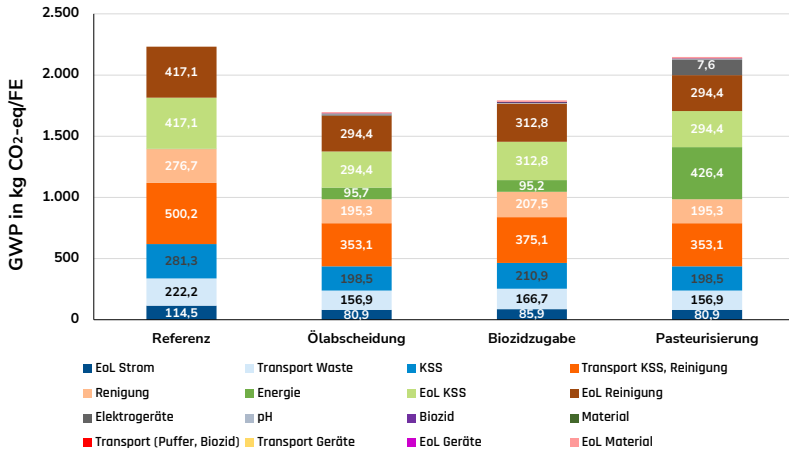


Abbildung 10: Treibhausgaspotenzial verteilt über den Lebenszyklus (in kg CO₂-eq/FE)¹⁴⁴

Durch den Prozess der Ölabscheidung werden die Treibhausgasemissionen des Referenzszenarios in den Bereichen Transport, Nutzung, Abfalltransport, Entsorgung sowie Stromverbrauch der Entsorgung (Verdampfung) und des Wechsels des KSS und der Reinigungsflüssigkeit um 655 kg CO₂-Äquivalente reduziert, da eine geringere Menge an KSS und Reinigungsflüssigkeit im Einsatz ist. Jedoch entstehen auch neue Emissionen durch Herstellung, Transport, Stromverbrauch und Entsorgung des Ölabscheiders, der pH-Sensorik und Pufferlösung, die ca. 121 kg CO₂-Äquivalente ausmachen.

Durch den Prozess der Biozidzugabe werden ebenfalls die Treibhausgasemissionen des Referenzszenarios in den Bereichen Transport, Nutzung, Abfalltransport, Entsorgung sowie Stromverbrauch der Entsorgung (Verdampfung) und des Wechsels des KSS und der Reinigungsflüssigkeit reduziert, und zwar um ca. 557 kg CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit. Jedoch entstehen auch neue Emissionen durch Herstellung, Transport und Entsorgung des Biozids, der pH-Sensorik und Pufferlösung sowie des

¹⁴⁴ Eigene Darstellung.

Stromverbrauchs der pH-Sensorik, die ca. 118 kg CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit ausmachen.

Das Gleiche trifft auch auf den Prozess der Pasteurisierung zu, wodurch ebenfalls die Treibhausgasemissionen des Referenzszenarios in den Bereichen Transport, Nutzung, Abfalltransport, Entsorgung sowie Stromverbrauch der Entsorgung (Verdampfung) und des Wechsels des KSS und der Reinigungsflüssigkeit reduziert werden, und zwar um ca. 655 kg CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit. Jedoch entstehen bei dem Prozess der Pasteurisierung erhebliche Treibhausgasemissionen durch den Stromverbrauch der Heizstäbe, des Laptops, der Messtechnik und der pH-Sensorik sowie durch Herstellung, Transport und Entsorgung dieser Geräte, Sensoren und der Pufferlösung, die ca. 570 kg CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit ausmachen.

Es lässt sich feststellen, dass die Herstellung und Entsorgung des KSS und der Reinigungsflüssigkeit (Verbrauchsgüte – V) bei allen Szenarien den größten Teil zu den Treibhausgasemissionen beitragen (bei der Pasteurisierung ist auch der Energiebedarf für Maschinen relevant). Durch den Einsatz von Maßnahmen in allen drei Szenarien kann eine sinnvolle Reduzierung der Emissionen aufgezeigt werden. Allerdings ist, wie in der Abbildung 10 zu erkennen, ein Anstieg der Emissionen von Investitionsgütern zu verzeichnen, insbesondere für das Szenario Pasteurisierung. Der Energieverbrauch der Elektrogeräte und Sensoren trägt bei dem Referenzszenario, bei der Ölabscheidung und Biozidzugabe nur wenig zu den Treibhausgasemissionen bei, jedoch ist dies der größte Emissionsbereich der Pasteurisierung. Dies liegt an dem erhöhten Einsatz von Geräten und Messtechnik. Die Herstellung, der Transport und die Entsorgung der pH-Sensorik, der pH-Pufferlösung, des Biozids sowie der Geräte tragen nur mit einem geringen Teil zu den Treibhausgasemissionen bei Abbildung 10.

5.1.2 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Für die Analyse des kumulierten Energiebedarfs wird die Methodik der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand (KEA)“¹⁴⁵ angewendet. Diese Methodik zeigt die aggregierten Ergebnisse der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase. Der KEA wird üblicherweise nach Primärenergieträgern gruppiert angegeben, unterteilt in KEA regenerativ und KEA erschöpflich (vgl. Abbildung 11 und Tabelle 14).

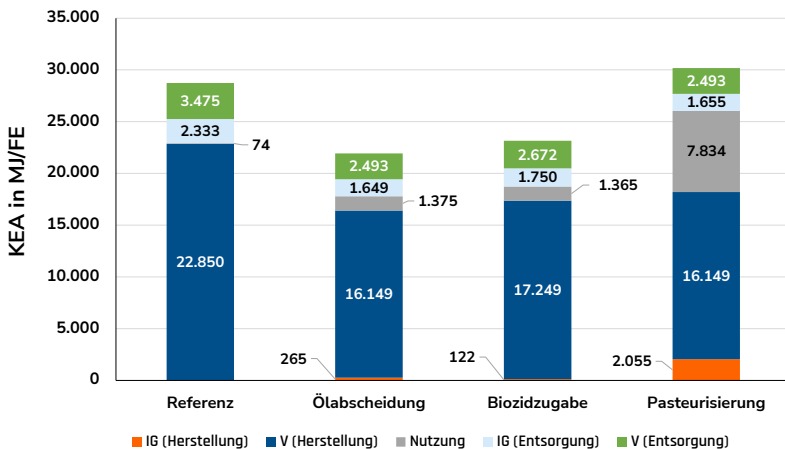


Abbildung 11: Kumulierter Energieaufwand (KEA) für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in MJ/FE)¹⁴⁶

Aus der Analyse ergibt sich, dass nur zwei der drei Szenarien insgesamt einen geringeren kumulierten Energieaufwand (erschöpflich und regenerativ) aufweisen als das Referenzszenario. Den geringsten gesamten kumulierten Energieaufwand (erschöpflich und regenerativ) hat das Szenario 1 (Ölabscheidung) mit einem um 24 % geringeren Energieaufwand als das Referenzszenario, was einer Energieeinsparung von 6.800 MJ je funktioneller Einheit entspricht. Darauf folgt Szenario 2 (Biozidzugabe) mit einem um 19 % geringeren gesamten kumulierten Energieaufwand (erschöpflich und regenerativ), was einer Energieeinsparung von 5.485 MJ je

¹⁴⁵ Vgl. VDI 4600:2021-01.

¹⁴⁶ Eigene Darstellung.

funktioneller Einheit entspricht. Szenario 3 (Pasteurisierung) schneidet schlechter ab als das Referenzszenario, mit einem um 5 % höheren Energieaufwand, was einem Energieanstieg von 1.455 MJ je funktioneller Einheit entspricht.

Tabelle 14: Kumulierter Energieaufwand (KEA) je Lebenswegphase (in MJ/FE)

		KEA, erschöpflich (MJ/FE)	KEA, regenerativ (MJ/FE)
Herstellung	Referenz-Szenario	20.234,7	2.614,8
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	14.543,4	1.870,8
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	15.396,6	1.974,8
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	16.147,2	2.057,0
Nutzung	Referenz-Szenario	55,5	18,1
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	1.347,7	27,3
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	1.339,8	24,7
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	6.530,9	1.302,6
Entsorgung	Referenz-Szenario	5.287,5	520,1
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	3.772,4	369,3
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	4.027,9	393,4
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	3.778,2	370,1
Gesamt	Referenz-Szenario	25.577,7	3.153,0
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	19.663,5	2.267,4
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	20.851,8	2.394,3
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	26.456,3	3.729,7

Die Verteilung des kumulierten Energieaufwands auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen zeigt ebenfalls, dass die Herstellphase bei allen vier Szenarien eine Schlüsselrolle spielt. Dies ist vor allem auf die Herstellung (und den Transport) des KSS und der Reinigungsflüssigkeit zurückzuführen. Der Energieaufwand der Entsorgungsphase entsteht hauptsächlich durch die Verdampfung von KSS und Reinigungsflüssigkeit, um Öl und Wasser zur weiteren Entsorgung zu trennen.

Die Anteile erschöpflicher (fossile und nukleare Energie sowie Energie aus Biomasse/Primärwald) und regenerativer Energiequellen (Wind- und Solarenergie sowie Energie aus Biomasse und Wasserkraft) liegen in allen Szenarien in einem Verhältnis zwischen 87 % – 91 % bzw. 13 % – 9 %.

Es kann festgestellt werden, dass ähnlich wie bei der Treibhausgaspotenzial-Analyse die Maßnahme eine positive Auswirkung auf die Verringerung der Umweltemissionen von Verbrauchsgütern (V) hat, das Pasteurisierungsszenario jedoch Emissionen im Zusammenhang mit der elektrischen Energie (Nutzung) aufgrund der im Prozess verwendeten Maschinen verursacht.

5.1.3 Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

Zur Berechnung des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) wird die VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 herangezogen. Die Ergebnisse dieser Studie werden in vier verschiedene Kategorien des KRA unterteilt: Energierohstoffe, Metallrohstoffe, Mineralrohstoffe, Steine und Erde sowie biotischer Rohstoffaufwand (vgl. Tabelle 15). Die zusammengefassten Ergebnisse der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sind in Tabelle 16 und Abbildung 12 dargestellt.

Tabelle 15: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) nach KRA-Kategorien (kg/FE)

KRA-Kategorien	Referenz-Szenario	Szenario 1 (Ölabscheidung)	Szenario 2 (Biozidzugabe)	Szenario 3 (Pasteurisierung)
KRA, Energierohstoffe (kg/FE)	312,16	262,76	273,15	505,88
KRA, Metallrohstoffe (kg/FE)	214,83	263,98	262,92	677,38
KRA, Mineralrohstoffe, Steine und Erde (kg/FE)	1.198,86	931,06	963,57	1.473,13
KRA, Biotisch. Rohstoffaufwand (kg/FE)	20,89	17,80	18,54	37,70
KRA, gesamt (kg/FE)	1.746,75	1.475,99	1.518,18	2.694,09

Wie auch beim kumulierten Energieaufwand zeigen die Ergebnisse, dass nur die Szenarien 1 (Ölabscheidung) und 2 (Biozidzugabe) einen geringeren kumulierten Rohstoffaufwand aufweisen als das Referenzszenario, was einer Rohstoffeinsparung von 271 kg bzw. 229 kg je funktioneller Einheit entspricht. Das Szenario 3 (Pasteurisierung) hat einen um 54 % höheren kumulierten Rohstoffaufwand als das Referenzszenario, was etwa 947 kg Rohstoff mehr je funktioneller Einheit gleichkommt. Dabei erhöht sich der Verbrauch an Rohstoffen in allen vier KRA-Kategorien von 40 % bei den Energierohstoffen bis 216 % bei den Metallrohstoffen. Der große Rohstoffaufwand in der Herstellungsphase der Pasteurisierung ist bedingt durch den hohen Geräteeinsatz, für deren Herstellung vor allem Metall und Mineralrohstoffe verarbeitet werden. Der erhebliche Rohstoffaufwand in der Herstellungsphase aller vier Szenarien stammt von der Herstellung des KSS (Rohöl als Bestandteil) sowie vom Transport des KSS und der Reinigungsflüssigkeit (Hauptrohstoffe des Transports sind Mineralrohstoffe, Steine und Erde sowie Rohöl für Straßenbau und Antriebsstoff). Der geringe Rohstoffaufwand der Ölabscheidung ist auf den geringeren KSS- und Reinigungsmittelverbrauch (und damit auch Transport) zurückzuführen. Jedoch führt die verwendete Sensorik in der Ölabscheidung zu einem höheren Verbrauch an Metallrohstoffen als im Referenzszenario, was einem erhöhten Metallverbrauch von knapp 50 kg Rohstoff je funktioneller Einheit entspricht.

Die Verteilung des kumulierten Rohstoffaufwands auf die verschiedenen Lebenszyklusphasen hebt die Herstellungsphase bei allen vier Szenarien als Schlüsselrolle hervor und beläuft sich auf 65 % (Pasteurisierung) bis 73 % (Referenzszenario), wobei die Nutzungsphase bei der Pasteurisierung mit 22 % ebenfalls einen deutlichen Einfluss hat (Tabelle 16). Der hohe Rohstoffaufwand in der Herstellungsphase liegt an dem Transport der KSS, Reinigungsflüssigkeit und pH-Pufferlösung, wofür Mineralrohstoffe, Steine und Erde (Straßenbau) sowie Rohöl (Energierohstoff) eingesetzt werden, aber auch an der Herstellung von KSS (das ca. zur Hälfte aus Mineralöl besteht) und Reinigungsflüssigkeit (die sich überwiegend aus Wasser zusammensetzt).

Tabelle 16: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) je Lebenswegphase (kg/FE)

		Wirkungsindikator KRA, gesamt (kg/FE)
Herstellung	Referenz-Szenario	1.274,80
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	1.062,88
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	1.076,78
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	1.762,37
Nutzung	Referenz-Szenario	6,50
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	69,09
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	68,17
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	587,04
Entsorgung	Referenz-Szenario	465,45
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	343,62
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	373,23
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	344,67
Gesamt	Referenz-Szenario	1.746,75
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	1.475,59
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	1.518,18
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	2.694,09

Die in der Abbildung 12 dargestellten Ergebnisse zeichnen ein differenziertes Bild in Bezug auf den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) der Szenarien und über alle drei bewerteten Phasen hinweg – Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Im Vergleich zum Referenzszenario, bieten die Szenarien 1 (Ölabscheidung) und 2 (Biozidzugabe) eine signifikante Reduktion des KRA.

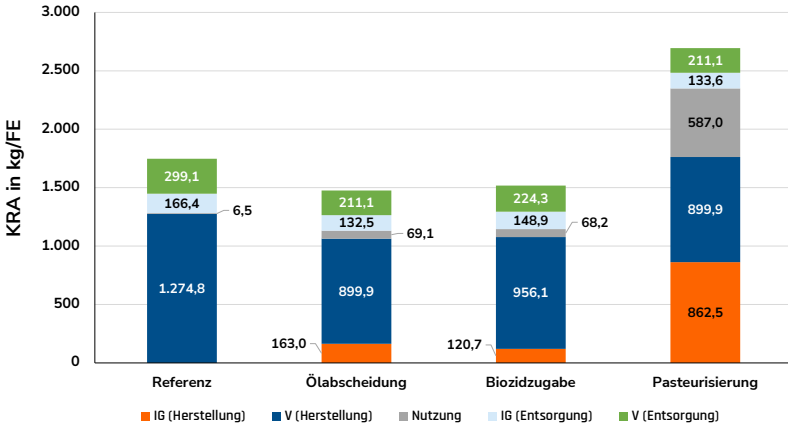


Abbildung 12: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in kg/FE)¹⁴⁷

So zeigt Szenario 1 (Ölabscheidung) eine Reduktion des KRA um 16 % im Vergleich zum Referenzszenario. Es illustriert die Effizienzsteigerung durch die Ölabscheidung, wodurch die Lebensdauer der Kühlschmierstoffe verlängert wird und somit weniger Rohstoffe im Herstellungsprozess benötigt werden. Jedoch steigt der KRA in der Herstellungsphase bei den Investitionsgütern (IG) und in der Nutzungsphase.

Szenario 2 (Biozidzugabe) erreicht eine Reduktion von 13 %, was ebenfalls den positiven Effekt auf den Ressourcenverbrauch verdeutlicht. Hier verlängert die gezielte Zugabe von Bioziden die Nutzungsdauer von Kühlschmierstoffen und trägt so zur Reduktion des KRA bei. Auch hier steigt KRA in der Herstellungsphase bei den Investitionsgütern und in der Nutzungsphase, jedoch mit leicht verschobenen Werten untereinander.

Beim Szenario 3 (Pasteurisierung) zeigt sich ein anderes Bild, nämlich ein Anstieg des KRA um 51 % gegenüber dem Referenzszenario. Dieser deutlich höhere Wert lässt sich durch den zusätzlichen Einsatz von Spezialge-

¹⁴⁷ Eigene Darstellung.

räten, wie Temperatursonden und Heizstäben, erklären. Allein im Herstellungsprozess bedingt der hohe Geräteinsatz einen Mehrverbrauch an Metall- und Mineralrohstoffen, womit der KRA insgesamt auf 2694 kg ansteigt.

Über die gesamten Betrachtungen der KRA hinweg zeigt sich, dass die Szenarien 1 und 2 trotz der anfangs höheren Ausgaben für notwendige Installationen und den Betrieb von beispielsweise pH-Sensorik letztlich zu einer Reduzierung des kumulierten Rohstoffaufwands führen. Diesbezüglich unterscheidet sich Szenario 3 erheblich von allen Szenarien. Der höhere KRA kann sowohl bei den Investitionsgütern, bei den Verbrauchsgütern (V) in der Herstellungsphase als auch in der Nutzungsphase die KRA-Einsparungen bei der Entsorgung nicht ausgleichen. Damit wird deutlich, welche Szenarien sich vorteilhaft auf den KRA auswirken.

Als wesentliches Fazit lässt sich ziehen, dass die Nutzungsphase bei allen betrachteten Szenarien die Hauptquelle des KRA darstellt und zwischen 66 % (Pasteurisierung) und 75 % (Referenzszenario) des Gesamtaufwandes ausmacht, wobei die Pasteurisierung auch in der Herstellungsphase, vor allem aber in der Nutzungsphase, beachtliche Ressourcen beansprucht.

5.1.4 Wasserverbrauch

Die in GaBi implementierte Methode „ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Freshwater Consumption“¹⁴⁸ wird für die Analyse des Wasserverbrauchs verwendet. Die Ergebnisse des Wasserverbrauchs für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung sind in Tabelle 17 und Abbildung 13 dargestellt.

¹⁴⁸ Vgl. Huijbregts, M. et al. (2017), S. 139.

Tabelle 17: Wasserverbrauch je Lebenswegphase (in m³/FE)

		Wasserverbrauch (m ³ /FE)
Herstellung	Referenz-Szenario	13,86
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	9,93
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	10,48
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	11,03
Nutzung	Referenz-Szenario	0,02
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	0,21
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	0,21
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	1,82
Entsorgung	Referenz-Szenario	1,21
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	0,87
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	0,92
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	0,88
Gesamt	Referenz-Szenario	15,1
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	11,0
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	11,6
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	13,7

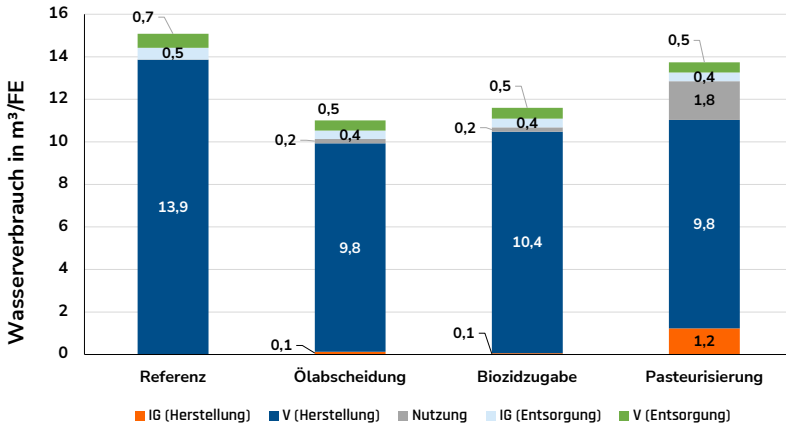


Abbildung 13: Wasserverbrauch für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in m³/FE)¹⁴⁹

¹⁴⁹ Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Szenarien einen geringeren Wasserverbrauch aufweisen als das Referenzszenario. Szenario 1 (Ölabscheidung) hat den geringsten Wasserverbrauch mit einer Reduktion von 27 %, gefolgt von Szenario 2 (Biozidzugabe) mit 23 % und Szenario 3 (Pasteurisierung) mit 9 %, was einer Wassereinsparung von respektiven 4,081 m³, 3,476 m³ und 1,348 m³ je funktioneller Einheit entspricht. Die höheren Werte beim Szenario 3 lassen sich auf den höheren Anteil der Investitionsgüter (IG) in der Herstellungsphase zurückführen (Wasseraufbereitung und -reinigung). Außerdem hat die Pasteurisierung einen deutlich höheren Anteil des Wasserverbrauchs in der Nutzungsphase, verglichen mit den anderen Szenarien.

Betrachtet man die Verteilung des Wasserverbrauchs in den verschiedenen Lebenszyklusphasen, zeigt sich zudem, dass auch bei diesem Umweltindikator die Verbrauchsgüter bei allen vier Szenarien eine Schlüsselrolle spielen. Mit 84 % bis 92 % stellt die Herstellung der Verbrauchsgüter die Lebenszyklusphase dar, in der das meiste Wasser verbraucht wird, gefolgt von der Lebenszyklusphase der Entsorgung. Der Wasserverbrauch, der den Verbrauchsgütern zuzurechnen ist, ist vor allem auf den Wasseranteil der Reinigungsflüssigkeit zurückzuführen, gefolgt von dem Wasseranteil im KSS, dem Stromverbrauch der Geräte und dem Transport (Transportinfrastruktur) des KSS und der Reinigungsflüssigkeit. Das Referenzszenario hat von allen vier Szenarien den größten Wasserverbrauch bei der Entsorgung mit 8 %, was auf den höheren Verbrauch an Reinigungsmittel und KSS und damit deren Entsorgungsprozess der Verdampfung (Kühlwasser, Reinigung) zurückzuführen ist. Der Wasserverbrauch in der Lebenszyklusphase Herstellung wird nur bei der Pasteurisierung deutlich, wo er einen Anteil von knapp 9 % ausmacht. Dies ist auf den Wasserverbrauch zurückzuführen, der bei der Verarbeitung von Metallen und der Herstellung von Geräten und Sensorik notwendig ist.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass insbesondere die Szenarien der Ölabscheidung und der Biozidzugabe trotz initial höherer Investitionen für die Instandhaltung und den Betrieb der notwendigen Technologie, wie der

pH-Sensorik, eine deutliche Effizienzsteigerung in Bezug auf den Wasserverbrauch erzielen und somit langfristig zu Einsparungen führen. Hier unterscheidet sich das Szenario der Pasteurisierung merklich, dessen erhöhter Verbrauch in verschiedenen Phasen nicht durch Einsparungen in anderen Bereichen ausgeglichen werden kann, was die Bedeutung einer sorgfältigen Abwägung der einzelnen Szenarien unterstreicht.

5.1.5 Flächeninanspruchnahme

Zur Bestimmung der Flächennutzung wurden die entsprechenden Elementarflüsse in m^2 und Jahr pro funktioneller Einheit ($\text{m}^2 \cdot \text{a} / \text{FE}$) gemäß der ökologischen Bilanzierung nach VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 berechnet. Die Quantifizierung basierte auf Einträgen aus der ecoinvent-Datenbank.¹⁵⁰ Dabei wurde die Kategorie „Landnutzung“ verwendet, wobei die temporäre Nutzung gemäß der VDI-Richtlinie 4800 ausgeschlossen wurde. Der Flächenverbrauch wird unterteilt in Flächenverbrauch von Landwirtschaftsflächen und Siedlungsflächen (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Flächeninanspruchnahme nach Kategorien (in $\text{m}^2 \cdot \text{a} / \text{FE}$)

Kategorien Flächeninanspruchnahme	Referenz- Szenario	Szenario 1 (Ölabscheidung)	Szenario 2 (Biozidzugabe)	Szenario 3 (Pasteurisierung)
Flächenverbrauch – Landwirtschaftsflächen ($\text{m}^2 \cdot \text{a} / \text{FE}$)	144,53	104,43	110,42	126,2
Flächenverbrauch – Siedlungsflächen ($\text{m}^2 \cdot \text{a} / \text{FE}$)	28,94	21,47	22,61	26,22
Flächenverbrauch ($\text{m}^2 \cdot \text{a} / \text{FE}$), gesamt	173,47	125,9	133,03	152,42

Die zusammengefassten Ergebnisse für die Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sind in Abbildung 14 und Tabelle 19 dargestellt.

¹⁵⁰ Vgl. Wernet, G. et al. (2016).

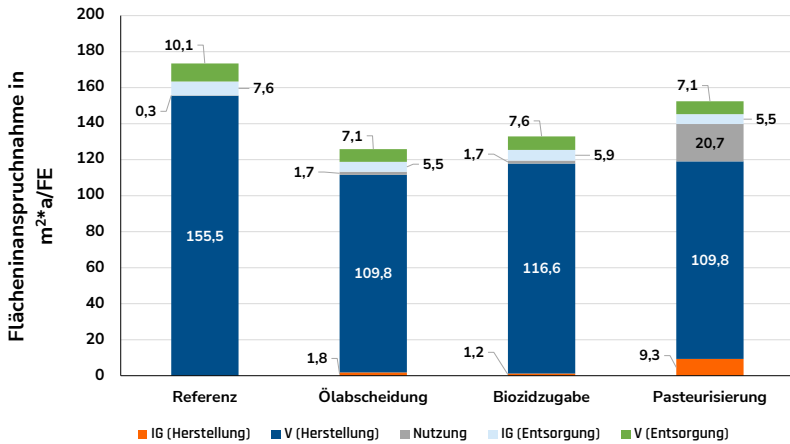


Abbildung 14: Flächeninanspruchnahme für Investitionsgüter (IG) und Verbrauchsgüter (V) (in $m^2 \cdot a/FE$)¹⁵¹

Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Szenarien einen geringeren Flächenverbrauch über den Lebenszyklus hinweg aufweisen als das Referenzszenario. In den drei Szenarien werden über den Lebenszyklus hinweg etwa 27 % bis 12 % weniger Fläche je funktioneller Einheit benötigt, was bei der Ölabscheidung einer Reduktion von $48 m^2$ pro funktioneller Einheit, bei der Biozidzugabe von $41 m^2$ pro funktioneller Einheit und bei der Pasteurisierung von $21 m^2$ pro funktioneller Einheit entspricht. Dabei hat das Szenario 1 (Ölabscheidung) den geringsten Flächenverbrauch, gefolgt von Szenario 2 (Biozidzugabe) und Szenario 3 (Pasteurisierung).

Der hohe Flächenverbrauch, der durch die Verbrauchsgüter hervorgerufen wird, ist auf die hohe Herstellung und den Transport von KSS und Reinigungsflüssigkeit zurückzuführen. Dafür werden vor allem Dauerkulturland und Waldgebiet, aber auch Mülldeponien, Grünland, Industriegebiet, Gewässer, Weideland, Meeresboden für Bohrungen und Bergbau, Verkehrs-

¹⁵¹ Eigene Darstellung.

fläche und Stadtgebiete in Anspruch genommen, weshalb die Flächeninanspruchnahme durch den höheren Einsatz an KSS und Reinigungsflüssigkeit im Vergleich zu den anderen Szenarien am höchsten ist.

Tabelle 19: Flächeninanspruchnahme je Lebenswegphase (in m²*a/FE)

		Flächenverbrauch (m ² *a/FE)
Herstellung	Referenz-Szenario	155,5
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	111,6
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	117,8
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	119,1
Nutzung	Referenz-Szenario	0,3
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	1,7
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	1,7
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	20,7
Entsorgung	Referenz-Szenario	17,7
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	12,6
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	13,4
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	12,6
Gesamt	Referenz-Szenario	173,5
	Szenario 1 (Ölabscheidung)	125,9
	Szenario 2 (Biozidzugabe)	133,0
	Szenario 3 (Pasteurisierung)	152,4

Es ist zu betonen, dass trotz reduzierten Flaschenverbrauchs, in den Szenarien mit zusätzlichen Maßnahmen, die Verbrauchsgüter dennoch den signifikantesten Anteil der Flächeninanspruchnahme darstellen. In Szenario 3 werden die geringeren Flächenverbräuche durch die Verbrauchsgüter, vor allem durch die Investitionsgüter in der Herstellungsphase der zusätzlichen Geräte, sowie während der Nutzung, zum Teil wieder ausgeglichen.

5.1.6 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht eine Bewertung der Variabilität bzw. Stabilität des ökologischen Vergleichs und der zugrundeliegenden Annahmen. Sie dient ebenfalls als Grundlage für das Verständnis potenzieller ökologischer Hotspots, die zur Verringerung ökologischer Auswirkungen verbessert werden könnten. Bei der ökologischen Bewertung liegt die Annahme zugrunde, dass die erzielbare Standzeitverlängerung durch jede der Maßnahmen der Szenarien sowohl ein oder zwei Wochen länger (+1/+2) als auch kürzer (-1/-2) als im Referenzszenario angenommen werden kann. Die Bandbreiten der Standzeiten sind aus der Literatur nur grob bekannt. Wie aus den vorherigen Kapitel ersichtlich, sind der Verbrauch und die Entsorgung der KSS und der Reinigungsflüssigkeit die wesentlichen Treiber der ökologischen Bewertung, sodass der kritische Parameter für verringerte ökologische Auswirkungen die Standzeitverlängerung darstellt.

In den folgenden Abbildungen wird deutlich, dass eine Standzeitverlängerung um eine bzw. zwei Wochen, also die Standzeit von KSS und der Reinigungsflüssigkeit von fünf bzw. sechs Wochen anstelle von vier Wochen, für alle ökologischen Bewertungen bereits vorteilhafter gegenüber der Standardzeit ist, jedoch nicht für alle Szenarien auch vorteilhafter als das Referenzszenario.

Im Fall des GWPs wirkt sich eine Standzeitverlängerung von einer bzw. zwei Wochen bei den drei Szenarien vorteilhaft gegenüber dem Referenzszenario aus. Durch die Ölabscheidung können bei einer Standzeitverlängerung von einer Woche 622 kg CO₂-Äquivalente eingespart werden, bei zwei Wochen Standzeitverlängerung 700 kg CO₂-Äquivalente. Durch die Biozidzugabe können bei einer Standzeitverlängerung von einer Woche 538 kg CO₂-Äquivalente eingespart werden, bei zwei Wochen Standzeitverlängerung 626 kg CO₂-Äquivalente und bei der Pasteurisierung respektive 172 und 250 kg CO₂-Äquivalente.

Bei einer Standzeitverringerung von einer bzw. zwei Wochen, also einer Verringerung der Standzeit von vier auf drei bzw. zwei Wochen, sind die Ölabscheidung und die Biozidzugabe weiterhin vorteilhafter gegenüber dem Referenzszenario. Auch die Pasteurisierung hat einen geringeren GWP bei einer Woche Standzeitverringerung als das Referenzszenario, jedoch erhöht sich das GWP um 125 kg CO₂-Äquivalente bei einer Standzeitverringerung von zwei Wochen im Vergleich zum Referenzszenario (vgl. Abbildung 15).

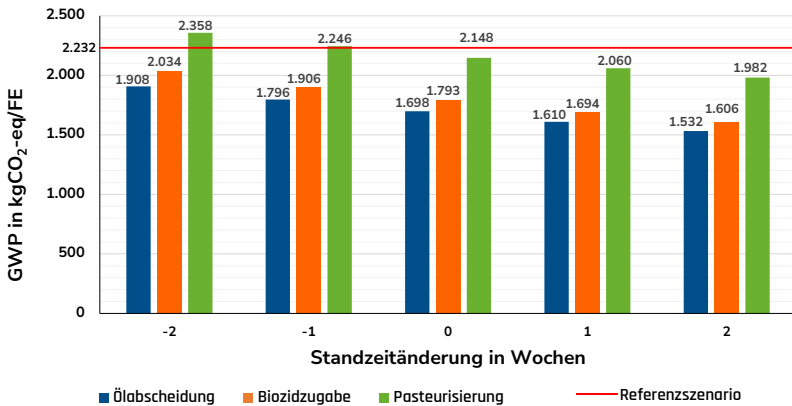


Abbildung 15: Treibhausgaspotenzial (GWP) im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme) ¹⁵²

Bezüglich des kumulierten Energieaufwandes wirkt sich eine Standzeitverlängerung von einer bzw. zwei Wochen nur bei der Ölabscheidung und Biozidzugabe vorteilhaft gegenüber dem Referenzszenario aus, die Pasteurisierung lediglich bei einer Standzeitverlängerung von zwei Wochen. Bei der Ölabscheidung führt eine Standzeitverlängerung von einer Woche zu einer Reduktion des kumulierten Energieaufwandes von 7.927 MJ im Vergleich zum Referenzszenario, eine Standzeitverlängerung von zwei Wochen zu einer Energieeinsparung von 8.935 MJ. Bei der Biozidzugabe bewirkt die Standzeitverlängerung von einer Woche eine

¹⁵² Eigene Darstellung.

Einsparung von 6.764 MJ, von zwei Wochen eine Einsparung von 7.902 MJ. Bei der Pasteurisierung führt die Standzeitverlängerung von einer Woche zu einer Erhöhung des kumulierten Rohstoffaufwandes von 329 MJ, eine Standzeitverlängerung von zwei Wochen jedoch zu einer Einsparung von 680 MJ.

Eine Standzeitverringerung von einer bzw. zwei Wochen ist nur bei der Ölabscheidung und der Biozidzugabe vorteilhafter als das Referenzszenario. Eine Standzeitverringerung bei der Pasteurisierung von vier Wochen auf drei Wochen verursacht einen höheren kumulierten Energieaufwand von 2.723 MJ im Vergleich zum Referenzszenario, eine Standzeitverringerung auf zwei Wochen erhöht den Energieaufwand um 4.149 MJ (vgl. Abbildung 16).

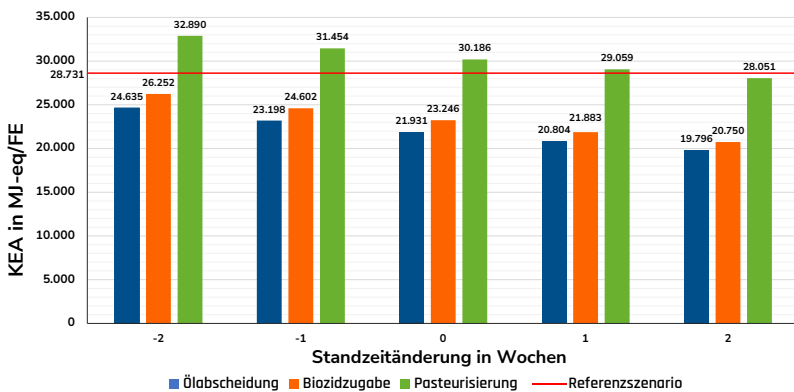


Abbildung 16: Kumulierter Energieaufwand (KEA) im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)¹⁵³

Im Fall des kumulierten Rohstoffaufwandes verringert eine Standzeitverlängerung von einer bzw. zwei Wochen die aufgewendeten Rohstoffe bei der Ölabscheidung um 275 kg bzw. um 328 kg und bei der Biozidzugabe um 251 kg bzw. um 310 kg gegenüber dem

¹⁵³ Eigene Darstellung.

Referenzszenario. Die Pasteurisierung weist trotz Standzeitverlängerung einen höheren kumulierten Rohstoffaufwand von 666 kg bei einer Woche bzw. 612 kg bei zwei Wochen im Vergleich zum Referenzszenario auf.

Die beiden Szenarien Ölabscheidung und Biozidzugabe haben auch bei einer Standzeitverringerung um eine bzw. zwei Wochen einen geringeren kumulierten Rohstoffaufwand als das Referenzszenario. Die Pasteurisierung verursacht bei einer Standzeitverringerung von einer und zwei Wochen einen höheren kumulierten Rohstoffaufwand als das Referenzszenario, um 783 kg bei einer Woche und 847 kg bei zwei Wochen geringerer Standzeit (vgl. Abbildung 17).

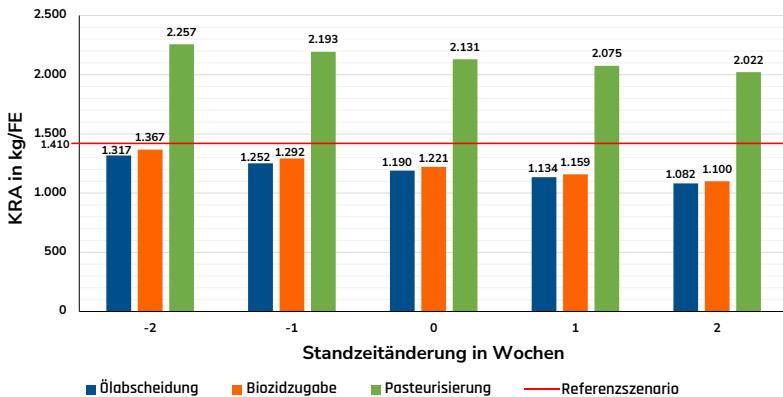


Abbildung 17: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme) ¹⁵⁴

Bezüglich des Wasserverbrauchs wirkt sich eine Standzeitverlängerung von einer bzw. zwei Wochen bei den drei Szenarien auch vorteilhaft gegenüber dem Referenzszenario aus. Bei der Ölabscheidung bewirkt eine Standzeitverlängerung von einer Woche eine Wassereinsparung von 4,7 m³ im Vergleich zum Referenzszenario, eine Standzeitverlängerung von zwei Wochen eine Einsparung von 5 m³. Bei der Biozidzugabe führt

¹⁵⁴ Eigene Darstellung.

eine Woche Standzeitverlängerung zu einer Reduktion von 4 m^3 , zwei Wochen Standzeitverlängerung zu $4,7 \text{ m}^3$ und bei der Pasteurisierung zu respektive $1,3 \text{ m}^3$ und $2,5 \text{ m}^3$ Wassereinsparung.

Die beiden Szenarien Ölabscheidung und Biozidzugabe haben auch bei einer Standzeitverringerung von einer bzw. zwei Wochen einen geringeren Wasserverbrauch als das Referenzszenario. Die Pasteurisierung hat nur bei einer Standzeitverringerung von einer Woche einen geringeren Wasserverbrauch als das Referenzszenario, bei zwei Wochen statt vier Wochen Standzeit erhöht sich der Wasserverbrauch um $0,07 \text{ m}^3$ im Vergleich zum Referenzszenario (vgl. Abbildung 16).

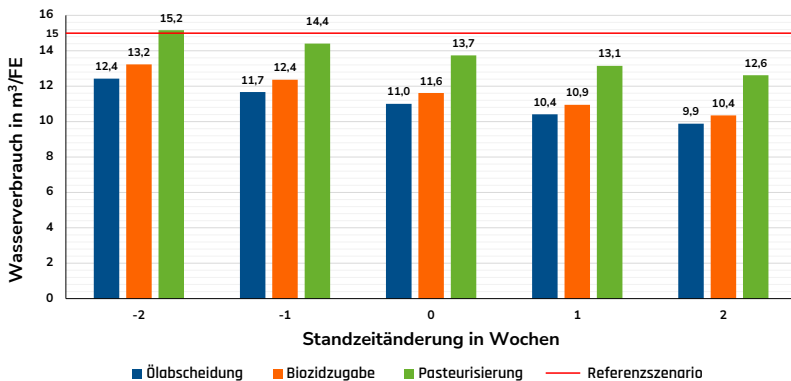


Abbildung 18: Wasserverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)¹⁵⁵

Im Fall des Flächenverbrauchs wirkt sich eine Standzeitverlängerung von einer bzw. zwei Wochen bei den drei Szenarien vorteilhaft gegenüber dem Referenzszenario aus. Bei der Ölabscheidung führt eine Standzeitverlängerung von einer Woche zu einer Flächeneinsparung von 54 m^2 im Vergleich zum Referenzszenario, eine Standzeitverlängerung von zwei Wochen zu einer Einsparung von 60 m^2 . Bei der Biozidzugabe ergibt sich eine Flächeneinsparung von 48 m^2 für eine Woche Standzeitverlängerung und 55 m^2 für zwei Wochen Standzeitverlängerung. Bei der

¹⁵⁵ Eigene Darstellung.

Pasteurisierung bewirkt eine Woche Standzeitverlängerung eine Flächeneinsparung von 28 m², von zwei Wochen eine Einsparung von 34 m². Auch wenn die Standzeit der drei Szenarien um eine bzw. zwei Wochen verringert wird, also von vier Wochen auf drei bzw. zwei Wochen, haben alle drei Szenarien einen geringeren Flächenverbrauch als das Referenzszenario (vgl. Abbildung 19).

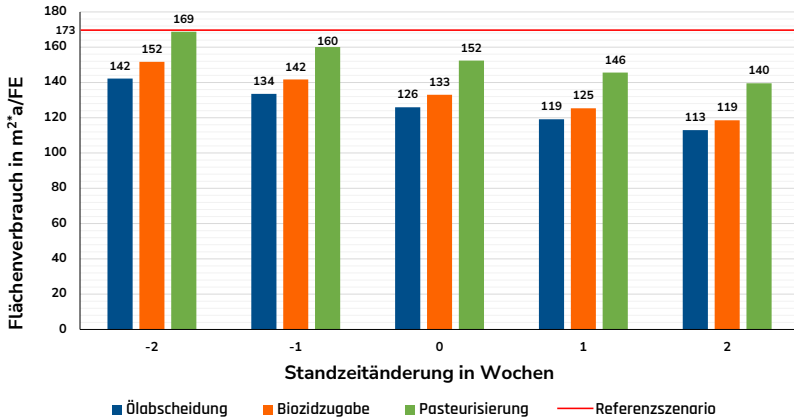


Abbildung 19: Flächenverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber der Standardannahme)¹⁵⁶

Eine Kombination der Szenarien wurde in dieser Studie nicht quantitativ untersucht. Im Fall von Szenario 1 und 2 (Ölabscheidung + Biozidzugabe) könnte dies jedoch lohnenswert sein, wenn insbesondere Synergieeffekte oder positive Wechselwirkungen zwischen den beiden Maßnahmen auftreten. Da hierzu bisher keine verlässlichen Daten vorliegen, wäre eine eigene Versuchsanordnung mit verschiedenen Kombinationen der Maßnahmen in einer Folgestudie aufschlussreich.

Im Rahmen einer weiteren Sensitivitätsanalyse wurde die originär ange-setzte Lebensdauer von zwölf Wochen in diesem Abschnitt eindeutig pro-

¹⁵⁶ Eigene Darstellung.

longiert. Zu diesem Zweck wurden im Modell 24 Wochen verwendet (Referenzszenario), wobei die Ergebnisse für das Treibhausgaspotenzial in der nachfolgenden Abbildung 20 dargestellt sind. Es ist evident, dass sich die numerischen Resultate verändern, jedoch bleibt die finale Gültigkeit der Studienergebnisse unverändert, da die Resultate in ihrer qualitativen Beschaffenheit übereinstimmen.

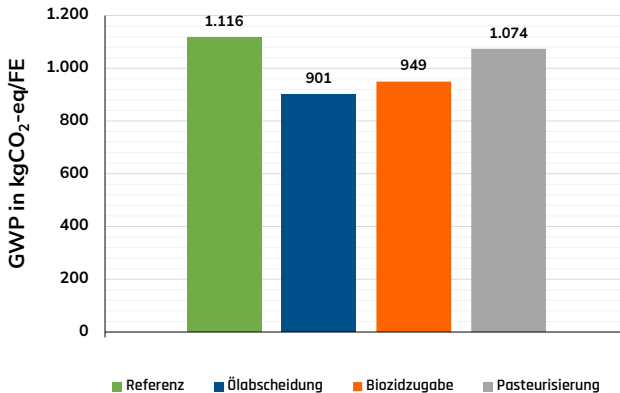


Abbildung 20: Sensitivitätsanalyse mit einer Lebensdauer von 24 Wochen (Referenzszenario)¹⁵⁷

5.1.7 Rohstoffkritikalität

Die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2¹⁵⁸ wurde für die Analyse des Versorgungsrisikos (vgl. Tabelle 21) verwendet. Die Richtlinie basiert auf einem Bewertungssystem mit insgesamt 13 Indikatoren, die in drei Gruppen gegliedert sind (vgl. Tabelle 20). Pro Rohstoff wird für jeden Indikator eine Bewertung angegeben. Die Bewertungsskala geht von 0 bis 1 mit Stufen von 0,3 und 0,7.

¹⁵⁷ Eigene Darstellung.

¹⁵⁸ Vgl. VDI 4800:2018-03 (Blatt 2).

Tabelle 20: 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 Nachfragesteigerung
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/Anbauggebiete		

Die VDI-Richtlinie 4800 beinhaltet eine Auswahl an Rohstoffen, die auf Grundlage von Literatur, Schätzungen und Expertenmeinungen bewertet werden. Da Gold neben anderen Rohstoffen in der VDI-Richtlinie 4800 nicht berücksichtigt wird, wird in Anlehnung an eine andere VDI-Studie¹⁵⁹ davon ausgegangen, dass die fehlenden Werte für Gold den Werten von Silber ähneln. In der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2¹⁶⁰ befinden sich Tabellenwerte für Mineralöl (hauptsächlich auf Basis von Erdöl). Die folgende Tabelle 21 zeigt die kritischen Rohstoffe in allen Szenarien.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Hauptrisiko für sämtliche Rohstoffe in der Länderproduktion findet. Überdies können Risiken für die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen und die annualisierte Preisvolatilität festgestellt werden. In dieser Analyse greifen alle drei Szenarien mit Maßnahmen zur Standzeitverlängerung auf die gleichen Rohstoffe (pH-Sensorik) zurück. Die KRA-Analyse zeigt überdies, dass das Szenario 3 der Pasteurisierung in der Herstellung

¹⁵⁹ Vgl. Köhler, A. et al. (2018), S. 91.

¹⁶⁰ Vgl. VDI 4800:2018-03 (Blatt 2).

den höchsten Rohstoffverbrauch aufweist. Die Rohstoffkritikalität ist hier besonders hoch einzuschätzen.

Tabelle 21: Rohstoffkritikalitätsanalyse (Bewertungsskala von 0 bis 1)¹⁶¹

Rohstoff/Element		Erdöl	Aluminium	Chrom	Cobalt	Kupfer	Gallium	Eisen	Lithium	Mangan	Molybdän	Nickel	Platin	Gold/Silber	Titan	Zink	
Durchschnittliche Kritikalität des Rohstoffs		0,3	0,3	0,5	0,6	0,4	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	
Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0,3	0	1,0	0,3	0,7	0	0,3	0	0,7	0,7	0,7	0	1,0	0	1,0	
	Grad der Koppelproduktion/Nebenproduktion	0	0	0	0,7	0,3	1,0	0	0	0	0	0,3	0,3	0,7	0	0,3	
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen bzw. Abbaugebiete	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Geopolitische und regulatorische Indikatoren	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	0,3	0,7	1,0	0,7	0,3	0,7	0,3	1,0	0,7	0,7	0,7	1,0	0,3	0,7	0,3	
	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	0,3	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	1,0	
	Politisches Länderrisiko	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7	
	Regulatorisches Länderrisiko	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3
	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	
Ökonomische Indikatoren	Grad der Nachfragersteigerung	0,7	0	0,3	0,3	0,3	1,0	0	0,3	0	0	0,3	0,7	0,3	0	0	
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	0	0,7	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	0,7	1,0	0,7	0,7	0,3	1,0	
	Annualisierte Preisvolatilität	1,0	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	

¹⁶¹ Vgl. VDI 4800:2018-03 (Blatt 2).

5.1.8 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch die Implementierung von entweder Ölabscheidung, Biozidzugabe oder Pasteurisierung in drei der fünf betrachteten Umweltindikatoren (Treibhausgaspotenzial, Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme) Einsparungen erzielt werden. Mit der Ölabscheidung und der Biozidzugabe werden Einsparungen bei allen fünf Umweltindikatoren (Treibhausgaspotenzial, kumulierter Energieaufwand, Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme, kumulierter Rohstoffaufwand) erzielt, wobei eine Ölabscheidung bei allen Umweltindikatoren am meisten Einsparungen erzielt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Ölabscheidung über den gesamten Lebenszyklus hinweg 24 % der Treibhausgasemissionen, 27 % des Wasserverbrauchs, 16 % des Rohstoffaufwands, 24 % des Energieaufwands und 27 % der in Anspruch genommenen Flächen eingespart werden können. Sowohl die Nutzungs- als auch Entsorgungsphase aller Szenarien konnten als Treiber der Auswirkungen identifiziert werden, was auf den KSS- und Reinigungsflüssigkeitsverbrauch zurückzuführen ist. Dementsprechend ergibt sich durch den verminderten Einsatz von KSS und Reinigungsflüssigkeit das größte Einsparpotenzial mit ökologisch vorteilhaften Reduktionen für alle Umweltindikatoren. Eine entgegengesetzte Veränderung ist bei der Pasteurisierung zu erkennen, da hier durch den erhöhten Einsatz von elektrischen und elektronischen Geräten, Sensorik und Messtechnik, die hergestellt und mit Strom betrieben werden müssen, der kumulierte Energieaufwand deutlich um 34 % und der Rohstoffaufwand um 5 % steigt.

5.2 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

5.2.1 Herstellungskosten

Die hinsichtlich der Herstellung aller Geräte erforderlichen Kosten für die Anwendenden fallen nur für die pH-Messung (Grundlage für Szenarien 1, 2 und 3) sowie zusätzlich für Szenario 1 (Ölabscheidung mit Oil-Skimmer) und Szenario 3 (Pasteurisierung) an. Die Transportkosten zwischen Herstellung und Nutzung, die dem Block der Herstellungskosten zugerechnet

werden, fallen mit Beträgen im Euro-Cent-Bereich nicht ins Gewicht. Einen Gesamtüberblick über die Herstellungskosten gibt Tabelle 22.

Tabelle 22: Herstellungskosten und zugeordnete Transportkosten in €/FE

	Investitions- güter	Herstellungs- kosten	Transport- kosten	Summe
Referenz- Szenario	-	0,00 €	0,00 €	0,00 €
pH- Messung (Szenarien 1, 2 und 3)	pH-Sonde	165,67 €	0,01 €	165,68 €
	pH-Mess- umformer	58,67 €	0,01 €	58,68 €
	Anschluss- leitungen (2 m)	vernachlässig- bar	0,00 €	0,00 €
	Summe pH-Messung	224,33 €	0,02 €	224,35 €
Szenario 1 (Ölab- scheidung)	Band- Ölabscheider	78,50 €	0,01 €	78,51 €
	Zubehör Band- abscheiderwanne	4,75 €	0,00 €	4,75 €
	Ersatz- Skimmerband	34,63 €	0,02 €	34,65 €
	Summe ohne pH-Messung	117,88 €	0,04 €	117,92 €
	Summe mit pH-Messung	342,22 €	0,06 €	342,28 €
Szenario 2 (Biozid- zugabe)	-	0,00 €	0,00 €	0,00 €
	Summe mit pH-Messung	224,33 €	0,02 €	224,35 €
Szenario 3 (Pasteuri- sierung)	Temperatursonde	19,40 €	0,00 €	19,40 €
	SPS-Steuerung (CPU)	57,60 €	0,00 €	57,60
	SPS-Steuerung (Netzteil)	8,28 €	0,00 €	8,28
	SPS-Steuerung (Leistungsschütze)	23,38 €	0,01 €	23,39
	Laptop (mit Aufladekabel)	200,00 €	0,08 €	200,08
	Heizstäbe	57,84 €	0,03 €	57,87
	Anschlussleitung (10m-Netzteil)	vernachlässig- bar	0,00 €	0,00 €
	Summe ohne pH-Messung	366,50 €	0,12 €	366,62 €
Summe mit pH-Messung	590,84 €	0,14 €	590,98 €	

5.2.2 Kosten der Nutzung (Substanzen und Stromverbrauch)

Bei der Nutzungsphase machen in allen Szenarien der Kühlschmierstoff und mit etwas geringerem Anteil das Reinigungsmittel den dominierenden Teil der Kosten aus. Anders als bei der Herstellungsphase sind für diese beiden Substanzen auch die Transportkosten mit Anteilen von 11,4 % – 11,6 % nicht zu vernachlässigen. Für die drei Maßnahmen-szenarien liegen die Transportkostenanteile in der Summe bei 7,6 % (Szenario 3) bis 9,2 % (Szenario 1). Die Einsparung an KSS und Reinigungsflüssigkeit führt in allen drei Maßnahmen-szenarien, am meisten jedoch bei Szenario 1 (Ölabscheidung), zu einer Verringerung an Nutzungskosten. Bei Szenario 1 beträgt diese Einsparung 207,97 Euro pro funktioneller Einheit oder 17,3 %. In Szenario 3 (Pasteurisierung) wird diese Einsparung durch den hohen Stromverbrauch der Heizstäbe dagegen wieder aufgewogen. Die gesamten Kosten der Nutzung im Vergleich zeigt Tabelle 23.

Tabelle 23: Kosten für die Nutzungsphase und zugeordnete Transportkosten in €/FE

	Substanzen/ Strom	Kosten der Nutzung	Transportkosten	Summe
Referenz-Szenario	KSS-Konzentrat	565,99 €	74,56 €	640,55 €
	Leitungswasser für KSS	3,10 €	-	3,10 €
	Reinigungsflüssigkeit Konzentrat	487,60 €	62,60 €	550,20 €
	Leitungswasser für Reinigungsflüssigkeit	3,78 €	-	3,78 €
	Strom für KSS-Wechsel	1,66 €	-	1,66 €
	Summe	1.062,13 €	137,16 €	1.199,29 €
pH-Messung (Szenarien 1, 2 und 3)	pH-Pufferlösung 7,0	88,32 €	0,16 €	88,48 €
	pH-Pufferlösung 9,0	89,55 €	0,16 €	89,71 €
	Strom für Sonde	21,01 €	-	21,01 €
	Summe pH-Messung	198,88 €	0,32 €	199,20 €

	Substanzen/ Strom	Kosten der Nutzung	Transportkosten	Summe
Szenario 1 (Ölabscheidung)	KSS-Konzentrat	399,52 €	52,63 €	452,15 €
	Leitungswasser für KSS	2,19 €	-	2,19 €
	Reinigungsflüssigkeit Konzentrat	296,00 €	38,00 €	334,01 €
	Leitungswasser für Reinigungsflüssigkeit	2,30 €	-	2,30 €
	Strom für KSS-Wechsel	1,17 €	-	1,17 €
	Strom für Ölabscheider	0,31 €	-	0,31 €
	Summe ohne pH-Messung	701,49 €	90,63 €	792,12 €
	Summe mit pH-Messung	900,37 €	90,95 €	991,32 €
Szenario 2 (Biozid- zugabe)	KSS-Konzentrat	424,49 €	55,92 €	480,41 €
	Leitungswasser für KSS	2,33 €	-	2,33 €
	Reinigungsflüssigkeit Konzentrat	314,51 €	40,38 €	354,88 €
	Leitungswasser für Reinigungsflüssigkeit	2,44 €	-	2,44 €
	Strom für KSS-Wechsel	1,24 €	-	1,24 €
	Biozid	65,56 €	0,05 €	65,61 €
	Summe ohne pH-Messung	810,56 €	96,35 €	906,91 €
	Summe mit pH-Messung	1.009,45 €	96,66 €	1.106,11 €
Szenario 3 (Pasteuri- sierung)	KSS-Konzentrat	399,52 €	52,63 €	452,15 €
	Leitungswasser für KSS	2,19 €	-	2,19 €
	Reinigungsflüssigkeit Konzentrat	296,00 €	38,00 €	334,01 €
	Leitungswasser für Reinigungsflüssigkeit	2,30 €	-	2,30 €
	Strom für KSS-Wechsel	1,17 €	-	1,17 €
	Strom der Messtechnik	21,01 €	-	21,01 €
	Strom der Heizstäbe	178,78 €	-	178,78 €
	Zusätzlicher Strom der Pumpe	7,45 €	-	7,45 €
	Summe ohne pH-Messung	908,42 €	90,63 €	999,05 €
Summe mit pH-Messung	1.107,30 €	90,95 €	1.198,25 €	

5.2.3 Entsorgungskosten

Die Entsorgungskosten beziehen sich in erster Linie auf Reinigungsflüssigkeit und KSS, wobei die Reinigungsflüssigkeit hier den geringfügig höheren Anteil ausmacht. Die Transportkosten sowie der Stromanteil für die Vakuüm-Verdampfung liefern einen kleineren, aber nicht zu vernachlässigenden Teil der Entsorgungskosten, während die Entsorgung der Geräte und sonstigen Substanzen, die nur in kleineren Mengen anfallen, nicht ins Gewicht fällt. Somit weisen die Szenarien mit der höchsten Einsparung an KSS und Reinigungsflüssigkeit (1 und 3) auch die niedrigsten Kosten der Entsorgung auf (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24: Kosten für Entsorgungsphase und zugeordnete Transportkosten in €/FE

	Geräte/Substanzen/ Strom	Kosten der Entsorgung	Transport- kosten	Summe
Referenz- Szenario	KSS	251,55 €	26,16 €	277,71 €
	Stromverbrauch Vakuüm-Verdampfung KSS	22,35 €	-	22,35 €
	Reinigungsflüssigkeit	293,61 €	30,54 €	324,14 €
	Stromverbrauch Vakuüm-Verdampfung Reinigungsflüssigkeit	25,98 €	-	25,98 €
	Summe	593,49 €	56,70 €	650,19 €
	pH-Mes- sung (Szenarien 1, 2 und 3)	pH-Sonde	0,03 €	*)
pH-Messumformer		0,03 €	*)	0,03 €
Anschlussleitungen (2 m)		0,01 €	*)	0,01 €
pH-Pufferlösung 7,0		2,29 €	0,02 €	2,31 €
pH-Pufferlösung 9,0		2,29 €	0,02 €	2,31 €
Summe pH-Messung		4,65 €	0,05 €	4,69 €
Szenario 1 (Ölabschei- dung), Teil 1	Band-Ölabscheider	0,11 €	*)	0,11 €
	Zubehör Bandabscheiderwanne	0,04 €	*)	0,04 €
	Ersatz-Skimmerband	0,18 €	*)	0,18 €
	KSS	177,56 €	18,47 €	196,03 €
	Stromverbrauch Vakuüm-Verdampfung KSS	15,77 €	-	15,77 €

	Geräte/Substanzen/ Strom	Kosten der Entsorgung	Transport- kosten	Summe
Szenario 1 (Ölabscheidung), Teil 2	Reinigungsflüssigkeit	178,24 €	18,54 €	196,77 €
	Stromverbrauch Vakuum-Verdampfung Reinigungsflüssigkeit	18,34 €	-	18,34 €
	Summe ohne pH-Messung	390,25 €	37,00 €	427,58 €
	Summe mit pH-Messung	394,90 €	37,05 €	431,95 €
	Szenario 2 (Biozidzu- gabe)	Biozid	0,28 €	0,03 €
KSS	188,66 €	19,62 €	208,28 €	
Stromverbrauch Vakuum-Verdampfung KSS	16,76 €	-	16,76 €	
Reinigungsflüssigkeit	189,38 €	19,70 €	209,07 €	
Stromverbrauch Vakuum-Verdampfung Reinigungsflüssigkeit	19,49 €	-	19,49 €	
Summe ohne pH-Messung	414,57 €	39,35 €	453,92 €	
Summe mit pH-Messung	419,22 €	39,39 €	458,61 €	
Szenario 3 (Pasteuri- sierung)	Temperatursonde	0,01 €	-	0,01 €
	SPS-Steuerung (CPU)	0,01 €	-	0,01 €
	SPS-Steuerung (Netzteil)	0,01 €	-	0,01 €
	SPS-Steuerung (Leistungsschütze)	0,01 €	-	0,01 €
	Laptop (mit Aufladekabel)	0,53 €	-	0,53 €
	Heizstäbe	0,05 €	-	0,05 €
	Anschlussleitungen (10m-Netzteil)	0,08 €	-	0,08 €
	KSS	177,56 €	18,47 €	196,03 €
	Stromverbrauch Vakuum-Verdampfung KSS	15,77 €	-	15,77 €
	Reinigungsflüssigkeit	178,24 €	18,54 €	196,77 €
	Stromverbrauch Vakuum-Verdampfung Reinigungsflüssigkeit	18,34 €	-	18,34 €
	Summe ohne pH-Messung	390,61 €	37,00 €	427,62 €
	Summe mit pH-Messung	395,26 €	37,05 €	432,31 €

*) Transportkosten zum Entsorgungsbetrieb sind in der Spalte „Kosten während der Entsorgungsphase“ anteilig enthalten, vgl. Erläuterung in Kap. 4.2.6 Preise für Entsorgungskosten der Geräte und Substanzen.

5.2.4 Gesamtkosten aus Sicht des KSS-Anwendenden

Eine vergleichende Darstellung der Gesamtkosten aller Szenarien zeigt Abbildung 21.

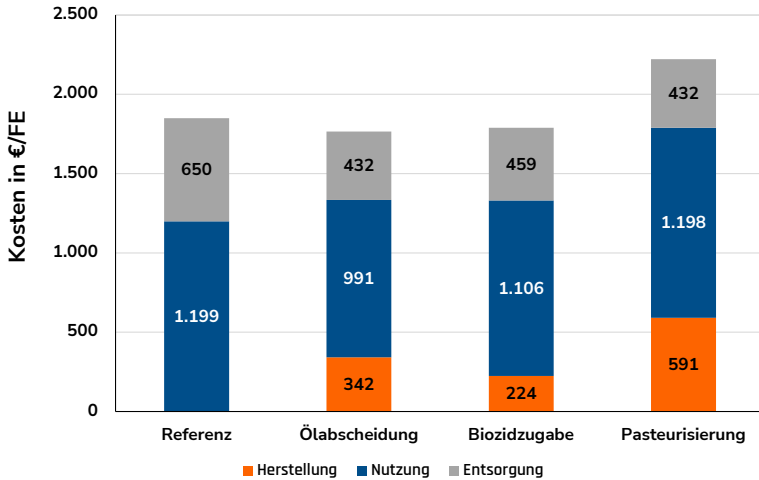


Abbildung 21: Kosten je Lebenswegphase (in €/FE)¹⁶²

Das Referenzszenario hat per Definition keine Herstellungskosten, sondern lediglich Kosten der Nutzung (65 %) und Entsorgung (35 %), da die Verbrauchsmaterialien der Nutzungsphase zugeordnet werden. Alle drei Szenarien führen (einschließlich der pH-Messung, die in Abbildung 21 nicht getrennt dargestellt ist) zu zusätzlichen Herstellungskosten, die durch die Einsparung an Kosten der Nutzung sowie der Entsorgung in Szenario 1 (Ölabscheidung) und Szenario 2 (Biozidzugabe) jedoch überkompensiert werden. In der Summe ergibt sich in Szenario 1 eine Nettoeinsparung an Kosten in Höhe von 83,93 Euro/a oder 4,5 % gegenüber dem Referenzszenario, in Szenario 2 eine Nettoeinsparung in Höhe von 60,42 Euro/a oder 3,3 % gegenüber dem Referenzszenario. Lediglich bei Szenario 3 (Pasteurisierung) ergeben sich in der Summe Mehrkosten von 372,06 Euro/a oder 20,1 % gegenüber dem Referenzszenario. Das liegt

¹⁶² Eigene Darstellung.

zum einen an den im Vergleich zu den anderen Szenarien hohen Herstellungskosten, zum anderen aber auch an dem hohen Stromverbrauch der Heizstäbe, so dass die Nutzungskosten hier gegenüber dem Referenzszenario in der Summe nicht eingespart werden. Hierbei ist zu beachten, dass ein vergleichsweise günstiger durchschnittlicher Industriestrompreis in Höhe von 19,1 ct/kWh für das Unternehmen angenommen wurde.

Dabei stellen allein für die Maßnahme der pH-Messung, die für alle drei Szenarien (außer dem Referenzszenario) eine Grundlage bildet, die Herstellungskosten mit 224,35 Euro/a den Hauptanteil bei Szenario 1 bzw. den ausschließlichen Anteil der Herstellungskosten bei Szenario 2. Die Kosten der Nutzung durch die pH-Messung betragen mit 199,20 Euro dagegen nicht den Hauptanteil, aber durchaus einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der Nutzungskosten.

5.2.5 Sensitivitätsanalyse

Auch bei der ökonomischen Analyse der Kosten liegt die Annahme zugrunde, dass die erzielbare Standzeitverlängerung durch jede der Maßnahmen sowohl ein oder zwei Wochen länger (+1/+2) als auch kürzer (-1/-2) als die im Standardfall sein kann. Aus der Literatur sind über die Bandbreiten der Standzeiten nur grobe Aussagen bekannt. Der Verbrauch sowie die Entsorgung des KSS und der Reinigungsflüssigkeit sind auch, wie aus Tabelle 23 und Tabelle 24 hervorgeht, die wesentlichsten Kostenkomponenten für die Anwendenden, so dass der Parameter der Standzeitverlängerung als der kritischste für die relative Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme identifiziert wurde. Andere Parameter wie etwa Preise wurden nicht im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse variiert, da ihr Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen nur als untergeordnet erachtet wird bzw. über mögliche Variationen keine so hohen Unsicherheiten herrschen.

Eine Reduktion der Kosten lässt sich lediglich bei den Komponenten erzielen, die von der Verbrauchsmenge der KSS und der Reinigungsflüssigkeit abhängig sind, einschließlich der zugehörigen Transportkosten für Nutzung und Entsorgung und den jeweiligen Stromverbräuchen. Bei Letzteren

fällt nur die Vakuumverdampfung von KSS und Reinigungsflüssigkeit in der Entsorgungsphase nennenswert ins Gewicht, der Stromverbrauch für den KSS-Wechsel in der Nutzungsphase ist aufgrund der geringen Beiträge nahezu vernachlässigbar. Sämtliche Herstellungskosten, die annahmegemäß ausschließlich die in den Szenarien zusätzlich installierten Geräte mit Zubehör betreffen (aufgelistet in Tabelle 22), sind in allen drei Maßnahmenszenarien nicht abhängig von der erzielbaren Standzeitverlängerung, da sich deren Lebensdauer und daher deren Ersatzbedarf annahmegemäß nicht in Abhängigkeit von der Standzeitverlängerung ändert.

Das Szenario 1 (Ölabscheidung) ist von Kostenseite auch dann bereits vorteilhaft gegenüber dem Referenzszenario, wenn nur eine Standzeitverlängerung von vier anstelle von fünf Wochen gemäß der Standardannahme erreicht werden kann, die Nettoeinsparung beträgt allerdings in diesem Fall nur noch 7,76 Euro/a gegenüber dem Referenzszenario. Der Break-even-Punkt wird (bei linearer Intrapolation) bei einer Standzeitverlängerung von etwa 3,91 Wochen durch diese Maßnahme erreicht.

Im Fall des Szenarios 2 (Biozidzugabe) ist die Vorteilhaftigkeit dagegen schon nicht mehr gegeben, wenn die erzielbare Standzeitverlängerung anstelle der hier im Standardfall angenommenen vier Wochen nur drei Wochen betragen würde. In diesem Fall wären die Kosten bereits um 30,30 Euro/a höher als im Referenzszenario. Der rechnerische Break-even-Punkt bei linearer Interpolation liegt bei Szenario 2 bei einer Standzeitverlängerung von etwa 3,33 Wochen. In beiden Szenarien ist also die Annahme der spezifisch erreichbaren Standzeitverlängerung durchaus entscheidend für die relative Vorteilhaftigkeit der jeweiligen Maßnahme.

Bei Szenario 3 (Pasteurisierung) hingegen können die Mehrkosten gegenüber dem Referenzszenario auch dann nicht kompensiert werden, wenn die optimistischste Standzeitverlängerung von sieben anstelle der Standardannahme von fünf Wochen zugrunde gelegt wird. Auch in diesem Fall betragen die Mehrkosten in der Summe immer noch 243,77 Euro/a oder

13,2 % gegenüber dem Referenzszenario. Ebenso seitens der Kosten ist Szenario 3 somit gegenüber dem Referenzszenario nicht vorteilhaft, da im Vergleich zwischen den Szenarien nicht nur die Herstellungskosten durch die benötigten Steuerungsgeräte, sondern aufgrund des hohen Stromverbrauchs der Heizstäbe auch die Nutzungskosten am höchsten sind.

Einen Gesamtvergleich über die Kostenverteilung in der Sensitivitätsanalyse mit Variation der Standzeitverlängerung gegenüber dem Referenzszenario zeigt Abbildung 22.

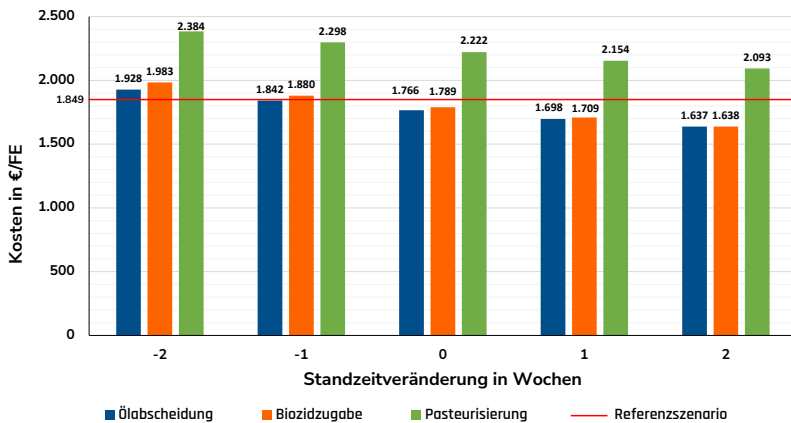


Abbildung 22: Gesamtkosten im Vergleich zum Referenzszenario (rote Linie) bei Variation der Standzeit (-2 bis +2 Wochen gegenüber Standardannahme)¹⁶³

Eine Kombination der Szenarien wurde im Rahmen dieser Studie nicht quantitativ untersucht. Diese könnte im Fall von Szenario 1 und 2 (Ölabscheidung + Biozidzugabe) lohnenswert sein, insbesondere dann, wenn es zu Synergieeffekten bzw. positiven Wechselwirkungen zwischen beiden Einflüssen kommen könnte. Da es hierzu noch keine belastbaren Aussagen gibt, wäre eine eigene Versuchsanordnung mit unterschiedlichen Kombinationen der Maßnahmen als Folgestudie aufschlussreich.

¹⁶³ Eigene Darstellung.

5.2.6 Zusammenfassung

Die Analyse der Gesamtkosten für verschiedene Szenarien in der industriellen Produktion zeigt, dass die Herstellungskosten vor allem für die pH-Messung sowie spezifische Maßnahmen wie Ölabscheidung (Szenario 1) und Pasteurisierung (Szenario 3) anfallen. Diese Kosten sind jedoch nur im Kontext der Einsparungen bei der Nutzung und Entsorgung aussagekräftig. Während die Nutzungskosten hauptsächlich durch den Verbrauch von Kühlschmierstoff und Reinigungsmittel bestimmt werden, führt die Einsparung dieser Stoffe in den Maßnahmen-Szenarien zu einer Reduktion der Gesamtkosten, vor allem in Szenario 1 (Ölabscheidung). Die Entsorgungskosten sind ebenfalls durch die Menge an verbrauchtem Reinigungsmittel und Kühlschmierstoff geprägt, wobei Szenarien mit hoher Einsparung die niedrigsten Entsorgungskosten aufweisen.

Anzumerken ist, dass der unterschiedlich hohe Wasserverbrauch in den einzelnen Szenarien durchaus einen spürbaren Effekt bei der Entsorgung und dem zugehörigen Transportprozess entfaltet, der Wasserpreis selbst hat dagegen nur einen sehr untergeordneten Effekt auf das Ergebnis der Kosten der Nutzung.

Insgesamt zeigt sich, dass Szenario 1 (Ölabscheidung) und 2 (Biozidzugabe) durch die Einsparungen die zusätzlichen Herstellungskosten überkompensieren, während in Szenario 3 (Pasteurisierung) die höheren Herstellungskosten und der hohe Stromverbrauch zu Mehrkosten führen.

6 ZUSAMMENFASSUNG & SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Ziel der Studie lag darin, die Möglichkeiten der KSS-Standzeitverlängerung für ein spezifiziertes Bearbeitungsverfahren (Zerspanungsprozess) aufzuzeigen, die jeweiligen Potenziale und Herausforderungen sichtbar zu machen und die ökologischen Auswirkungen zu quantifizieren.

Für eine Steigerung der Ressourceneffizienz existieren unterschiedliche standzeitverlängernde Maßnahmen für KSS. Die standzeitverlängernden Maßnahmen beziehen sich in der Regel auf die Kontrolle der mikrobiellen Belastung des Schmierstoffes (Konservierung). Unterschieden wird in allgemeine Hygienemaßnahmen sowie chemische und chemisch-physikalische Konservierungsmaßnahmen. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass sie eine mikrobielle Schädigung des Kühlschmierstoffes nicht dauerhaft verhindern können. Nach aktuellem Wissensstand sind die meisten dieser Verfahren nicht in der Lage, die herkömmliche Biozidbehandlung vollständig zu ersetzen. Daher werden sie in der Regel ergänzend zu einer präventiven Konservierung eingesetzt, um die Standzeit zu verlängern. In dieser Studie wurden die standzeitverlängernden Maßnahmen der Fremdölabscheidung, Biozidzugabe und Pasteurisierung mit dem Referenzszenario als Einzelszenarien gegenübergestellt und mithilfe einer Nutzen-Aufwand-Analyse ökologisch sowie ökonomisch bewertet.

Dabei wurden das Treibhausgaspotenzial in CO₂-Äquivalenten, der kumulative Energieaufwand, der Wasserverbrauch und die Flächeninanspruchnahme berechnet, die Verwendung versorgungskritischer Rohstoffe beleuchtet und sowohl die relevanten Kosteneinsparungen als auch die zusätzlichen Ausgaben für die einzelnen Szenarien vergleichend berechnet. Die funktionelle Einheit wurde auf die Menge der produzierten Stückzahl pro Jahr (34.909) und des Spanvolumens von 436.000 cm³ pro Jahr festgelegt.

Die Analyse der Gesamtkosten zeigt Folgendes: Während die Nutzungskosten hauptsächlich durch den Verbrauch von Kühlschmierstoff und Reinigungsmittel bestimmt werden, führt die Einsparung dieser Stoffe in den Maßnahmen-Szenarien zu einer Reduktion der Gesamtkosten, vor allem in Szenario 1 (Ölabscheidung). Die Entsorgungskosten sind ebenfalls durch die Menge an verbrauchtem Reinigungsmittel und Kühlschmierstoff geprägt, wobei Szenarien mit hoher Einsparung die niedrigsten Entsorgungskosten aufweisen. Szenario 1 (Ölabscheidung) und 2 (Biozidzugabe) überkompensieren die zusätzlichen Herstellungskosten der Geräte und Sensorik durch die Einsparungen an KSS und Reinigungsmittel, während in Szenario 3 (Pasteurisierung) die höheren Herstellungskosten und der hohe Stromverbrauch der Geräte und Sensorik zu Mehrkosten führen.

Um die Variabilität bzw. Stabilität des ökologischen Vergleichs bzw. der Kosten und zugrundeliegenden Annahmen zu bewerten, wurde jeweils eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Bei der ökologischen Bewertung sowie der ökonomischen Analyse liegt die Annahme zugrunde, dass die erzielbare Standzeitverlängerung durch jede der Maßnahmen der Szenarien sowohl ein oder zwei Wochen länger (+1/+2) als auch kürzer (-1/-2) als im Referenzszenario angenommen werden kann. Eine Standzeitverlängerung um eine bzw. zwei Wochen, also die Standzeit von KSS und der Reinigungsflüssigkeit von fünf bzw. sechs Wochen anstelle von vier Wochen, ist für alle ökologischen Bewertungen bereits vorteilhafter gegenüber der Standardzeit, jedoch nicht für alle Szenarien auch vorteilhafter als das Referenzszenario. Die Ölabscheidung und die Biozidzugabe weisen sowohl bei einer Standzeitverlängerung um ein oder zwei Wochen als auch bei einer Standzeitverringerung um ein oder zwei Wochen geringere Umwelteinwirkungen auf als das Referenzszenario. Dies erreicht die Pasteurisierung nur bei einem Umweltindikator, dem Flächenverbrauch. Bei den restlichen Umweltindikatoren ist die Pasteurisierung erst vorteilhaft gegenüber dem Referenzszenario bei einer Standzeitverlängerung von – je nach Umweltindikator – einer oder zwei Wochen, außer bei dem Umweltindikator kumulierter Rohstoffaufwand, bei dem die Pasteurisierung immer nachteiliger ist als das Referenzszenario. In Anbetracht der ökonomischen

Bewertung sind die Ölabscheidung und die Biozidzugabe bereits bei der Standardzeit vorteilhafter gegenüber dem Referenzszenario, wobei die Kosten bei einer Standzeitverlängerung von einer bzw. zwei Wochen weiter reduziert werden. Bei einer Standzeitverringerung von einer bzw. zwei Wochen weisen die Ölabscheidung und die Pasteurisierung bereits keinen ökonomischen Vorteil gegenüber dem Referenzszenario auf. Bei der Pasteurisierung hingegen können die Mehrkosten gegenüber dem Referenzszenario auch dann nicht kompensiert werden, wenn die Standzeit um zwei Wochen verlängert wird.

Die Ergebnisse der Studie sind in Tabelle 25 zusammengefasst und in ein Skalensystem eingeteilt, bei dem „++“ den besten und „--“ den schlechtesten Indikatorwert darstellt. Mit den Zwischenstufen „+“ und „-“ wird zusätzlich die relative Leistung der Szenarien innerhalb des Skalensystems zwischen dem besten und schlechtesten Indikatorwert dargestellt.

Tabelle 25: Gesamtvergleich des Einflusses auf die Wirkungsindikatoren für die vier Szenarien

Wirkungsindikator	Referenzszenario	Szenario 1: Ölabscheidung	Szenario 2: Biozidzugabe	Szenario 3: Pasteurisierung
Treibhausgaspotenzial	--	++	+	-
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	-	++	+	--
Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)	-	++	+	--
Wasserverbrauch	--	++	+	-
Flächeninanspruchnahme	--	++	+	-
Gesamtkosten	-	++	+	--

6.1 Kernaussagen der Studie

Die Ergebnisse der Studie haben gezeigt, dass sich die Investition in Pflegemaßnahmen zur Verlängerung der KSS-Standzeit im Rahmen des betrachteten Produktionsszenarios ökologisch und teilweise auch ökonomisch positiv auswirken kann. Dabei können vergleichsweise einfache Maßnahmen wie die Nachrüstung eines Skimmers zur Fremdölabscheidung oder die regelmäßige Zugabe geringer Mengen Biozid über den Zeitraum mehrerer Jahre und unter passenden Bedingungen bereits eine merkliche Verbesserung der Ökobilanzkennwerte erzielen, während sich die initialen und laufenden Kosten nach wenigen Jahren über die eingesparten KSS-Wechselkosten amortisieren können. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die tatsächlich erzielbaren Verbesserungen in bedeutendem Maße von den angesetzten Werten für die erreichbare Standzeitverlängerung bzw. Effektivität der Verfahren (beispielsweise in der Angabe von Wochen) abhängen. Die Referenzberechnungen der Studie stützen sich hier auf realistische Schätzwerte, die auf Basis von Literaturangaben und Erfahrungswerten aus der Praxis festgesetzt wurden. Der derzeitige Stand öffentlich zugänglicher und wissenschaftlich belegter Daten in Bezug auf die tatsächliche konservierende Wirkung der einzelnen Verfahren ist jedoch lückenhaft und es fehlt an verlässlichen Langzeitstudien, um hieraus belastbare Aussagen treffen zu können. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse von einer Reihe individueller Parameter wie der Art und Zusammensetzung des Kühlschmierstoffs als auch von äußeren Einflussfaktoren wie Luftaustausch, Umgebungstemperatur oder Wasserqualität abhängen können, was pauschale Empfehlungen zusätzlich erschwert. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der Studie im Zuge der Sensitivitätsanalyse mit einem breiten Fehlerintervall von ± 2 Wochen angesetzt. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen lassen sich für die betrachteten Verfahren trotz schwieriger Datenlage folgende Kernaussagen treffen:

Biozidzugabe

Die Biozidadditivierung ist das Verfahren mit den geringsten initialen Investitionskosten. Falls keine Messtechnik zur Zustandsüberwachung installiert wird, beschränken sich die Aufwendungen im Wesentlichen auf die laufenden Kosten der benötigten Wirkstoffe. Aufgrund der geringen eingesetzten Mengen und des nicht vorhandenen Hardwareaufwands erweist sich das Verfahren als ökologisch sinnvoll, wenn durch die Biozidzugabe im Rhythmus von vier Wochen eine Standzeitverlängerung von mehr als zwei Wochen erzielt wird. Ökonomisch ist hingegen eine Standzeitverlängerung von mindestens vier Wochen notwendig, damit sich die zusätzlichen Aufwendungen durch eine Einsparung der KSS-Wechselkosten amortisieren. Darüber hinaus ist anzumerken, dass beim Einsatz von Biozidstoffen weitere Faktoren wie eine eventuelle Anwendenden- und Umweltgefährdung zu beachten sind, deren Gefährdungsbeurteilung nicht Inhalt dieser Studie war.

Fremdölabscheidung

Eine Fremdölabscheidung ist durch die Anschaffung eines Skimmers zunächst mit Rohstoffaufwendungen und Investitionskosten verbunden, die je nach Anlage im Bereich von wenigen 100 Euro bis mehreren Tausend Euro variieren. Die laufenden Kosten sind durch einen niedrigen Energie- und Wartungsbedarf hingegen vergleichsweise gering. Finanziell kann sich die Anschaffung im betrachteten Szenario rentieren, wenn durch den täglichen Einsatz eine Standzeitverlängerung von mindestens fünf Wochen erzielt werden kann. Ökologisch könnte gegenüber dem Referenzszenario ein positiver Impact bereits deutlich früher generiert werden. In der Studie konnten schon bei einer Standzeitverlängerung von drei Wochen alle ökologischen Faktoren verbessert werden. Durch den Sensitivitätsbereich der Studie wurden nur Werte zwischen drei und sieben Wochen ermittelt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der ökologische Break-Even-Point im Bereich einer Standzeitverlängerung von ca. zwei Wochen oder weniger liegt.

Pasteurisierung

Bei der Pasteurisierung handelt es sich um ein derzeit experimentelles Verfahren, das gegenüber der chemischen Behandlung mit Bioziden vollständig ohne zusätzliche Chemikalien operiert. Durch die notwendige Heiztechnik und die zugehörigen Regelungs- und Überwachungssysteme ist das Verfahren jedoch an sehr hohe Investitions- und Rohstoffaufwendungen gebunden. Hinzu kommt ein vergleichsweise hoher wiederkehrender energetischer Aufwand im Betrieb. Dies führte im betrachteten Szenario dazu, dass sowohl ökologisch als auch ökonomisch die zusätzlichen Aufwendungen nicht durch die eine realistisch erzielbare Standzeitverlängerung ausgeglichen werden konnte. Hier sei angemerkt, dass der Variationsspielraum der Studie im Fall der Pasteurisierung zwischen drei und sieben Wochen lag. Wird durch das Verfahren eine Standzeitverlängerung von mehr als sieben Wochen erzielt, sind ökologische Vorteile denkbar. Gleichzeitig können die Ergebnisse für einen alternativen Systemaufbau, z. B. durch den Einsatz von Bypass-Geräten anstelle einer Erwärmung des gesamten Tankinhaltes, ggf. anders ausfallen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass es, solange keine verlässlichen Daten zur erzielbaren Standzeitverlängerung vorliegen, dem Anwendenden obliegt, die Effektivität der Maßnahmen im eigenen System zu beurteilen. Die vorliegenden Daten können aber als Entscheidungsgrundlage dienen, um ein passendes Verfahren für das eigene System auszuwählen. In diesem Kontext kann als erster Schritt der Einsatz von Biozidstoffen empfohlen werden, da dieser als einmalige Maßnahme auch ohne langfristige Investitionen zu testen ist.

6.2 Ausblick

Die zuvor beschriebenen Schwierigkeiten bei der Datenverfügbarkeit unterstreichen den Bedarf an weiteren, experimentell gestützten Studien zu konservierenden KSS-Maßnahmen. Um fundierte, datenbasierte Ergebnisse zu erzielen, ist eine Langzeitstudie bezüglich des Alterungsverhal-

tens von KSS und verschiedener standzeitverlängernder Maßnahmen erforderlich. Im Rahmen dieser Studie müssen regelmäßige oder idealerweise permanente Überwachungsschritte durchgeführt werden, um den Zustand des KSS über einen längeren Produktionszeitraum kontinuierlich zu prüfen und zu bewerten. Die erfassten Daten dienen als Grundlage, um die Wirksamkeit verschiedener standzeitverlängernder Maßnahmen über einen längeren Zeitraum experimentell miteinander zu vergleichen. Hierbei sollten nicht nur klassische Maßnahmen, sondern ebenso industriell nicht verbreitete Maßnahmen untersucht werden. Auch die Betrachtung von kombinierten Maßnahmenzenarien ist in diesem Zusammenhang ratsam, da hier die derzeitige Datenlage noch lückenhafter ausfällt. Zudem sollte sich die Überwachung nicht nur auf den biologisch-chemischen Zustand des KSS beschränken. Es ist gleichzeitig notwendig, die mit dem KSS erzielbare Werkstückqualität während des Untersuchungszeitraums zu beurteilen, um die Einsatzfähigkeit zu gewährleisten und die Produktivität nicht zu beeinträchtigen. Der Erfolg der oben genannten Langzeitstudie hängt daher maßgeblich vom Konzept der Überwachung des KSS-Zustandes ab. Die Zukunft der Überwachung von KSS-Zuständen liegt vor allem im Bereich des Online-Monitorings und der transparenten Echtzeit-Zustandsbestimmung. Hierfür können Sensorkonzepte genutzt werden, die in Maschinen- oder Produktionsnetzwerken integriert sind und dort relevante Daten erfassen. Die Vorteile des Einsatzes solcher Systeme sind vielfältig und korrelieren direkt mit der Minimierung von Störfaktoren im Fluid. Dies kann insgesamt zu einer verlängerten Standzeit, geringeren Werkzeug- und Abfallkosten sowie einem insgesamt nachhaltigeren Betrieb des KSS-Systems führen.^{164,165,166}

¹⁶⁴ Vgl. VDI 4800:2018-03 (Blatt 2).

¹⁶⁵ Vgl. Peterka, J. et. al. (2023), S. 5794.

¹⁶⁶ Vgl. Astakhov, V.P. und Joks, S. (2012), S. 336-337.

LITERATURVERZEICHNIS

Astakhov, V. P. und Joksch, S. (2012): Metalworking fluids (MWFs) for cutting and grinding – Fundamentals and recent advances, Oxford, Woodhead Publ, Woodhead Publishing in materials, ISBN 978-0-85709-061-4.

Baumann Mineralölvertieb (2019): Kühlschmierstoffe Fibel [online] [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.baumann-oil.de/documents/k%C3%BChlschmierstoffe%20fibel3.pdf>

Behrendt, T.; Zein, A. und Min, S. (2012): Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. In: CIRP Annals, 61 (1), S. 43 – 46. ISSN 00078506. doi:10.1016/j.cirp.2012.03.103

Benedicto, E.; Carou, D. und Rubio, E. M. (2017): Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. In: Procedia Engineering, 184, S. 99 – 116. ISSN 1877-7058. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.075

Bernstein, W. Z.; Boettjer, T. und Ramanujan, D. (2021): Quantifying Life Cycle Inventories for Machining Processes at Detailed Design. In: Procedia CIRP, 98, S. 370 – 375. ISSN 22128271. doi:10.1016/j.procir.2021.01.119

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2007): TRGS 611 Verwendungsbeschränkungen für wassermischbare bzw. wassergemischte Kühlschmierstoffe, bei deren Einsatz N-Nitrosamine auftreten können [online] – Technische Regel für Gefahrstoffe.

Canter, N. (2019): Metalworking fluids: The quest for bioresistance [online] – To extend fluid life, formulators need components that resist microbial attack. Society of Tribologists and Lubrication Engineers [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.stle.org/files/TLTArchives/2019/03_March/Feature.aspx

co2online (2022): Stromverbrauch für PC, Laptop & Tablet [online] [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.co2online.de/energie-sparen/strom-sparen/strom-sparen-stromspartipps/pc-notebook-tablet/#:~:text=So%20viel%20verbraucht%20ein%20Laptop,Nutzungsdauer%20im%20Jahr%2042%20Euro.>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2011): DGUV Regel 109-003 – Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen. DGUV-Information [abgerufen am: 18.10.2024], verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-regeln/1006/taetigkeiten-mit-kuehlschmierstoffen>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2020): Physikalische Entkeimungsverfahren zur Reduzierung der mikrobiellen Besiedlung in wassergemischtem KSS – FBHM-044, [abgerufen am: 12.12.2024], verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3984>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2011): Regel: Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen (BGR/GUV-R 143) [abgerufen am: 23.11.2023], verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/1006>

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2024): Stoffliste für Kühlschmierstoffe nach DIN 51385 für die Metallbearbeitung [online] – unter Mitarbeit von Anwendern, dem VSI e. V., der IG Metall und der BGHM, verfügbar unter: <https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pra/kss/vkis-vsigm-bghm-stoffliste-fuer-kuehlschmierstoffe.pdf>

DIN 8580:2022-12: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Deutsches Institut für Normung

DIN 8589-0:2003-09 (Teil 0): Fertigungsverfahren Spanen Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Deutsches Institut für Normung

DIN 51385:2013-12: Schmierstoffe - Bearbeitungsmedien für die Umformung und Zerspanung von Werkstoffen - Begriffe. Deutsches Institut für Normung

Eller, R. (2015): AM335x Reliability Considerations in PLC Applications [online] – Texas Instruments Application Report SPRABV9A [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.ti.com/lit/an/sprabv9a/sprabv9a.pdf?ts=1711623057714&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

Endress+Hauser (2017): Hoja de datos de seguridad según NOM 018-STPS-2015 [online] – Data Sheet [abgerufen am: 15.01.2025], verfügbar unter: [https://portal.endress.com/wa001/dla/5001107/5042/000/00/MSDS_CPY20-E_\(MEX\).pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5001107/5042/000/00/MSDS_CPY20-E_(MEX).pdf)

Endress+Hauser (2021a): 1-Kanal-Messumformer Liquiline CM42 [online] – Data Sheet [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://bdih-download.endress.com/files/DLA/005056A500261EDBB1EBAA346EDDEA72/KA01481CDE_0121.pdf

Endress+Hauser (2021b): Memosens CPS16E pH/ORP sensor for standard applications in process technology [online] – Data Sheet [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://portal.endress.com/dla/5001132/0934/000/00/TI01600CEN_0121.pdf

Endress+Hauser (2022): Sicherheitsdatenblatt pH-Pufferlösung CPY20-G gemäß 1907/2006/EG Artikel 31 [online] - Data Sheet [abgerufen am 15.01.2024], verfügbar unter: [https://portal.endress.com/dla/5001107/3728/000/00/MSDS_CPY20-G_\(AUS\).pdf](https://portal.endress.com/dla/5001107/3728/000/00/MSDS_CPY20-G_(AUS).pdf) , S. 4

Environmental Systems GmbH (2017): Kühlschmierstoffpflege - System ES – CETUS speziellen Ultraschall Technologie [online] – Chemikalienfreie Keimzahlreduzierung von Kühlschmierstoffen durch den Einsatz einer speziellen Ultraschall - Technologie [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.environmental-systems.de/Produkt-Info%20Nr.%207.1.pdf>

Europäische Kommission (2019): Communication from the Commission: The European Green Deal [online]. [abgerufen am 03.02.2025], verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF

European Commission - DG Environment (2012): Assessment of resource efficiency indicators and targets [online] – Final report [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://wayback.archive-it.org/12090/20151220155712/http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/report.pdf

Fraunhofer FEP (2005): Silber und Kupfer - Gemeinsam star im Kampf gegen Keime [online]. Kurzbericht [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.fep.fraunhofer.de/content/dam/fep/de/documents/Produktflyer/F05_Silber_und_Kupfer_Gemeinsam_stark_im_Kampf_gegen_Keime_DE_net.pdf

Fraunhofer IGB (2023): Verlängerung der Standzeit von Kühlschmierstoffen [online] – Reduktion der biologischen Kontamination [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/wasser-abwasser/advanced-oxidation-processes-aop/kuehlschmierstoffe.html>

Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017a): Cutting Fluids - Monitoring and Maintenance; FTI 906 [abgerufen am: 23.11.2023], verfügbar unter: <https://www.fuchs.com/fileadmin/schmierstoffe/Prospekte/FTI/Cutting-Fluids-Monitoring-and-Maintenance.pdf>

Fuchs Schmierstoffe GmbH (2017b): Kühlschmierstoffe – Pflege und Überwachung [online] – FTI 906 [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.fuchs.com/de/de/produkte/download-center/download/file/248559-Kuehlschmierstoffe-Pflege-und-Uberwachung-Technical-Information/>

Gerulová, K.; Neštický, M.; Buranská, E. und Ružarovský, R. (2016): Real Time Monitoring and Automatic Regulation System for Metalworking Fluids. In: Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, 24 (38), S. 27 – 34. ISSN 1338-0532. doi:10.1515/rput-2016-0035

Gesamtverband der Arbeitgeberverbände der Metall- und Elektro-Industrie e.V. (2022): Die Metall- und Elektro-Industrie in der Bundesrepublik Deutschland in Zahlen [online] – Zahlenheft 2022, verfügbar unter: <https://www.gesamtmittel.de/zahlen-fakten/zahlenheft/>

Güth, F.; Arki, P. und Joseph, Y. (2015): Field-effect Based pH Sensors for Cutting Fluid Condition Monitoring. In: Procedia Engineering, **120**, S. 150 – 153. ISSN 1877-7058. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.591

Hans Bussmann GMBH (2024): CNC Oil Skimmer F450 [online] – Datenblatt [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.bussmann-shop.de/media/pdf/cc/65/ac/Oil_Skimmer_Prospekt_mit-LogoZT2lIYD0cRbMA.pdf

helcotec Chemie u. Technik GmbH (2023a): Kostenoptimierung bei Wassergemischten KSS [online] [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.helcotec.com/kostenoptimierung-bei-wassergemischten-kss/>

helcotec Chemie u. Technik GmbH (2023b): Bakterien im Kühlschmierstoff [online], 15.01.2025, verfügbar unter: <https://www.helcotec.com/bakterien-im-kuehlschmierstoff/#:~:text=Bei%20hohem%20Eintrag%20von%20Fremd%C3%B6len,aufschwimmende%20%C3%96l%20sehr%20gut%20entfernen.>

Herrmann, C.; Madanchi, N.; Winter, M.; Öhlschläger, G.; Greßmann, A.; Zettl, E.; Schwengers, K. und Lange, U. (2017): Wassermischbare Kühlschmierstoffe – Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/Studie_Kuehlschmierstoffe_barrierefrei.pdf

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. ISSN 0948-3349. doi:10.1007/s11367-016-1246-y

ifm electronic gmbh (2023): TA2292 Temperaturtransmitter [online] – Datenblatt [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.ifm.com/de/de/product/TA2292>

Ilube – Florian Denifl (2024): CNC-Oil-Skimmer Bänder [online] – Produktübersicht [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://ilube.at/shop/produkt/ilube-cnc-oil-skimmer-baender/>

Industrie- und Handelskammer (IHK) Köln (2021): Trendstudie Nachhaltiges Wirtschaften [online] – Chancen für die regionale Wirtschaft. IHK Trendstudie Februar 2021 [abgerufen am: 07.03.2024], verfügbar unter: <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/5115624/bc5c0352e26ebe68c947fe9588c7a6b8/trendstudie-nachhaltiges-wirtschaften-data.pdf>

Iowa Waste Reduction Center (2003): Cutting Fluid Management: Small Machining Operations. In: Iowa Waste Reduction Center Book Gallery, [abgerufen am: 12.12.2024], verfügbar unter: https://scholarworks.uni.edu/iwrc_facbook/12

IPCC (2021): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis, Cambridge University Press, ISBN 9781009157896.

Jurina, F.; Peterka, J.; Vozar, M.; Patoprsty, B. und Vopat, T. (2023): Design of Real-Time Monitoring System for Cutting Fluids. In: *Designs*, 7 (2), S. 43. ISSN 2411-9660. doi:10.3390/designs7020043

Kapoor, R.; Selvaraju, S. B.; Subramanian, V. und Yadav, J. S. (2024): Microbial Community Establishment, Succession, and Temporal Dynamics in an Industrial Semi-Synthetic Metalworking Fluid Operation: A 50-Week Real-Time Tracking. In: *Microorganisms*, 12 (2). ISSN 2076-2607. doi:10.3390/microorganisms12020267

Kastanaki, E. und Giannis, A. (2021): Dynamic estimation of future obsolete laptop flows and embedded critical raw materials: The case study of Greece. In: Waste management (New York, N.Y.), 132, S. 74 – 85. Waste management (New York, N.Y.). doi:10.1016/j.wasman.2021.07.017

KHS (2024): KHS HASYTEC Dynamic Biofilm Protection [online] – Mit Ultraschall Ablagerungen in Maschinen reduzieren [abgerufen am: 12.12.2024], verfügbar unter: <https://www.khs.com/unternehmen/medien/presstexte/presseinformationen/detail/khs-hasytec-dynamic-biofilm-protection>

Kiechle, A. (1996): Cost analysis for the utilization of cooling lubricants; Kostenanalyse beim Einsatz von Kuehlschmierstoffen – Technische Arbeitstagung Hohenheim des UNITI Bundesverbandes Mittelstaendischer Mineraloelunternehmen e.V, Stuttgart (Germany). In: Mineraloeltechnik; Vol 41; Issue 10.

KMU LOFT Cleanwater GmbH (2021): Technische Daten Vakuumdestillationsverdampfer DESTIMAT LE [online] – Datenblatt [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.klc-cleanwater.de/fileadmin/user_upload/Produktblatt_DESTIMAT_DE_Jun21.pdf

Koch, T. (2015): Mikrobiologie der Kuehlschmierstoffe, UVK Verlagsgesellschaft mbH, ISBN 9783825251802.

Köhler, A.; Baron, Y.; Bulach, W.; Heinemann, C.; Vogel, M.; Behrendt, S.; Degel, M.; Krauß, N.; Buchert, M. (2018): Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion – Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands [abgerufen am 15.01.2025], verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI-ZRE_Studie_Energiespeichertechnologien_2_ueberarb_Auflage_bf.pdf

Lois-Benoit, D., et al. (2014): Computer usage and national energy consumption [online] – Results from a field-metering study. Energy Technologies Area - Berkeley Lab [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter:

<https://energyanalysis.lbl.gov/publications/computer-usage-and-national-energy>

Ma, S.; Kim, K.; Huh, J.; Da Kim, E.; Lee, S. und Hong, Y. (2018): Regeneration and purification of water-soluble cutting fluid through ozone treatment using an air dielectric barrier discharge. In: Separation and Purification Technology, 199, S. 289 – 297. ISSN 13835866. doi:10.1016/j.seppur.2018.02.005

Madanchi, N.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2017a): Functional and Environmental Evaluation of Alternative Disinfection Methods for Cutting Fluids. In: Procedia CIRP, 61, S. 558 – 563. ISSN 22128271. doi:10.1016/j.procir.2016.11.175

Madanchi, N.; Winter, M.; Thiede, S. und Herrmann, C. (2017b): Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design. In: Procedia CIRP, 61, S. 564 – 569. ISSN 22128271. doi:10.1016/j.procir.2016.11.192

Madanchi, N. (2022): Model Based Approach for Energy and Resource Efficient Machining Systems, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-030-87539-8.

Mathieu, L.; Keraval, A.; Declercq, N. F. und Block, J.-C. (2019): Assessment of a low-frequency ultrasound device on prevention of biofilm formation and carbonate deposition in drinking water systems. In: Ultrasonics sonochemistry, 52, S. 41 – 49. Ultrasonics sonochemistry. doi:10.1016/j.ultsonch.2018.10.029

Mattsby-Baltzer, I.; Sandin, M.; Ahlström, B.; Allenmark, S.; Edebo, M.; Falsen, E.; Pedersen, K.; Rodin, N.; Thompson, R. A. und Edebo, L. (1989): Microbial growth and accumulation in industrial metal-working fluids. In: Applied and environmental microbiology, 55 (10), S. 2681 – 2689. ISSN 0099-2240. doi:10.1128/aem.55.10.2681-2689.1989

Myshkin, N. K.; Markova, Liubou V. (2018): On-line condition monitoring in industrial lubrication and tribology, Springer, Cham, Applied condition monitoring. volume 8, ISBN 978-3-319-61133-4 [abgerufen am: 23.11.2023], verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-61134-1.pdf>

Omega (2014): ARMTIE Heizstab in Industrieausführung für Wasser, mit Thermostat [online] – Datenblatt [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.omega.de/pptst/ARMTIE_HEATER.html

Peterka, J.; Frantisek, J.; Vozar, M.; Patoprsty, B.; Vopat, T.; Simna, V. und Bozek, P. (2023): Standalone Sensors System for Real-Time Monitoring of Cutting Emulsion Properties with Adaptive Integration in Machine Tool Operation. In: *Sensors*, **23** (13), S. 5794. ISSN 1424-8220. doi:10.3390/s23135794

ph-cleantec GmbH (2021): Thermische Entkeimung von Kühlschmierstoffen [online] – Technische Produktinformation, 29.11.2021 [abgerufen am: 07.03.2024], verfügbar unter: <https://www.ph-cleantec.de/files/ph-cleantec/downloads/de/fachartikel/Thermische%20Entkeimung%20von%20K%C3%BChlschmierstoffen%20-%205%20Seiten%2029.11.2021.pdf>

Schmidt, J.; Thorenz, B. und Döpfer, F. (2023): Design of a reference part for the comparison of tools in plastic milling operations. In: *Procedia CIRP*, **119**, S. 981 – 986. ISSN 22128271. doi:10.1016/j.procir.2023.03.142

Siemens AG (2022): Gerätehandbuch Industrielle Schalttechnik [online] – Schaltgeräte Schütze / Schützkombinationen SIRIUS 3RT [abgerufen am: 12.12.2024], verfügbar unter: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/557/60306557/att_918431/v1/manual_SIRIUS_contactors_3RT_de-DE.pdf

Siemens AG (2024a): CPU 1215C - 6ES7215-1AG40-0XB0 [online] – Data Sheet. Siemens AG [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/WW/Catalog/Product/6ES7215-1AG40-0XB0>

Siemens AG (2024b): Leistungsschütz 3RT2026-1BB40 [online] – Data sheet. Siemens AG [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/de/Catalog/Product/3RT2026-1BB40>

Siemens AG (2024c): Netzteil 1-Phasig DC 24V - 6EP1332-1SH71 [online] – Data Sheet. Siemens AG [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://support.industry.siemens.com/cs/pd/399209?pdtdi=td&dl=de&lc=de-DE>.

Statista (2023): Verteilung der Betriebskosten bei Werkzeugmaschinen in Deutschland im Jahr 2010 [online] [abgerufen am: 27.11.2023], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/236805/umfrage/lebenszykluskosten-bei-werkzeugmaschinen/>

Statistisches Bundesamt (2022): Genesis-Onlinedatenbank [online] – Entsorgungsmengen für Abfallschlüssel 120106-G bis 120109-G [abgerufen am: 06.09.2024].

Statistisches Bundesamt (2023): Umsatz im deutschen Maschinenbau nach ausgewählten Sektoren in den Jahren 2021 und 2022 (in Milliarden Euro) [online] [abgerufen am: 26.11.2023], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173637/umfrage/branchenumsatz-des-maschinenbaus-in-deutschland-nach-sektoren/>

Tang, L.; Zhang, Y.; Li, C.; Zhou, Z.; Nie, X.; Chen, Y.; Cao, H.; Liu, B.; Zhang, N.; Said, Z.; Debnath, S.; Jamil, M.; Ali, H. M. und Sharma, S. (2022): Biological Stability of Water-Based Cutting Fluids: Progress and Application. In: Chinese Journal of Mechanical Engineering, **35** (1). ISSN 1000-9345. doi:10.1186/s10033-021-00667-z

VDI 3397:2016-10 (Blatt 3): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Entsorgung von Kühlschmierstoffen, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3397:2020-3 (Blatt 1): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bearbeitungsmedien (BM) für die Umformung und Zerspanung Kühlschmierstoffe, Umformschmierstoffe, Minimalmengenschmierstoffe, Multifunktionsöle, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3397:2020-3 (Blatt 2): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Pflege von Kühlschmierstoffen für spanende und umformende Fertigungsverfahren Maßnahmen zur Qualitätserhaltung, Prozessverbesserung, Abfall- und Abwasserverminderung, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 3397:2020-6 (Blatt 4): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Maßnahmen zur Verlängerung der Anwendungsdauer und der Qualitätserhaltung von wassergemischten Kühlschmierstoffen, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 4600:2021-01: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Beuth Verlag, Berlin.

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

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

VDW (2023): Produktion von Werkzeugmaschinen nach Maschinen- gruppe in Deutschland im Jahr 2022 (in Millionen Euro) [online] [abgerufen am: 26.11.2023], verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29722/umfrage/produktion-von-erodiermaschinen-in-deutschland-seit-2004/>

Verivox (2024): Wasserkosten berechnen [online] [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: <https://www.verivox.de/strom-gas/ratgeber/wasserkosten-berechnen-und-sparen-1000796/>

- Webber, A.; Haj-Omar, Amr (2018):** Calculating Useful Lifetimes of Temperature Sensors [online] – Texas Instruments Application Report SNOA994 [abgerufen am: 07.08.2024], verfügbar unter: https://www.ti.com/lit/an/snoa994/snoa994.pdf?ts=1711559719484&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- Weck, M. (2006):** Werkzeugmaschinen 5, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-38748-7.
- 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. ISSN 0948-3349. doi:10.1007/s11367-016-1087-8
- Westermann, H.-H.; Kafara, M. und Steinhilper, R. (2015):** Development of a Reference Part for the Evaluation of Energy Efficiency in Milling Operations. In: Procedia CIRP, 26, S. 521 – 526. ISSN 22128271. doi:10.1016/j.procir.2014.07.104
- Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung e.V. WSM (2024):** Strukturmerkmale Stahl- und Metallverarbeitung [online], 2024 [abgerufen am: 15.03.2024], verfügbar unter: <https://www.wsm-net.de/wsm-industrie>
- 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. Environmental science & technology. doi:10.1021/es903297k

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)
Bülöwstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

