

VDI

Zentrum  
Ressourceneffizienz

# Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

## Wassermischbare Kühlschmierstoffe



## Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands - Wassermischbare Kühlschmierstoffe

### Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig  
Nadine Madanchi, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig  
Dr.-Ing. Marius Winter, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig  
Gerlind Öhlschläger, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig  
Alexander Greßmann, BiPRO GmbH  
Elisabeth Zettl, BiPRO GmbH  
Katharina Schwengers, BiPRO GmbH  
Dr.-Ing. Ulrike Lange, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Für die fachliche Unterstützung danken wir Herrn Dr.-Ing. Peter Eisner, Leiter der Abteilungen Verfahrensentwicklung pflanzliche Rohstoffe und Verfahrensentwicklung Lebensmittel des Fraunhofer-Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung Freising, Herrn Siegfried Egner, Abteilungsleiter Physikalische Prozesstechnik des Fraunhofer-Instituts für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik Stuttgart und Herrn Prof. Dr. Hubert Röder, Leiter des Fachgebiets Betriebswirtschaft Nachwachsender Rohstoffe der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.

Die Studie wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

### Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30-27 59 506-0  
Fax +49 30-27 59 506-30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

VDI ZRE Publikationen:  
Studie

Ökologische und ökonomische Bewertung  
des Ressourcenaufwands

Wassermischbare Kühlschmierstoffe



# INHALTSVERZEICHNIS

|   |    |
|---|----|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS   | 3  |
| TABELLENVERZEICHNIS   | 5  |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS   | 7  |
| KURZFASSUNG   | 10 |
| 1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DER STUDIE  | 17 |
| 2 AUFBAU DER STUDIE   | 19 |
| 3 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER GRUNDÖLE  | 20 |
| 3.1 Einsatz wassermischbarer KSS in der metallverarbeitenden<br>Industrie                   | 20 |
| 3.1.1 Metallbearbeitungsverfahren   | 20 |
| 3.1.2 Einsatz von wassermischbaren KSS  | 22 |
| 3.2 Grundöle für KSS-Emulsionen   | 23 |
| 3.2.1 Mineralische Grundöle   | 24 |
| 3.2.2 Tierische und pflanzliche Grundöle  | 26 |
| 3.3 Recherche von Ökobilanzen zum Vergleich verschiedener<br>Grundölvarianten               | 28 |
| 4 METHODIK ZUR ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN<br>BEWERTUNG                                   | 32 |
| 4.1 Räumliche Festlegung des Untersuchungsrahmens   | 32 |
| 4.1.1 Rohstoffgewinnung und Grundölherstellung  | 33 |
| 4.1.2 KSS-Herstellung   | 34 |
| 4.1.3 KSS-Nutzung   | 35 |
| 4.1.4 KSS-Entsorgung  | 39 |
| 4.2 Festlegung des Referenzbauteils   | 40 |
| 4.3 Festlegung der funktionellen Einheit  | 43 |
| 4.4 Ökologische Bewertung: Quantifizierung von<br>Randparametern und In- und Output-Strömen | 45 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.5   | Ökonomische Bewertung: Auswahl und Quantifizierung der Kostenpositionen | 49 |
| 4.5.1 | Auswahl der Kostenpositionen  | 49 |
| 4.5.2 | Quantifizierung ausgewählter Kostenpositionen                           | 50 |
| 5     | ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG                  | 54 |
| 5.1   | Ergebnisse der ökologischen Bewertung                                   | 54 |
| 5.1.1 | Kumulierter Energieaufwand  | 54 |
| 5.1.2 | Kumulierter Rohstoffaufwand   | 57 |
| 5.1.3 | Wasserverbrauch   | 60 |
| 5.1.4 | Flächeninanspruchnahme  | 61 |
| 5.1.5 | CO <sub>2</sub> -Äquivalente  | 64 |
| 5.2   | Rohstoffkritikalität  | 68 |
| 5.3   | Ergebnisse der ökonomischen Bewertung                                   | 76 |
| 5.3.1 | Beschaffungs- und Wasserkosten  | 76 |
| 5.3.2 | Entsorgungskosten   | 76 |
| 5.3.3 | Gesamtkosten aus Sicht des KSS-Anwenders                                | 77 |
| 6     | ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN                                  | 80 |
| 6.1   | Zusammenfassung der Ergebnisse  | 80 |
| 6.2   | Schlussfolgerungen  | 82 |
|       | LITERATURVERZEICHNIS  | 83 |
|       | ANHANG A: AUSWERTUNG STATISTISCHER DATEN                                | 93 |
|       | ANHANG B: INTERVIEWS  | 94 |

---

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Aufbau der Studie  | 19 |
| Abbildung 2: Verteilung installierter<br>Werkzeugmaschinentypen   | 21 |
| Abbildung 3: Mögliche Öle und Stoffe zur Herstellung<br>von KSS-Emulsionen  | 24 |
| Abbildung 4: Untersuchungsrahmen zur ganzheitlichen<br>ökologischen und ökonomischen Bewertung von<br>Grundölalternativen für Kühlschmierstoffe | 32 |
| Abbildung 5: Materialflussschema für die Grundölherstellung   | 33 |
| Abbildung 6: Systemgrenze des betrachteten<br>Bearbeitungsprozesses   | 35 |
| Abbildung 7: Standzeit der Emulsion in Einzelmaschine und<br>Zentralanlage  | 38 |
| Abbildung 8: Entsorgungswege von Kühlschmierstoffen   | 40 |
| Abbildung 9: Gegenüberstellung möglicher Referenzbauteile   | 41 |
| Abbildung 10: Ausgewähltes Referenzbauteil von<br>Westermann et al.   | 42 |
| Abbildung 11: Materialflussschema für den gesamten<br>KSS-Lebenszyklus  | 44 |
| Abbildung 12: Prozesskette Herstellung Grundöl<br>Solvent-Raffinat  | 47 |
| Abbildung 13: Prozesskette Herstellung Grundöl<br>Rapsmethylester   | 48 |
| Abbildung 14: Kumulierter Energieaufwand (KEA) pro<br>funktionelle Einheit (FE) für den gesamten<br>Lebenszyklus                                | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 15: Kumulierter Energieaufwand (KEA) pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen      | 56 |
| Abbildung 16: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus           | 58 |
| Abbildung 17: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen     | 59 |
| Abbildung 18: Wasserverbrauch pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus der KSS-Varianten           | 60 |
| Abbildung 19: Wasserverbrauch pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen                       | 61 |
| Abbildung 20: Flächeninanspruchnahme pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus                      | 63 |
| Abbildung 21: Flächeninanspruchnahme pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen                | 64 |
| Abbildung 22: Treibhausgaspotenzial GWP100 pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus                | 65 |
| Abbildung 23: Treibhauspotenzial GWP100 pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen             | 67 |
| Abbildung 24: Bewertung des Versorgungsrisikos für Raps und Erdöl   | 75 |
| Abbildung 25: Gesamtkosten der KSS-Varianten pro funktionelle Einheit (FE) und Jahr, unterteilt nach Kostenpositionen | 78 |
| Abbildung 26: Break-Even-Point der Grundölalternativen Solvent-Raffinat und Rapsmethylester                           | 79 |



---

**TABELLENVERZEICHNIS**

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1:  | In- und Output-Mengen der Nutzungsphase   | 14 |
| Tabelle 2:  | Spezifische Kosten für Beschaffung, Wasser und Entsorgung   | 14 |
| Tabelle 3:  | Gesamtvergleich der Kriterien für die Grundölvarianten, bezogen auf die funktionelle Einheit                    | 15 |
| Tabelle 4:  | Charakterisierung von wassermischbaren KSS  | 22 |
| Tabelle 5:  | Empfehlungen zur Auswahl von wassermischbaren KSS in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Bearbeitungsverfahrens | 23 |
| Tabelle 6:  | Ökobilanzen zum Einsatz von Schmierstoffen  | 29 |
| Tabelle 7:  | Ableitung der funktionellen Einheit   | 43 |
| Tabelle 8:  | In- und Output-Mengen für die Nutzungsphase   | 46 |
| Tabelle 9:  | Kosten für Beschaffung des KSS-Konzentrats, Wasserverbrauch und Entsorgung                                      | 53 |
| Tabelle 10: | Beschaffungs- und Wasserkosten der funktionellen Einheit in Euro/a  | 76 |
| Tabelle 11: | Kosten der funktionellen Einheit für die Entsorgung in Euro/a   | 77 |
| Tabelle 12: | Kostenverteilung Beschaffung, Wasser, Entsorgung  | 79 |
| Tabelle 13: | Gesamtvergleich der Kriterien für die Grundölvarianten, bezogen auf die funktionelle Einheit                    | 80 |
| Tabelle 14: | Abfallmengen wassergemischter und nichtwassermischbarer KSS   | 93 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 15: | Inlandsablieferungen von wassermischbaren (wmb) KSS und nichtwassermischbaren (nwmb) KSS (2004-2015) | 93 |
| Tabelle 16: | Interviews zu Grundölalternativen für KSS-Emulsionen I   | 94 |
| Tabelle 17: | Interviews zu Grundölalternativen für KSS-Emulsionen II  | 95 |
| Tabelle 18: | Interviews zu Preisen für Grundöle und Grundölkomponenten  | 96 |

---

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>ADP</b>            | Abiotic Depletion Potential (Abiotischer Ressourcenverbrauch)   |
| <b>AP</b>             | Acidification Potential (Versauerungspotenzial)   |
| <b>BAFA</b>           | Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle   |
| <b>BSE</b>            | Bovine spongiforme Enzephalopathie  |
| <b>BUBW</b>           | Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg   |
| <b>C.A.R.M.E.N.</b>   | Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.   |
| <b>CEN</b>            | Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)   |
| <b>CH<sub>4</sub></b> | Methan  |
| <b>CLP</b>            | Classification, Labelling and Packaging of Chemicals (Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen) |
| <b>CML</b>            | Centrum voor Milieukunde  |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Kohlenstoffdioxid   |
| <b>DERA</b>           | Deutsche Rohstoffagentur  |
| <b>DIN</b>            | Deutsche Industrienorm  |
| <b>ECHA</b>           | Europäische Chemikalienagentur  |
| <b>EG</b>             | Europäische Gemeinschaft  |
| <b>EN</b>             | Europäische Norm  |
| <b>EoL</b>            | End-of-Life   |
| <b>EP</b>             | Eutrophication Potential (Eutrophierungspotenzial)  |
| <b>EU</b>             | Europäische Union   |
| <b>GHG</b>            | Greenhouse Gas (Treibhausgas)   |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>GWP</b>            | Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)   |
| <b>FAOSTAT</b>        | Food and Agriculture Organization Statistics<br>(Statistiken der Welternährungsorganisation) |
| <b>FE</b>             | Funktionelle Einheit   |
| <b>FNR</b>            | Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe  |
| <b>HHI</b>            | Herfindahl-Hirschmann-Index  |
| <b>HM</b>             | Heavy Metal (Schwermetalle)  |
| <b>ISO</b>            | Internationale Organisation für Normung  |
| <b>JMTBA</b>          | Japan Machine Tool Builders' Association   |
| <b>KEA</b>            | Kumulierter Energieaufwand   |
| <b>KMU</b>            | Kleine und mittlere Unternehmen  |
| <b>KRA</b>            | Kumulierter Rohstoffaufwand  |
| <b>KSS</b>            | Kühlschmierstoffe  |
| <b>MIN</b>            | Solvent-Raffinat   |
| <b>MMS</b>            | Minimalmengenschmierung  |
| <b>N<sub>2</sub>O</b> | Distickstoffmonoxid  |
| <b>NP</b>             | Nitrification Potential<br>(Nährstoffanreicherungspotenzial)                                 |
| <b>nwmb</b>           | nichtwassermischbar  |
| <b>OECD</b>           | Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und<br>Entwicklung                           |
| <b>ODP</b>            | Ozone Depletion Potential (Ozonabbau­potenzial)  |
| <b>PAO</b>            | Polyalphaolefine   |
| <b>PLI</b>            | Politisches Länderrisiko   |
| <b>PM</b>             | Particulate Matter (Feinstaubbelastungspotenzial)  |
| <b>POCP</b>           | Photochemical Ozone Creation Potential (Photosmog)   |

---

|               |   |
|---------------|---|
| <b>RD</b>     | Ressourcenverbrauch   |
| <b>ReCiPe</b> | Lebenszyklus-Folgenabschätzungsmethode<br>(Methode des Life Cycle Assessment) |
| <b>RiL</b>    | Rohstoffe in Lagerstätte  |
| <b>RLI</b>    | Regulatorisches Länderrisiko  |
| <b>RME</b>    | Rapsmethylester   |
| <b>TR</b>     | Technical Report (Technischer Bericht)  |
| <b>VDI</b>    | Verein Deutscher Ingenieure   |
| <b>wmb</b>    | wassermischbar  |

## KURZFASSUNG

In der spanenden und umformenden Metallverarbeitung besitzen Kühlschmierstoffe (KSS) eine hohe Bedeutung. Sie steigern die Produktivität und die Wirtschaftlichkeit der Prozesse.

In den Betrieben der metallverarbeitenden Industrie werden in rund 90 % der Bearbeitungsprozesse wassermischbare Kühlschmierstoffe eingesetzt.<sup>1</sup> Sie bestehen aus einem meist mineralölbasierten Grundöl und einem Additivpaket. Neben innovativen Technologien wie der Minimalmengenschmierung oder der Trockenbearbeitung können der Kühlschmierstoff-Verbrauch und damit einhergehende Kosten und Umweltbelastungen über Ressourceneffizienz-Maßnahmen reduziert werden. Dazu zählen z. B. die Kühlschmierstoff-Pflege zur Standzeitverlängerung oder die Substitution von Kühlschmierstoffen mit adäquaten, z. B. mineralölfreien Alternativen.

Das Ziel der Studie besteht darin, verfügbare abiotische und biotische Grundölalternativen für wassermischbare Kühlschmierstoffe zu recherchieren und deren ökologische und ökonomische Auswirkungen für einen Anwendungsfall zu quantifizieren und vergleichend zu bewerten. Dazu werden in Bezug auf eine zu definierende funktionelle Einheit

- die Aufwendungen<sup>2</sup> an Energie, Rohstoffen, Wasser, die benötigte Nutzungsfläche und die verursachten Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten über den gesamten Lebensweg ermittelt,
- die Versorgungskritikalität der Grundölalternativen bewertet sowie
- die entstehenden Kosten aus Sicht des Kühlschmierstoff-Anwenders bilanziert.

---

<sup>1</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015a).

<sup>2</sup> Die Ermittlung der Aufwendungen basiert auf den VDI-Richtlinien 4800 Blatt 1 und 2 sowie der VDI-Richtlinie 4600.

Die Durchführung einer vergleichenden ökologischen und ökonomischen Bewertung erfordert methodisch bedingt ein identisches Betrachtungssystem und eine funktionelle Einheit. Das Betrachtungssystem sollte zudem eine möglichst hohe Praxisrelevanz besitzen. Als Metallbearbeitungsverfahren wird daher für die vorliegende Studie der Fräsprozess gewählt, der in der Industrie überwiegend zur Bearbeitung metallischer Werkstücke eingesetzt wird.<sup>3</sup>

Wassermischbare Kühlschmierstoffe können entweder in Form von Lösungen oder Emulsionen Anwendung finden. Beim Fräsen empfiehlt die Literatur zur Bearbeitung von Werkstoffen, insbesondere von Stahl und Guss, den Einsatz von Emulsionen<sup>4</sup>, die für die Studie als zu bewertende wassermischbare Kühlschmierstoffe herangezogen werden.

Die für die Emulsionen zum Einsatz kommenden Grundöle werden dabei in Stoffe und Öle mineralischen Ursprungs sowie in Stoffe und Öle tierischen und pflanzlichen Ursprungs unterschieden.<sup>5</sup> Zu den Stoffen und Ölen mineralischen Ursprungs zählt das Solvent-Raffinat (MIN). Es wird überwiegend als Grundöl eingesetzt und dient daher als eine Alternative für die Bewertung.

Für die Stoffe und Öle tierischen und pflanzlichen Ursprungs wird als alternatives Grundöl Rapsmethylester (RME) herangezogen. Biobasierte, wassermischbare Kühlschmierstoffe finden als Nischenprodukte Verwendung<sup>6</sup> und besitzen zum Teil Vorteile gegenüber Mineralöl, wie z. B. eine höhere arbeitsmedizinische Verträglichkeit. Rapsöl bildet häufig den Grundstock für biobasierte, wassermischbare Kühlschmierstoffe. Dabei neigt das umgeesterte Rapsmethylester als Emulsion vorliegend zu einer schnelleren Verkeimung und Verharzung und führt zu verkürzten Standzeiten, die innerhalb der Studie durch drei entsprechende Szenarien in die Bewertung einbezogen werden. Da jedoch die Zusammensetzung bzw. der Aufbau biobasierter, wassermischbarer KSS für öffentlich zugängliche Studien meist

---

<sup>3</sup> Vgl. Schischke, K. et al. (2012), S. 12 ff.

<sup>4</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015e); Gomeringer, R. et al. (2014), S. 308.

<sup>5</sup> Vgl. Brinksmeier, E. et al. (2015), S. 621.

<sup>6</sup> Vgl. Riedel Schmierstoffe (2016) und Wascut Industrieöle GmbH (2001).

wettbewerbsbedingt der Geheimhaltung unterliegt und nur für Rapsmethylester eine Datenverfügbarkeit für die Ökobilanz recherchiert werden konnte, wurde Rapsmethylester als Alternative stellvertretend für biobasierte, wassermischbare Kühlschmierstoffe herangezogen. Zudem ist der Markt der biobasierten Schmierstoffe noch verhältnismäßig jung, so dass zukünftige Innovationen die technischen Eigenschaften von beispielsweise Kühlschmierstoffen auf Rapsöl-Basis positiv weiterentwickeln können.<sup>7</sup>

Die räumlichen Systemgrenzen des Untersuchungsrahmens für die Grundölvarianten Solvent-Raffinat und Rapsmethylester umfassen

- die Herstellungsphase (Rohölgewinnung, Grundölherstellung, Herstellung des Kühlschmierstoffkonzentrats),
- die Nutzungsphase und
- die Entsorgungsphase (Emulsionsspaltung mit thermischer Verwertung der Altölphase und Abwasserbehandlung der Wasserphase).

Der zeitliche Rahmen ist dabei auf ein Jahr festgelegt, um verschiedene Standzeiten der Grundölvarianten untersuchen zu können. Diese sind für die Kühlschmierstoff-Emulsion auf Solvent-Raffinat-Basis auf 20 Wochen bestimmt und für die Kühlschmierstoff-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis aufgrund der mikrobiellen Anfälligkeit auf 20, zwölf und acht Wochen.

Um einem methodisch bedingten, identischen Betrachtungssystem für beide Grundölalternativen gerecht zu werden, wird für die Nutzungsphase angenommen, dass die Kühlschmierstoff-Emulsionen sowohl mit Solvent-Raffinat als auch Rapsmethylester für den gleichen Bearbeitungsprozess auf gleiche Art und Weise eingesetzt werden, gleiche Additivpakete besitzen und die gleiche technologische Wirkung erzeugen. Insbesondere die Additivpakete wurden bereits in durchgeführten Ökobilanzen vernachlässigt.<sup>8</sup> Zudem

---

<sup>7</sup> Vgl. Wascut Industrieöle GmbH (2001).

<sup>8</sup> Vgl. u. a. Cuevas, P. (2010), S. 39; Ekman, A., Börjesson, P. (2011), S. 298; Vag, C. et al. (2002), S. 44.



schlussfolgerte eine Studie, die die Additivpakete in die ökobilanzielle Bewertung integrierte, dass die unterschiedlichen Grundöle die Hauptunterschiede in den Ergebnissen erzeugten.<sup>9</sup> Neben den getätigten Annahmen werden während der Nutzungsphase zusätzlich Ausschleppungen der Kühlschmierstoff-Emulsion über Spananhaftungen in Höhe von 1 % der Input-Menge kalkuliert.

Die Festlegung auf eine funktionelle Einheit (FE), also auf einen quantifizierten Nutzen des Produktsystems als Vergleichseinheit<sup>10</sup>, erfordert die Bestimmung eines Referenzbauteils, das innerhalb des Betrachtungssystems gefräst wird. Es wurde ein Referenzbauteil aus Stahl ausgewählt<sup>11</sup>, das eine hohe Komplexität an verwendeten konstruktiven Elementen besitzt (Endgewicht: 4,37 kg, abgetragene Spanmenge: 5,05 kg). Daraus resultiert unter der Bestimmung weiterer Prozessspezifikationen (u. a. 240 Arbeitstage, 2-Schichtsystem à acht Stunden etc.) eine funktionelle Einheit von 13.000 gefertigten Referenzbauteilen pro Jahr.

Die für die Herstellung dieser funktionellen Einheit benötigte Menge an Kühlschmierstoff-Emulsion wird dem Bearbeitungsprozess über eine Einzelversorgungsanlage mit einem Füllvolumen von 450 Litern zugeführt. Darüber errechnen sich die benötigten Emulsionsmengen in Abhängigkeit der Standzeit. Die Zusammensetzungen der Konzentrat- und Grundölmengen basieren dabei auf Literaturdaten: Die Emulsion setzt sich aus 5 % Konzentrat (bestehend aus 37 % Grundöl und 63 % Additiven) und 95 % Wasser zusammen. Das gesamte Mengengerüst ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

---

<sup>9</sup> Vgl. Winter, M., Öhlschläger, G. et al. (2012), S. 311 – 316.

<sup>10</sup> Vgl. DIN EN ISO 14044:2006 (2006), S. 11.

<sup>11</sup> Vgl. Westermann, H.-H., Kafara, M. und Steinhilper, R. (2015), S. 525.

Tabelle 1: In- und Output-Mengen der Nutzungsphase

| Standzeit  | Input-Menge:<br>KSS-Emulsion<br>(2,6*450 l bei 20 Wo) | Output-Menge:<br>KSS-Alt emulsion |  | Menge:<br>Konzentrat<br>(5% von Input) | Menge:<br>Grundöl<br>(37% von<br>Konzentrat) |             |
|--|---|-----------------------------------|--|--|--|-------------|
|  |   | kg/a                              | kg/a   | kg/a                                   | kg/a   |             |
| 20 Wochen für<br>RME und MIN<br>(2,6 Badwechsel) | Menge<br>Neubefüllungen                               | 1.170                             | KSS-Entsorgung<br>(Alt emulsion<br>nach Standzeit) | 1.170                                  | 58,5   | 21,6        |
|  | Nachsetzmenge für<br>Spananhafung                     | 663                               | KSS-Verlust über<br>Spananhafung                   | 663                                    | 33,2   | 12,3        |
|  | <b>Gesamt</b>   | <b>1.833</b>                      | <b>Gesamt</b>                                      | <b>1.833</b>                           | <b>91,7</b>                                  | <b>33,9</b> |
| 12 Wochen<br>für RME<br>(4,3 Badwechsel)         | Menge<br>Neubefüllungen                               | 1.950                             | KSS-Entsorgung<br>(Alt emulsion<br>nach Standzeit) | 1.950                                  | 97,5   | 36,1        |
|  | Nachsetzmenge für<br>Spananhafung                     | 663                               | KSS-Verlust über<br>Spananhafung                   | 663                                    | 33,2   | 12,3        |
|  | <b>Gesamt</b>   | <b>2.613</b>                      | <b>Gesamt</b>                                      | <b>2.613</b>                           | <b>130,7</b>                                 | <b>48,3</b> |
| 8 Wochen<br>für RME<br>(6,5 Badwechsel)          | Menge<br>Neubefüllungen                               | 2.925                             | KSS-Entsorgung<br>(Alt emulsion<br>nach Standzeit) | 2.925                                  | 146,3  | 54,1        |
|  | Nachsetzmenge für<br>Spananhafung                     | 663                               | KSS-Verlust über<br>Spananhafung                   | 663                                    | 33,2   | 12,3        |
|  | <b>Gesamt</b>   | <b>3.588</b>                      | <b>Gesamt</b>                                      | <b>3.588</b>                           | <b>179,4</b>                                 | <b>66,4</b> |

KSS: Kühlschmierstoffe, RME: Rapsmethyl ester, MIN: Solvent-Raffinat

Mit Hilfe der Ökobilanzierungssoftware Umberto NXT werden das ermittelte Mengengerüst in ein Stoffflussmodell überführt und die ökologischen Auswirkungen der eingesetzten Grundöialternativen Solvent-Raffinat und Rapsmethyl ester berechnet. Für auftretende Hintergrundprozesse (Energiebereitstellung etc.) werden Datensätze aus Ecoinvent 3.2 verwendet.

Die ökonomische Bewertung aus Sicht des Kühlschmierstoff-Anwenders beinhaltet die Beschaffungskosten der wassermischbaren Kühlschmierstoff-Konzentrate, die Wasserkosten zur Mischung der Kühlschmierstoff-Emulsion und die Entsorgungskosten (Gate Fee) der Alt emulsion beim zuständigen Entsorger (Tabelle 2).

Tabelle 2: Spezifische Kosten für Beschaffung, Wasser und Entsorgung

| Kostenposition                   | Solvent-Raffinat       | Rapsmethyl ester       |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Marktpreis KSS-Konzentrat (€/kg) | 4,10 €/kg              | 5,68 €/kg              |
| Kosten für Wasserverbrauch (€/t) | 1,80 €/t (0,0018 €/kg) | 1,80 €/t (0,0018 €/kg) |
| Entsorgungskosten (€/t)          | 150 €/t (0,150 €/kg)   | 150 €/t (0,150 €/kg)   |

Die Kosten werden ebenfalls auf die funktionelle Einheit und damit auf das vorgestellte Mengengerüst aus Tabelle 1 bezogen. Insbesondere die Beschaffungskosten der Kühlschmierstoff-Konzentrate können jedoch nur eine Momentaufnahme widerspiegeln, da sie in der Praxis von den benötigten Mengen, den spezifischen Produktpreisen, den Zuliefererverträgen und den damit verbundenen Preisnachlässen abhängig sind.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst und anhand eines Skalensystems mit „++“ als bestem und „--“ als schlechtestem Indikatorwert dargestellt.

**Tabelle 3: Gesamtvergleich der Kriterien für die Grundölvarianten, bezogen auf die funktionelle Einheit**

| Indikator                    | Solvent Raffinat | Rapsmethylester mit Standzeit |           |          |
|------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------|----------|
|                              |                  | 20 Wochen                     | 12 Wochen | 8 Wochen |
| Kumulierter Energieaufwand   | o                | ++                            | o         | --       |
| Kumulierter Rohstoffaufwand  | ++               | +                             | -         | --       |
| Wasserverbrauch              | ++               | ++                            | +         | o        |
| Flächeninanspruchnahme       | ++               | o                             | -         | --       |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente | o                | ++                            | o         | --       |
| Gesamtkosten                 | ++               | +                             | -         | --       |

Bei allen untersuchten Kriterien nehmen bei sinkender Standzeit der Emulsion auf Rapsmethylester-Basis die Aufwendungen, der Verbrauch, die Emissionen sowie die Kosten deutlich zu. Bereits ab einer Standzeit von weniger als 20 Wochen ist der Einsatz nicht mehr zu befürworten.

Der Vergleich der Auswirkungen der Grundölvarianten Rapsmethylester und Solvent-Raffinat mit jeweils einer Standzeit von 20 Wochen erzeugt aus ökologischer Sicht kein eindeutiges Ergebnis. Während das Solvent-Raffinat einen geringeren Rohstoffaufwand über den gesamten Lebensweg benötigt, weist der Einsatz des Rapsmethylesters einen geringeren Energieaufwand auf. Bei beiden Varianten fällt der Wasserverbrauch nicht ins Gewicht, wohingegen durch den Rapsanbau für die Herstellung des Rapsmethylesters die Ressource Fläche stark beansprucht wird. Diese spielt wiederum bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Solvent-Raffinat nur eine untergeordnete Rolle. Die Emissionen, angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente, die durch den Einsatz des Solvent-Raffinats über den gesamten Lebensweg ausgestoßen werden, verursachen dagegen eine um 30 % höhere Umweltbelastung.

Insbesondere aufgrund dieses letzten Ergebnisses bietet der Rapsmethylester bei gleicher Standzeit eine unter ökologischen Gesichtspunkten akzeptable Alternative.

Dem Kühlschmierstoff-Anwender ist aus ökonomischer Sicht der Einsatz des Kühlschmierstoffs auf Solvent-Raffinat-Basis zu empfehlen, da die Gesamtkosten knapp ein Viertel unter denen des Kühlschmierstoffs auf Rapsmethylester-Basis liegen. Hier ist nochmals darauf hinzuweisen, dass es sich bei diesen Kosten lediglich um eine Momentaufnahme handelt, die weder Zuliefererverträge, Mengenrabatte noch spezifische Preise für Spezialprodukte abbilden kann. Der Kühlschmierstoff-Anwender sollte in jedem Fall vor einer Kaufentscheidung die ausgewiesenen Standzeiten des Kühlschmierstoffs kritisch betrachten und gegebenenfalls testen, inwieweit sie einen Einfluss auf die ökonomische Bilanz ausüben.

Durch die Ergebnisse kann kleinen und mittleren Unternehmen der spanenden Metallbearbeitung grundsätzlich empfohlen werden, den Einsatz von am Markt verfügbaren, biobasierten wassermischbaren Kühlschmierstoffen anstelle von mineralölbasierten zu prüfen. Gerade für kleine Unternehmen sind dabei als weiterer Input die kompetente Betreuung und Erfahrung durch ihre Lieferanten erforderlich.

## 1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DER STUDIE

Kühlschmierstoffe (KSS) sind von essentieller Bedeutung in der spanenden und umformenden Metallverarbeitung. Sie übernehmen die grundlegenden Funktionen der Schmierung und Kühlung während des tribologischen Kontakts zwischen Werkzeug und Werkstück und erhöhen somit die Produktivität und die Wirtschaftlichkeit in der industriellen Metallverarbeitung.

Trotz innovativer Ansätze wie der Trockenbearbeitung und der Minimalmengenschmierung (MMS) stieg die KSS-Entsorgungsmenge und damit der KSS-Verbrauch im deutschen produzierenden Gewerbe von 717.000 Tonnen im Jahr 2011 kontinuierlich bis auf 791.000 Tonnen im Jahr 2014 an.<sup>12</sup> Die entsorgten Mengen teilen sich auf in rund 90 % wassergemischte KSS und 10 % nichtwassermischbare KSS (Anhang A). Wassergemischte KSS bestehen zu ca. 95 % aus Wasser, das vor dem Einsatz mit dem KSS-Konzentrat vermengt wird. Werden nur die KSS-Konzentrate miteinander verglichen, verteilen sich die auf den inländischen Markt gebrachten Mengen auf rund 40 % wassermischbare KSS-Konzentrate und 60 % nichtwassermischbare KSS-Konzentrate (Anhang A)<sup>13</sup>, wobei jedoch in den Betrieben der metallverarbeitenden Industrie in rund 90 % der Fertigungsprozesse wassermischbare KSS eingesetzt werden.<sup>14</sup>

Für Unternehmen stellt der KSS-Verbrauch mit ca. 8 – 16 % der Produktionskosten einen erheblichen Kostenfaktor dar.<sup>15</sup> Durch eine Reihe von Maßnahmen zur Lagerung, Pflege und Kontrolle von KSS können u. a. der Schmierstoff-Einsatz verringert und der Werkzeugverschleiß vermindert werden.<sup>16</sup> Dadurch erhöht sich die Effizienz des Einsatzes der KSS, Abfälle werden reduziert und Kosten gesenkt.

Eine weitere Möglichkeit, die Ressourceneffizienz zu erhöhen und damit die Kosten zu senken, besteht in der Substitution der KSS-Art durch adäquate

---

<sup>12</sup> Eigene Berechnung nach Statistisches Bundesamt (2013) – (2016a), Anhang A.

<sup>13</sup> Eigene Berechnungen nach Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrollen (2015), Anhang A.

<sup>14</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015a).

<sup>15</sup> Vgl. Verband Schmierstoff-Industrie e. V. (2016a).

<sup>16</sup> Vgl. VDI 3397 Blatt 2 (2008), S. 2.

Alternativen. Eine Befragung aus dem Jahr 1993 zeigte, dass ca. 25 % der wassermischbaren KSS-Mengen mineralölfreie Grundöle und ca. 75 % mineralölbasierte Grundöle enthielten.<sup>17</sup> Derzeit ist zwar bekannt, dass standardmäßig mineralölbasierte Grundöle für wassermischbare KSS eingesetzt werden, es konnten jedoch seit 1993 keine öffentlich verfügbaren Zahlen zur Mengenverteilung der auf dem Markt verfügbaren bzw. eingesetzten Grundöialternativen für wassermischbare KSS recherchiert werden. Zudem wurde keine Aussage über die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der mineralölfreien und mineralöhlhaltigen Grundöle der wassermischbaren KSS entlang dem gesamten Lebensweg getroffen.

Die Zielstellung der Studie ist folglich, generell verfügbare abiotische und biotische Grundöialternativen zu recherchieren und diese auf ihre ökologischen und ökonomischen Auswirkungen hin zu überprüfen. Die Ermittlung dieser Auswirkungen erfolgt über den gesamten Lebensweg der wassermischbaren KSS in Bezug auf eine definierte funktionelle Einheit und soll folgende Fragen beantworten:

- (1) Welche Aufwendungen an Material, Energie, Wasser und ggf. Fläche müssen über den Lebensweg des KSS aufgebracht werden?
- (2) Welche versorgungskritischen Rohstoffe werden bei den Alternativen verwendet?
- (3) Welche Kosten ergeben sich für die Grundöl-Varianten?

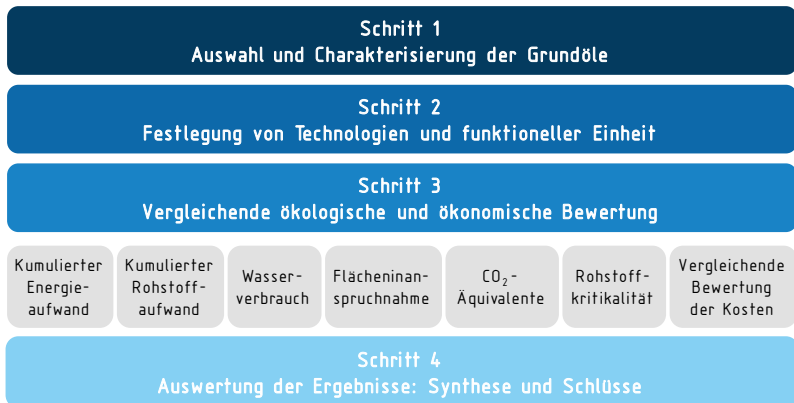
Die Studie soll kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) des metallverarbeitenden Gewerbes sowie Beratern und Forschungsinstitutionen als Informationsquelle dienen, welche lebenszyklusorientierten Überlegungen entsprechend der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 1 und 2 sowie der VDI-Richtlinie 4600 bei einer Entscheidung für oder gegen eine KSS-Art sowohl aus Umwelt- als auch aus Kostensicht möglich, hilfreich oder teilweise sogar notwendig sind.

---

<sup>17</sup> Vgl. Baumann, W. und Herberg-Liedtke, B. (1996), S. 26.

## 2 AUFBAU DER STUDIE

Die Bearbeitung der Studie erfolgt in vier Schritten (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Aufbau der Studie**

Der erste Schritt umfasst eine Recherche zum Einsatz von wassermischbaren KSS in der industriellen Metallbearbeitung in Deutschland. Es werden Grundölalternativen für wassermischbare KSS vorgestellt und diskutiert sowie darauf aufbauend Grundölalternativen festgelegt.

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

Im dritten Schritt erfolgt die vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Grundölvarianten unter Betrachtung folgender Wirkungskategorien: kumulierter Energieaufwand, kumulierter Rohstoffaufwand, Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme, Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, Rohstoffkritikalität und Kosten aus Sicht des KSS-Anwenders.

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

## 3 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER GRUNDÖLE

### 3.1 Einsatz wassermischbarer KSS in der metallverarbeitenden Industrie

#### 3.1.1 Metallbearbeitungsverfahren

Die Metallbearbeitung umfasst die Veränderung von Form und Gefüge metallischer Werkstoffe durch mechanische, physikalische und chemische Vorgänge. Die verschiedenen Vorgänge werden gemäß DIN 8589 in sechs Hauptgruppen unterteilt: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften ändern.<sup>18</sup> Vertiefend stellt die DIN 51521 einen Überblick über wassermischbare KSS bereit, die vorzugsweise bei der spanenden Bearbeitung (Hauptgruppe Trennen) zur Anwendung kommen.<sup>19</sup> Die spanende Bearbeitung wird dabei in zwei weitere Bereiche unterschieden: die Zerspanungsprozesse mit geometrisch bestimmter Schneide und die Zerspanungsprozesse mit geometrisch unbestimmter Schneide.<sup>20</sup>

Für Zerspanungsprozesse steht eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeugmaschinentypen zur Auswahl. Basierend auf einer Studie von Schischke et al. zeigt Abbildung 2 die Verteilung der installierten Werkzeugmaschinentypen in der EU-27 (Stand 2009). Rund 63 % der installierten Werkzeugmaschinen verfügen über eine geometrisch bestimmte Schneide (Dreh- und Fräsmaschinen). Bearbeitungsverfahren, die geometrisch unbestimmte Schneiden nutzen (in Schleif-, Hon- sowie Läppmaschinen), werden in 26 % der Fälle verwendet.

---

<sup>18</sup> Vgl. DIN 8589-0:2003-09 (2003), S. 7.

<sup>19</sup> Vgl. DIN 51521:1999-03 (1999), S. 2.

<sup>20</sup> Vgl. DIN 8589-0:2003-09 (2003), S. 8.



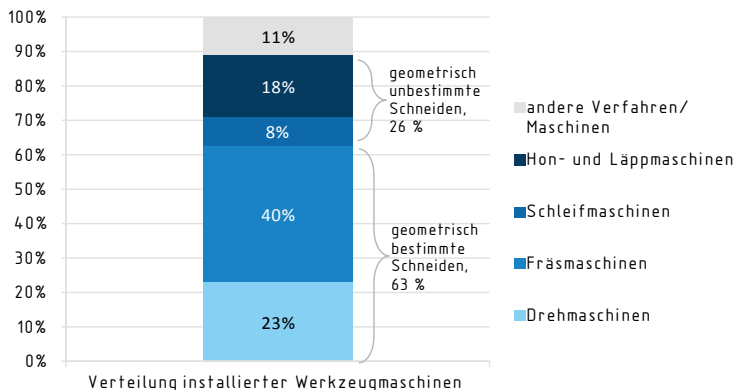


Abbildung 2: Verteilung installierter Werkzeugmaschinentypen<sup>21</sup>

Der Fokus der Studie liegt entsprechend Abbildung 2 auf Werkzeugmaschinen mit geometrisch bestimmter Schneide (Dreh- und Fräsprozesse). Es ist zu erwähnen, dass bei diesen Verfahren der Einsatz von KSS durch Minimalmengenschmierung oder Trockenbearbeitung teilweise reduziert werden kann.<sup>22</sup> Diese Schmierungsstrategien werden laut einer Umfrage jedoch in nur 15 % der Unternehmen der metallbearbeitenden Industrie angewandt<sup>23</sup> und sind neben dem Bearbeitungsverfahren auch vom zu realisierenden Ergebnis (Oberflächengüte, Materialeigenschaften etc.) sowie dem zu zerspanenden Werkstoff abhängig. Insgesamt überwiegt der Einsatz der Überflutungsschmierung, also der traditionelle Einsatz von KSS.

Bei den Trennverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide werden sowohl das Drehen und Fräsen als auch andere Verfahren wie u. a. das Gewindecschneiden und Räumen unterschieden. Für letztere Prozesse werden vorwiegend nichtwassermischbare KSS zum Einsatz empfohlen, weshalb diese Verfahren nicht weiter betrachtet werden.<sup>24</sup> Im Vergleich der Dreh- und Fräsverfahren wird in zwei Dritteln der Fälle gefräst. Für die vorliegende Studie wird als Bearbeitungsprozess somit das Fräsen herangezogen.

<sup>21</sup> In Anlehnung an Schischke, K. et al. (2012), S. 12 ff.

<sup>22</sup> Vgl. Weinert, K. et al. (2002), S. 67.

<sup>23</sup> Vgl. Schröter, M., Lerch, C. und Jäger, A. (2011), S. 14.

<sup>24</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015b).

### 3.1.2 Einsatz von wassermischbaren KSS

Wassermischbare KSS werden in ca. 90 % der metallverarbeitenden Prozesse eingesetzt.<sup>25</sup> Sie übernehmen grundlegende Funktionen der Schmierung und Kühlung während des tribologischen Kontakts zwischen Werkzeug und Werkstück und dienen zusätzlich dem Spanabtransport und dem Korrosionsschutz. Wassermischbare KSS setzen sich aus einem Grundöl und einem Additivpaket zusammen und werden vor der Anwendung mit Wasser gemischt. Hierbei wird zwischen Emulsionen und Lösungen unterschieden, die in Tabelle 4 kurz charakterisiert sind.

**Tabelle 4: Charakterisierung von wassermischbaren KSS<sup>26</sup>**

|                        | KSS-Emulsionen   | KSS-Lösungen  |
|------------------------|--|---|
| Grundöle               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mineralöle</li> <li>• Syntheten</li> <li>• Ester/(pflanzliche Öle)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserlösliche org. Stoffe (z. B. Polyalkylenglykole)</li> </ul>   |
| Gebrauchliche Additive | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emulgatoren</li> <li>• Korrosionsinhibitoren</li> <li>• Lösungsvermittler</li> <li>• Antischaummittel</li> <li>• Mikrobiozide</li> <li>• Polare Wirkstoffe und extreme Pressure-Zusätze</li> <li>• Pigmente</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Korrosionsschutzmittel (anorganische Salze)</li> <li>• Netzmittel (Detergenzien)</li> <li>• Wasserlösliche org. Stoffe</li> </ul>  |
| Eigenschaften          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disperse Verteilung einer Flüssigkeit in einer anderen</li> <li>• Verteilung wird stark durch Grenzflächen-spannung zwischen Molekülen beider Flüssigkeiten beeinflusst</li> <li>• Grenzflächen-spannung wird durch Emulgatoren verringert, wodurch eine stabile Emulsion entsteht</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Homogene Mischung von anorganischen und organischen Stoffen mit Wasser</li> <li>• Keine Emulgatoren werden benötigt, da gleiche Grenzflächen-spannung der zu vermischtenden Flüssigkeiten besteht</li> </ul> |

Die Auswahl des wassermischbaren KSS hängt insbesondere von dem Typ sowie der Zusammensetzung des Werkstoffs in Kombination zum eingesetzten Bearbeitungsverfahren ab. Die Literatur gibt dazu Empfehlungen zur Auswahl von wassermischbaren KSS in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Bearbeitungsverfahrens (Tabelle 5).

<sup>25</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015c).

<sup>26</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015d); Kassack, J. F. (1994), S. 8; in Anlehnung an Möller, U. J. und Nasser, J. (2013), S. 568.

Tabelle 5: Empfehlungen zur Auswahl von wassermischbaren KSS in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Bearbeitungsverfahrens<sup>27, 28</sup>

| Werkstoff | Fräsen   |                       | Drehen   |                       |            |
|-----------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|------------|
|           | BUBW     | Gomeringer, R. et al. | BUBW     | Gomeringer, R. et al. |            |
|           |          |                       |          | Schruppen             | Schlichten |
| Guss      | Emulsion | Emulsion*             | Emulsion | -                     | Emulsion   |
| Stahl     | Emulsion | Emulsion Lösung       | Emulsion | Emulsion Lösung       | Emulsion   |
| VA-Stahl  | Emulsion | k. A.                 | Emulsion | k. A.                 | k. A.      |
| Magnesium | k. A.    | -                     | k. A.    | -                     | -          |
| Kupfer    | k. A.    | Emulsion*             | k. A.    | -                     | Emulsion*  |

BUBW = Betrieblicher Umweltschutz Baden-Württemberg; k. A. = keine Angabe; \* wenn Trockenbearbeitung nicht möglich; - = kein Einsatz wassermischbarer KSS empfohlen

Überwiegend wird der Einsatz von KSS-Emulsionen für das Drehen und Fräsen von Guss und Stahl empfohlen. KSS-Lösungen spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Für die restlichen Werkstoffe fehlen entweder Angaben oder der Einsatz von KSS-Emulsionen bzw. KSS-Lösungen ist generell nicht zweckmäßig. In diesem Fall sollte meist auf die Verwendung von nichtwassermischbaren KSS zurückgegriffen werden.

Für die vorliegende Studie werden basierend auf den Literaturempfehlungen für den bereits festgelegten Fräsprozess der Werkstoff Stahl und eine KSS-Emulsion als KSS-Art herangezogen.

### 3.2 Grundöle für KSS-Emulsionen

Eine Vielzahl an unterschiedlichen Ölen und Stoffen (z. B. Fette, Polymere, Salze) können eingesetzt werden, um KSS-Emulsionen herzustellen (Abbildung 3).

<sup>27</sup> In Anlehnung an Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015e).

<sup>28</sup> In Anlehnung an Gomeringer, R. et al. (2014), S. 308.



Abbildung 3: Mögliche Öle und Stoffe zur Herstellung von KSS-Emulsionen<sup>29</sup>

Grundsätzlich wird in Stoffe und Öle mineralischen Ursprungs (abiotisch) sowie in Stoffe und Öle pflanzlichen oder tierischen Ursprungs (biotisch) unterschieden. Die entsprechenden Herstellungsverfahren sind umfassend in der Literatur beschrieben.<sup>30</sup>

### 3.2.1 Mineralische Grundöle

Die übereinstimmende Aussage befragter Experten lautet, dass der Einsatz mineralölhaltiger Grundöle im Vergleich zu tierischen und pflanzlichen Ölen und Stoffen deutlich überwiegt. Gemäß den amtlichen Mineralöldaten der BAFA wurden im Jahr 2015 ca. 21.100 Tonnen (Inlandsablieferungen) wassermischbarer KSS auf Mineralölbasis eingesetzt (Anhang A).<sup>31</sup>

Abbildung 3 entsprechend unterscheiden sich die mineralischen Öle und Stoffe in natürliche Kohlenwasserstoffe (insbesondere Solvent-Raffinate (MIN)), in chemischen Verfahren hergestellte synthetische Öle (insbesondere Polyalphaolefine) und in synthetische Ester (insbesondere Dicarbonsäureester).

<sup>29</sup> In Anlehnung an Brinksmeier, E. et al. (2015), S. 621.

<sup>30</sup> Vgl. Möller, U. J. und Nassar, J. (2013), S. 83 ff.; Mortier, R. M.; Fox, M. F. und Orszulik, S. T. (2010), S. 35 ff.; Mang, T. (1983), S. 41; Mang, T. und Dresel, W. (2007), S. 63 ff.

<sup>31</sup> Vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2015).

Die konventionellen Mineralöle (Solvent-Raffinate) werden durch die Schritte Destillation und Raffination aus Erdöl hergestellt<sup>32</sup>, bilden den überwiegenden Anteil der eingesetzten Grundöle und werden üblicherweise für reguläre, d. h. nicht anspruchsvolle Anwendungen eingesetzt.<sup>33</sup> Dazu zählen beispielsweise die wassermischbaren Kühlschmierstoffe.

Die synthetischen Grundöle werden aus chemisch definierten Grundbausteinen, die u. a. Erdöl umfassen, produziert und erfüllen häufig Spezialaufgaben.<sup>34</sup> Polyalphaolefine werden beispielsweise für Hochleistungskühlschmierstoffe verwendet und zeichnen sich durch eine minimale Verdunstung, einen hohen Flammpunkt bei niedriger Viskosität, einen hohen Viskositätsindex sowie eine ausgezeichnete Scher- und Alterungsstabilität aus.<sup>35</sup> Eine Befragung von Experten im Rahmen dieser Studie (Anhang B) zeigte, dass Polyalphaolefine vorwiegend bei spezifischen Anforderungen des Anwenders eingesetzt werden, etwa wenn hohe Kräfte entstehen oder bei langen und hohen Standzeiten. Sie finden weiterhin vor allem in der Schleifindustrie Anwendung<sup>36</sup> wenn besonders geringe Verdunstungsverluste an der Bearbeitungsstelle gefordert sind.<sup>37</sup> So weisen Polyalphaolefine – bei gleicher Viskosität von 10-30 Ns/m<sup>2</sup> – ein günstigeres Emissionsverhalten auf als Solvent-Raffinat. Dies kann unter bestimmten Konstellationen für die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten von entscheidender Bedeutung sein oder zur Reduzierung der Ausschleppungen führen. Der Einsatz von Polyalphaolefinen als Grundöl ist regulär jedoch nur bei nichtwassermischbaren KSS üblich<sup>38</sup>, da sie schlecht emulgierbar sind und durch den Syntheseprozess einen höheren Beschaffungspreis im Vergleich zum Solvent-Raffinat besitzen.

Dicarbonsäureester können als synthetische Ester für Schmierstoffe eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch eine hohe biologische Abbaubarkeit

---

<sup>32</sup> Vgl. Möller, U. J. und Nassar, J. (2013), S. 70; Verband Schmierstoff-Industrie e. V. (2016b).

<sup>33</sup> Vgl. Verband Schmierstoff-Industrie e. V. (2016b).

<sup>34</sup> Vgl. Möller, U.J. und Nassar, J. (2013), S. 84.

<sup>35</sup> Vgl. Rehbein, W. (2016).

<sup>36</sup> Vgl. Telefonische Aussage, 01.07.2016, Anhang B.

<sup>37</sup> Vgl. Telefonische Aussage, 04.07.2016, Anhang B.

<sup>38</sup> Vgl. Telefonische Aussage, 04.07.2016, Anhang B.

und eine geringe Flüchtigkeit aus. Ein bedeutender Nachteil der Dicarbonsäureester und anderer synthetischer Ester gegenüber den Polyalphaolefinen sowie dem Solvent-Raffinat liegt in der schlechten Löslichkeit von Additiven und vor allem in den hohen Beschaffungskosten.<sup>39</sup> Dennoch existieren auch in diesem Produktbereich aktuelle Entwicklungen, die wasser-mischbare Kühlschmierstoffe in Zukunft für die Anwendung praxisrelevant werden lassen können.<sup>40</sup>

Für die ökologische und ökonomische Bewertung dieser Studie wird aus den genannten Gründen das Solvent-Raffinat als praxisrelevantes Grundöl gewählt.

### 3.2.2 Tierische und pflanzliche Grundöle

Der Einsatz tierischer Grundöle zur Herstellung von Emulsionen ist laut übereinstimmender Auskunft von befragten Experten sehr selten (Anhang B). Mögliche Grundölquellen sind hierbei sowohl Talgfettsäuren als auch Lardöle. Tierische Grundölalternativen verfügen über eine beim Anwender eingeschränkte Akzeptanz, bedingt durch die BSE-Krise oder den Dioxin-Skandal. Weiterhin bestehen religiöse Einschränkungen, da eine 'koschere' oder 'Halal'-Zertifizierung von KSS auf Basis tierischer Stoffe und Öle vergleichsweise aufwendig ist. Tierische Stoffe und Öle werden, wenn überhaupt, vorzugsweise als Additive eingesetzt.

Bioschmierstoffe oder auch biobasierte Schmierstoffe sollten in Anlehnung an den Technical Report CEN/TR 16227 des Europäischen Komitees für Normung (CEN) die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:<sup>41</sup>

- **Erneuerbarkeit:** Gehalt an nachwachsenden Rohstoffen beträgt mindestens 25 %.
- **Biologische Abbaubarkeit:**  $\geq 60$  % entsprechend OECD 301 für Öle ( $\geq 50$  % für Schmierfette).

---

<sup>39</sup> Vgl. Möller, U.J. und Nassar, J. (2013), S. 91; Bartz, W.; Möller, U. (2000), S. 760.

<sup>40</sup> Vgl. Oemeta Chemische Werke GmbH (2016).

<sup>41</sup> Vgl. DIN CEN/TR 16227 (DIN SPEC 51523):2011-10 (2011), S. 12.

- **Toxizität:** nicht als „umweltgefährdend“ zu kennzeichnen entsprechend CLP-Richtlinie 1272/2008/EG.
- **Leistung:** „Gebrauchstauglichkeit“. Sowohl der Schmierstoff-Hersteller als auch der Verbraucher des Produktes müssen sicherstellen, dass der empfohlene Schmierstoff für eine bestimmte Anwendung geeignet ist.

Biobasierte KSS als Sparte der Bioschmierstoffe können über Eigenschaften verfügen, die sie für spezielle Fertigungsschritte vorteilhafter machen als KSS auf Mineralölbasis. Dazu zählen ein besseres Schmiervermögen, ein höherer Flammpunkt, bessere Verdampfungseigenschaften und höhere Hautverträglichkeit.<sup>42</sup> Der Anteil an biobasierten Metallbearbeitungsölen (darunter wassermischbare und nichtwassermischbare KSS) am Gesamtmarkt der Metallbearbeitungsöle beläuft sich derzeit auf rund 9,2 %.<sup>43</sup>

Biobasierte KSS werden auf Basis von beispielsweise Rapsöl oder Sojaöl hergestellt, wobei der Verein Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) anmerkt, dass „wassermischbare KSS als biogen nicht in Frage kommen“<sup>44</sup>. Das Portal Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (BUBW) gibt den Hinweis, dass Emulsionen auf Basis biologisch abbaubarer Produkte zu einer höheren Verkeimungsanfälligkeit neigen, kürzere Standzeiten aufweisen und damit einen verstärkten Biozideinsatz zur Konservierung benötigen.<sup>45</sup> Dennoch sind am Markt wassermischbare KSS verfügbar, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt wurden und in umgeesterter Form Anwendung finden.<sup>46</sup> Ergänzend wurde eine Befragung von Experten von Seiten verschiedener Hersteller sowie Verbänden/Behörden durchgeführt, die im Themengebiet KSS aktiv sind und die Marktsituation kennen. Vier zu diesem Thema kontaktierte Experten bestätigten den Einsatz von wassermischbaren KSS auf pflanzlicher Basis als Nischenprodukt und nannten dabei Rapsmethylester (RME) als eine Grundölvariante, das jedoch in der Anwendung u. a. eine geringe Alterungsstabilität besitzt, oxidativ instabil und

---

<sup>42</sup> Vgl. Effizienz-Agentur NRW (2008), S. 22.

<sup>43</sup> Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a); S. 32.

<sup>44</sup> Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014b), S. 467.

<sup>45</sup> Vgl. Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015a).

<sup>46</sup> Vgl. Riedel Schmierstoffe (2016) und Wascut Industrieöle GmbH (2001).

stark hydrolyseempfindlich ist. Alternativ wurden auch Ester auf Basis von Palmöl und Kokosnussöl erwähnt, die jedoch aus wirtschaftlichen Gründen eher im Ausland zum Einsatz kommen oder als hochwertige Additive Verwendung finden.

In bereits stattgefundenen sowie aktuellen Fachtagungen<sup>47</sup> wird das Thema Bioschmierstoffe und darunter auch der Einsatz biobasierter, wassermischbarer KSS ebenfalls diskutiert<sup>48</sup>. Dies unterstreicht eine Intensivierung bzw. Aktualität der Branche. Die Forschung zum erfolgreichen Einsatz biobasierter (wassermischbarer) KSS ist im Vergleich zum Einsatz mineralöhlaltiger (wassermischbarer) KSS noch relativ jung, so dass zukünftig Innovationen die technischen Eigenschaften von bspw. wassermischbaren KSS auf Rapsöl-Basis positiv weiterentwickeln.<sup>49</sup>

Vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz wird für die Studie Rapsmethylester als weiteres Grundöl herangezogen. Biobasierte, wassermischbare KSS sind am Markt verfügbar. Dennoch unterliegt ihre Zusammensetzung dem Firmengeheimnis. Rapsöl legt oftmals den Grundstock für Anwendungen im Bereich der biobasierten wassermischbaren KSS. Die für Rapsmethylester recherchierbaren Daten hinsichtlich der Ökobilanz werden daher stellvertretend für die biobasierten, wassermischbaren KSS als Grundöl gewählt.

### 3.3 Recherche von Ökobilanzen zum Vergleich verschiedener Grundölvarianten

In den letzten Jahren wurden diverse Ökobilanzen über Schmierstoffe erstellt, mit dem Ziel, unterschiedliche Grundölvarianten miteinander zu vergleichen. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden die untersuchten Grundöle, die Lebensphasen, die gewählte funktionelle Einheit sowie die analysierten Wirkungskategorien dieser Studien erhoben. Dies dient als Grundlage, um die zu treffenden Annahmen und Eingrenzungen für die vorliegende Studie mit der gängigen Praxis in der Literatur abzugleichen (Tabelle 6).

---

<sup>47</sup> Vgl. Hessen-Biotech (2016); Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016); Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a).

<sup>48</sup> Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a); S. 218 – 224.

<sup>49</sup> Vgl. Wascut Industrieöle GmbH (2001).



Tabelle 6: Ökobilanzen zum Einsatz von Schmierstoffen

| Untersuchte Grundöle  | Untersuchte Lebensphase  | Funktion. Einheit                            | Wirkungskategorie   | Quelle                                    |
|---|--|--|---|---|
| Mineralöl, Rapsöl und synth. Ester als Schmierstoff-Grundöl       | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase, Nutzungsphase (Verlustschmierung) | 1 m <sup>3</sup> Hydrauliköl                 | GWP, AP   | Vag, C.; Marby, A. et al. (2002)          |
| Mineralöl und Rapsöl als Hydrauliköl                              | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase, Nutzungsphase                     | 1 kg Grundöl bzw. Produktion der Maschine    | GHG, AP, ODP, EP, HM, Pestizide, feste Abfälle, Energiebedarf, Sommer-/Wintersmog | McMannus, M.; Hammond, G. et al. (2004)   |
| Mineralöl, Rapsöl, Palmöl, Tierfett und Altspeisefett als nwm KSS | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase, Nutzungsphase, End-of-Life        | 1000 bearbeitete Werkstücke                  | GWP, AP, NP, KEA, POCP, PM, RD, CRP   | Detmer, T. (2006)                         |
| Mineralöl und Sojaöl als Metallbearbeitungsöl                     | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase, Nutzungsphase, End-of-Life        | Fläche (m <sup>2</sup> ) gewalztes Aluminium | GWP, AP, EP, POCP, CRP, fossile Energie   | Miller S.; Landis, A. et al. (2007)       |
| Mineralöl, Rapsöl und Sojaöl als Schmierstoff-Grundöl             | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase                                    | 1 kg Schmierstoff                            | GWP, AP, CRP, EP, ODP, POCP, PM Ökotoxizität                                      | Cuevas, P. (2010)                         |
| Mineralöl und Rapsöl als Schmierstoff-Grundöl                     | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase, End-of-Life                       | 1 l Grundöl für Hydrauliköle                 | GWP, EP, AP, POCP, primäre Energie, biologische Abbaubarkeit                      | Ekman, A.; Börjesson, P. (2011)           |
| Mineralöl und Jatrophäöl als wmb KSS                              | Rohstoffvorkette, Herstellungsphase, Nutzungsphase, End-of-Life        | 500 kg zerspantes Material                   | ADP, GWP, Eco Indicator 99  | Winter, M.; Öhlschläger, G. et al. (2012) |

ADP = Abiotischer Ressourcenverbrauch; AP = Versauerungspotenzial; CRP = Carcinogenic Risk Potential; EP = Eutrophierungspotenzial; GHG = Treibhausgas; GWP = Treibhausgaspotenzial; HM = Schwermetalle; KEA = kumulierter Energieaufwand; NP = Nährstoffanreicherungs-potenzial; nwm = nichtwassermischbar; ODP = Ozonabbau; PM = Feinstaubbelastungspotenzial; POCP = Photosmog; RD = Ressourcenverbrauch; wmb = wassermischbar

Ein Vergleich der Ökobilanzen zeigt, dass alle Untersuchungen Mineralöl und fünf von sieben Untersuchungen Rapsöl als Grundölvarianten betrachten. Der Fokus auf Mineralöl und Rapsöl als relevante Grundölvarianten deckt sich mit den Ergebnissen des Auswahlprozesses der vorliegenden Studie.

Die betrachteten Grundöle wurden im Rahmen der Untersuchungen jedoch unterschiedlich als Hydrauliköle, Umformöle oder nichtwassermischbare sowie wassermischbare KSS eingesetzt. Es werden daher zwar unterschiedli-

che Arten von Schmierstoffen in den Untersuchungen analysiert, diese können aber dennoch herangezogen werden, um die Anwendungsweise der Ökobilanzmethode zu vergleichen.

In Bezug auf die Herstellung bzw. Formulierung der Schmierstoffe wurden Additive in sechs von sieben Untersuchungen nicht berücksichtigt bzw. vernachlässigt. Diese Eingrenzung wurde damit begründet, dass Additive nur einen kleinen Anteil des Schmierstoffs ausmachen<sup>50</sup>, es zu viele unterschiedliche gibt<sup>51</sup>, die Rezepturen von den Schmierstoff-Herstellern geheim gehalten werden<sup>52</sup> oder angenommen wird, dass die gleiche Art und Menge von Additiven in den Schmierstoffen eingesetzt werden<sup>53</sup>. Lediglich Winter et al. haben die Additivierung der Schmierstoffe in einer Untersuchung berücksichtigt, wobei in der Auswertung geschlussfolgert wurde, dass die jeweiligen Grundöle den Hauptunterschied der Ergebnisse der Ökobilanz ausmachen.<sup>54</sup> Für die vorliegende Studie wird daher auf die Betrachtung der Additivpakete verzichtet.

Alle Untersuchungen berücksichtigen die Lebensphasen, die Rohstoffvorkette und die Herstellungsphase. Die Nutzungsphase und die End-of-Life-Phase werden dagegen in einigen Untersuchungen vernachlässigt. Das Ziel der vorliegenden Studie liegt darin, die ökologischen Aufwendungen über den gesamten Lebensweg zu analysieren, so dass alle Lebenszyklusphasen in die Bewertung einbezogen werden.

Weiter zeigt der Vergleich der funktionellen Einheiten, dass in vier der sieben betrachteten Untersuchungen die Bereitstellung von 1 kg, 1 m<sup>3</sup> oder 1 l des jeweiligen Grundöls bzw. Schmierstoffs berücksichtigt wird. Dettmer (2006), Miller et al. (2007) und Winter et al. (2012) beziehen die funktionelle Einheit dagegen auf den Nutzen des Schmierstoffs und vergleichen die Grundölalternativen auf Basis einer bestimmten Anzahl von Produkten, die durch Einsatz des Schmierstoffs produziert werden. In der vorliegenden Studie soll die funktionelle Einheit ebenfalls auf einen Nutzen, beispielsweise

---

<sup>50</sup> Vgl. Cuevas, P. (2010), S. 39; Ekman, A. und Börjesson, P. (2011), S. 298.

<sup>51</sup> Vgl. Cuevas, P. (2010), S. 39.

<sup>52</sup> Vgl. Dettmer, T. (2006), S. 156.

<sup>53</sup> Vgl. Vag, C. et al. (2002), S. 44; Miller, S. et al. (2007), S. 4144.

<sup>54</sup> Vgl. Winter et al. (2012), S. 315.

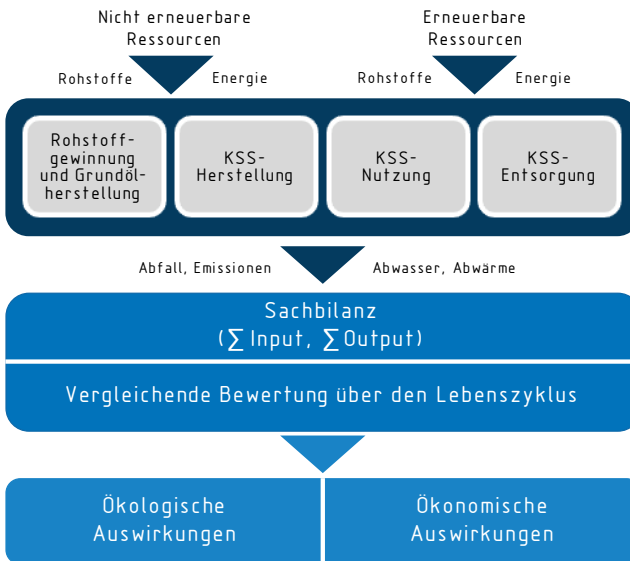
die Herstellung einer bestimmten Menge Güter, bezogen werden, um das Gesamtsystem inklusive aller Prozessspezifikationen (beispielsweise unterschiedlicher Standzeiten der KSS-Emulsionen), die jeweils durch den Einsatz der Grundöialternativen variieren, vollständig zu berücksichtigen.

In nahezu jeder Untersuchung wird das Treibhausgaspotenzial für die Wirkungskategorie Klimawandel untersucht, welches auch in der vorliegenden Studie ermittelt werden soll. Die Betrachtung anderer Wirkungskategorien unterscheidet sich z. T. stark zwischen den Untersuchungen. Die vorliegende Studie richtet sich nach den VDI-Richtlinien 4800 Blatt 1 und 2 sowie der VDI-Richtlinie 4600 und bilanziert u. a. den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) und den kumulierten Energieaufwand (KEA), der z. B. auch von Dettmer (2006) untersucht wurde.

## 4 METHODIK ZUR ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG

### 4.1 Räumliche Festlegung des Untersuchungsrahmens

Der Untersuchungsrahmen legt die Systemgrenzen fest, innerhalb derer die Grundölvarianten untersucht und evaluiert werden. Die ganzheitliche ökologische und ökonomische Bewertung erfordert die Betrachtung über den gesamten Lebensweg, d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“ (engl. cradle to grave, Abbildung 4).



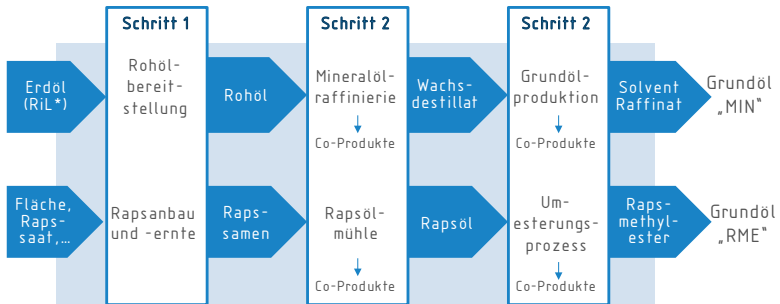
**Abbildung 4:** Untersuchungsrahmen zur ganzheitlichen ökologischen und ökonomischen Bewertung von Grundölalternativen für Kühlschmierstoffe<sup>55</sup>

Für jede der vier Lebensphasen werden die Daten aller benötigten inputseitigen (Rohstoffe, Energie etc.) und outputseitigen (Abfall, Emissionen etc.) Energie- und Stoffströme erfasst und über eine Sachbilanz gegenübergestellt. Basierend auf diesen Daten erfolgt eine vergleichende Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Grundölvarianten.

<sup>55</sup> In Anlehnung an Dettmer, T. (2006), S. 100.

#### 4.1.1 Rohstoffgewinnung und Grundölherstellung

Die Systemgrenzen der Rohstoffgewinnung und Grundölherstellung für das mineralölbasierte Grundöl Solvent-Raffinat als auch für das mineralölfreie Grundöl Rapsmethylester umfassen jeweils drei Hauptschritte: die Bereitstellung (Schritt 1), die Verarbeitung (Schritt 2) und die finale Produktion bzw. Umesterung (Schritt 3) (Abbildung 5).



\*RIL - Rohstoffe in Lagerstätte

**Abbildung 5: Materialflusschema für die Grundölherstellung**

Die zwei Varianten haben gemeinsam, dass es sich bei den einzelnen Prozessschritten i. d. R. um Kuppelprozesse handelt, bei denen neben dem Hauptprodukt gleichzeitig auch Co-Produkte erzeugt werden, die einen zusätzlichen Nutzen für das betrachtete System schaffen. Da eine Systemerweiterung hier nicht zielführend ist, müssen die Prozessaufwendungen (Input- und Output-Flüsse) zwischen dem Hauptprodukt und den Co-Produkten nach Verrechnungsvorschriften aufgeteilt werden. Die Ermittlung des Anteils, der den einzelnen Kuppelprodukten zugeordnet wird, erfolgt anhand von Allokationsfaktoren. Diese können auf physikalischen oder ökonomischen Parametern basieren und sollen den tatsächlichen Nutzen aller Kuppelprodukte widerspiegeln.<sup>56</sup>

Die Systemgrenzen für die Grundölherstellung des Solvent-Raffinats schließen die Destillation und Fraktionierung des Erdöls in der Mineralölraffinerie

<sup>56</sup> Vgl. VDI 4800, Blatt 1 (2016), S. 15.

sowie die weitere Extraktion des entstandenen Wachsdestillats und sich anschließende Hydrierprozesse mit ein, wobei in der vorliegenden Studie für die Kuppelprozesse massebezogene Allokationsfaktoren verwendet werden (Abbildung 12).<sup>57</sup>

Zur Herstellung des Grundöls aus Rapsöl werden alle Schritte zur Rohstoffgewinnung berücksichtigt: von der Grundbodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, den Pflanzenschutzmaßnahmen, der Ernte der Rapssamen bis hin zum Transport zur Ölmühle. Bei der anschließenden Grundölherstellung werden die Rapssamen in der Ölmühle zu Rapsöl und Rapsschrot weiterverarbeitet, woran sich die Umesterung des Rapsöls mit den entsprechenden Alkoholen zu Rapsölester und Glycerin anschließt.<sup>58</sup> Hierbei wird angenommen, dass Anbau, Ölgewinnung und Umesterung in Deutschland erfolgen. Da der entstehende Rapsschrot in der anfallenden Menge deutlich über der erzeugten Ölmenge liegt, jedoch in seiner Verwendung (z. B. Rinderfutter) einen geringeren ökonomischen Wert besitzt, werden die Haupt- und Co-Produkte der Herstellung des Grundöls über ökonomische Parameter allokiert (Abbildung 13). Die verwendeten Allokationsfaktoren basieren auf statistischen Marktpreisen aus dem Jahr 2004, wie in der aktuellen Inventardatenbank Ecoinvent 3.2 angegeben.<sup>59</sup>

#### 4.1.2 KSS-Herstellung

Die Herstellung eines wassermischbaren KSS-Konzentrats erfolgt durch die Formulierung des Grundöls und von Additiven, wodurch die Gebrauchseigenschaften des KSS bestimmt werden. Diese Produktion findet in den meisten Fällen chargenweise im Rahmen eines verfahrenstechnischen Herstellprozesses unter der Einhaltung bestimmter Temperaturen sowie Rührprozesse statt.<sup>60</sup>

Im Rahmen dieser Lebensphase wird angenommen, dass die Produktionsschritte zur Herstellung des KSS-Konzentrats für die betrachteten Grundöle

---

<sup>57</sup> Vgl. Kolshorn, K.-U. und Fehrenbach, H. (2000), S. A-47ff.; Fehrenbach, H. (2005), S. 24, 26.

<sup>58</sup> Vgl. Ecoinvent 3.2 (2015).

<sup>59</sup> Vgl. Ecoinvent 3.2 (2015).

<sup>60</sup> Vgl. Hansen, A., Hallmann, C. und Schmehl, M. (2005), S. 19.

Solvent-Raffinat und Rapsmethyl ester gleich sind. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass gleiche Additivpakete mit gleichen Herstellungsprozessen für beide Grundölvarianten verwendet werden, wodurch auf Basis gleicher Input- und Outputströme die Lebensphase der KSS-Herstellung in der Sachbilanz vernachlässigbar wird bzw. nicht weiter zu betrachten ist. Diese Annahme wurde auch von anderen Studien zur vergleichenden Ökobilanzierung von Schmierstoffen getroffen (Kapitel 3.3).

### 4.1.3 KSS-Nutzung

Die Phase der KSS-Nutzung betrachtet die Verwendung des KSS während des Werkstoffbearbeitungsprozesses und die daraus resultierenden Auswirkungen. Der Bewertung unterliegt die Annahme, dass beide Grundöle für einen gleichen Bearbeitungsprozess auf gleiche Art und Weise eingesetzt werden und die gleiche technologische Wirkung erzeugen.

Der Untersuchungsrahmen für den Bearbeitungsprozess wird entsprechend Abbildung 6 festgelegt und besteht aus drei wesentlichen Prozesskomponenten: Werkzeugmaschine, KSS-Absaugung sowie KSS-Filtration und -Zuführung, die hier auch eine Spanentölung umfasst. In der Praxis kann sich ggf. ein Waschprozess anschließen, der jedoch nicht zwingend erforderlich ist und in dieser Studie nicht betrachtet wird.

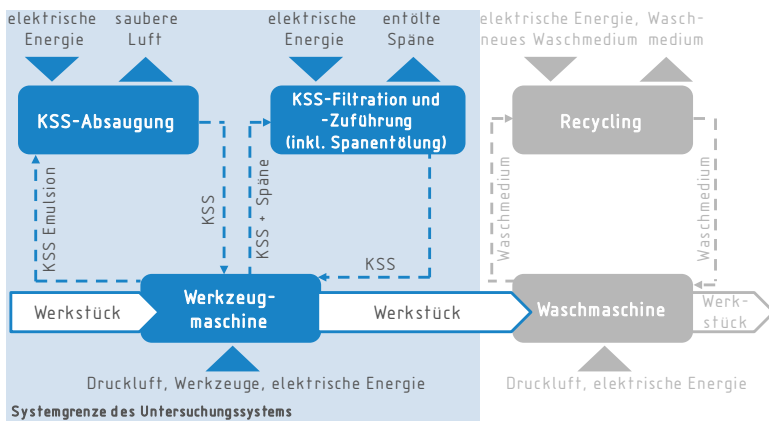


Abbildung 6: Systemgrenze des betrachteten Bearbeitungsprozesses <sup>61</sup>

<sup>61</sup> In Anlehnung an Madanchi, N. et al. (2015), S. 363.

Innerhalb des Bearbeitungsprozesses wird der KSS zwar im Kreislauf geführt, kann aber u. a. über Span- und Werkstückanhaftungen, Leckagen oder Verdunstungen aus dem Kreislaufsystem ausgeschleppt werden. Diese Ausschleppungen lassen sich über technische Maßnahmen wie Spanentölung (1), Werkstückreinigung (2), Absaugung (3), Filtration und Zuführung (4) sowie KSS-Pflege und Standzeitmanagement (5) gezielt reduzieren. Sie werden wie folgt für die vorliegende Studie berücksichtigt:

#### (1) Spanentölung

Eine Spanentölung kann z. B. über Abpressen, Zentrifugieren oder Brikettieren der Späne erfolgen. Der Restölgehalt an den Spänen beträgt nach dem Abpressen weniger als 1 %<sup>62</sup>, nach dem Zentrifugieren oder Brikettieren beläuft er sich auf ca. 1 %<sup>63</sup>. Abhängig von dem Entölungsverfahren können die zurückgewonnenen KSS-Mengen wieder dem Kreislaufsystem (KSS-Zuführung) zugeführt werden.<sup>64</sup>

Zur Abbildung eines ressourceneffizienten Systems wird daher angenommen, dass die Späne vor der Entsorgung entölt werden. Innerhalb des Anwendungsfalls wird ein Restölgehalt von 1 % an den Spänen angenommen, während die restlichen KSS-Mengen wieder dem Untersuchungssystem zugeführt werden.

#### (2) Werkstückreinigung durch Druckluft

Eine weitere Art der Ausschleppung ist die Anhaftung des KSS an den Werkstücken. Im Hinblick auf einen ressourceneffizienten Einsatz werden die mit KSS benetzten Werkstücke häufig mit Druckluft abgeblasen. Diese Reinigung erfolgt aber auch, da in Folgeprozessen innerhalb der Prozesskette i. d. R. saubere bzw. kühl-schmierstofffreie Werkstücke benötigt werden. Aus Sicherheitsgründen wird dabei empfohlen, das mit KSS benetzte Werkstück in einer eingehausten Maschine mit Druckluft abzublasen, damit keine

---

<sup>62</sup> Vgl. Liedtke, S. (1999), S. 124 f.

<sup>63</sup> Vgl. Mayfran (2015), S. 2.

<sup>64</sup> Vgl. Liedtke, S. (1999), S. 124 f.



Emissionen von den Werkern eingeatmet werden.<sup>65</sup> Im Folgenden wird angenommen, dass der KSS damit im System verbleibt und keinen Einfluss auf die Sachbilanz innerhalb des betrachteten Bearbeitungsprozesses nimmt.

### (3) KSS-Absaugung

Bei der KSS-Absaugung wird von einer dezentralen Einzelplatzabsaugung mit konstantem Absaugvolumenstrom ausgegangen, da diese im Vergleich zu zentralen Anlagen aufgrund geringerer Investitionen und flexibleren Einsatzes häufig in KMUs Verwendung finden. Der Bedarf an elektrischer Energie für die Anlage ist basierend auf dem konstanten Absaugvolumenstrom gleichbleibend, wobei davon ausgegangen wird, dass die KSS ohne Verluste in den Fräsprozess zurückgeführt werden. Die Einzelplatzabsaugung übt damit keinen bilanziellen Einfluss auf den KSS-Stoffstrom aus.

### (4) KSS-Filtration und -Zuführung

Ziel der KSS-Filtration und -Zuführung ist die Kreislaufführung des KSS über die Werkzeugmaschine. Im vorliegenden Anwendungsfall wird eine dezentrale Einzelversorgung mit unregelmäßigem Förderpumpen angenommen (Fräsbearbeitungszentrum mit zugeschalteter KSS-Aufbereitungsanlage). Diese Anordnung ist sinnvoll, wenn eine geringe Anzahl an Werkzeugmaschinen installiert ist, und wird häufig in kleineren Betrieben genutzt.<sup>66</sup> Weiter wird angenommen, dass die untersuchten KSS-Varianten durch den hohen Wasseranteil ähnliche physikalische Eigenschaften aufweisen (z. B. Viskosität bei 20 °C ca. 1 mm<sup>2</sup>/s, Dichte bei 20 °C ca. 1 g/cm<sup>3</sup>) und damit die gleiche Pumpenleistung zur Förderung aufzuwenden ist. Zusätzlich wird ein geschlossener Tank angenommen, so dass KSS-Verdunstungen an der Kapselung kondensieren. Die KSS-Filtration und -Zuführung hat somit keinen bilanziellen Einfluss auf die Bewertung.

---

<sup>65</sup> Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (2011), S. 38.

<sup>66</sup> Vgl. Dopatka, J., Obst, M. und Siegfried, F. (1993), S. 18.

## (5) Pflegemaßnahmen zum Standzeitmanagement

KSS sind im Betrieb zwangsläufig einem stetigen Alterungsprozess unterworfen. Durch viele Faktoren, z. B. Temperatur, Druck, Eintrag von Luftsauerstoff und Verunreinigungen, werden Alterungsreaktionen wie Polymerisation, Oxidation, Hydrolyse oder auch Cracken ausgelöst, die die Leistungsfähigkeit der KSS herabsetzen.

Pflegemaßnahmen beeinflussen die Länge der Nutzungsphase von KSS maßgeblich. So kann in Abhängigkeit von Pflegemaßnahmen die Standzeit einer Emulsion in einer Einzelmaschine von vier auf 20 Wochen erhöht werden (Abbildung 7).<sup>67</sup>

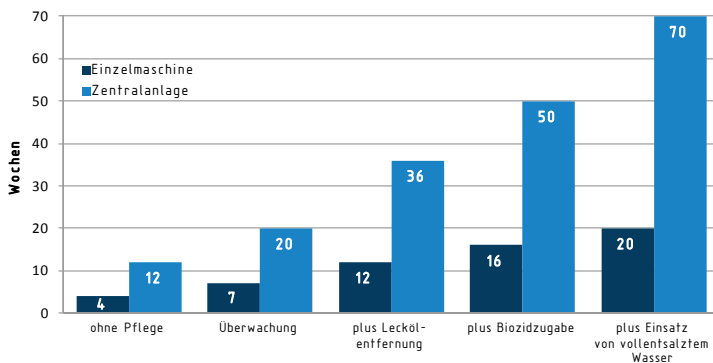


Abbildung 7: Standzeit der Emulsion in Einzelmaschine und Zentralanlage<sup>68</sup>

Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist es sinnvoll, eine hohe Standzeit des KSS zu erreichen. Es wird daher angenommen, dass die KSS-Emulsion im betrachteten Bearbeitungsprozess gepflegt wird und eine Standzeit von 20 Wochen erreicht. Das entspricht 2,6 Wechseln der KSS-Emulsion im Jahr und begründet sich durch den Befall von Mikroorganismen, der die Standzeit

<sup>67</sup> Vgl. Kiechle, A. (1996), S. 8.

<sup>68</sup> Vgl. Kiechle, A. (1996), S. 8.

beeinflusst und weitestgehend unabhängig von der tatsächlichen Maschinenauslastung ist. Die Standzeit von 20 Wochen wird für beide Grundöle, Solvent-Raffinat und Rapsmethylester angesetzt.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass die KSS-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis zu Hydrolyseempfindlichkeit, mikrobieller Anfälligkeit und Verharzung neigt, was sich mitunter negativ auf die Standzeiten auswirkt.<sup>69</sup> McManus et al. vergleichen den Einsatz rapsöl- und mineralölbasierter Hydrauliköle und weisen auf die höhere Empfindlichkeit der Rapsölvariante hinsichtlich Druck und Temperatur sowie dessen korrosive Eigenschaften gegenüber den Hydraulikkomponenten hin. Bezüglich der Standzeit zeigte sich, dass einerseits gleiche Standzeiten, andererseits 1,5-, 2- und 3-fach häufigere Badwechsel resultierten.<sup>70</sup> McManus et al. gehen daher im Mittel von einer doppelten Standzeit für mineralölbasierte KSS gegenüber rapsölbasierten KSS aus.

Basierend auf dieser Diskussion wird in der vorliegenden Studie von einer gleichen Standzeit (20 Wochen) der mineralöl- und rapsölbasierten KSS-Emulsion sowie von verkürzten Standzeiten für die KSS-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis ausgegangen. Die verkürzten Standzeiten werden auf zwölf und acht Wochen festgelegt.

#### 4.1.4 KSS-Entsorgung

Bei der Entsorgung sind einerseits die Mengen der KSS-Alt-emulsion zu betrachten, die nach der Standzeit, d. h. mit jedem Badwechsel, anfallen, und andererseits die Spananhaftungen, die eine Restfeuchte von 1 % aufweisen (Kapitel 4.1.3). Für die KSS-Alt-emulsion wird angenommen, dass eine externe Spaltanlage zur Aufbereitung eingesetzt wird, die vorwiegend Vakuumverdampfung oder Ultrafiltration nutzt<sup>71</sup> und den KSS in eine ölhaltige Phase und in eine Wasserphase trennt. Eine innerbetriebliche Emulsionspaltung ist i. d. R. erst ab einem Abfallaufkommen von mehr als 100 Kubik-

---

<sup>69</sup> Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012), S. 8 – 10.

<sup>70</sup> Vgl. McManus, M., Hammond, G. und Burrows, C. (2004), S. 170 – 172.

<sup>71</sup> Vgl. VDI 3397 Blatt 3 (2008).

metern pro Jahr wirtschaftlich interessant. Es wird jedoch empfohlen, zu prüfen, ob noch weitere wässrige Prozessabfälle für eine betriebsinterne Aufbereitung anfallen bzw. aufzubereiten sind.

Die wässrige Phase wird nach der Emulsionsspaltung durch eine Abwasserbehandlung aufbereitet, während die Altölphase thermisch verwertet wird (Abbildung 8).

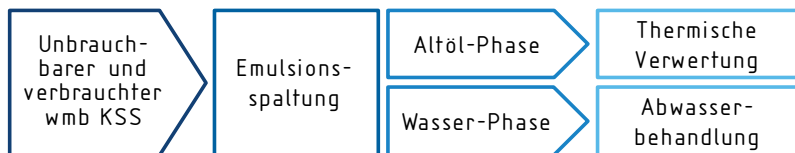


Abbildung 8: Entsorgungswege von Kühlschmierstoffen<sup>72</sup>

Für die Spananhaftungen wird eine Späneinschmelzung angenommen, bei der der KSS verbrannt wird. Da die Menge der Ausschleppungen durch Spananhaftungen für alle betrachteten KSS-Varianten gleich ist, werden diese bilanziell nicht berücksichtigt.

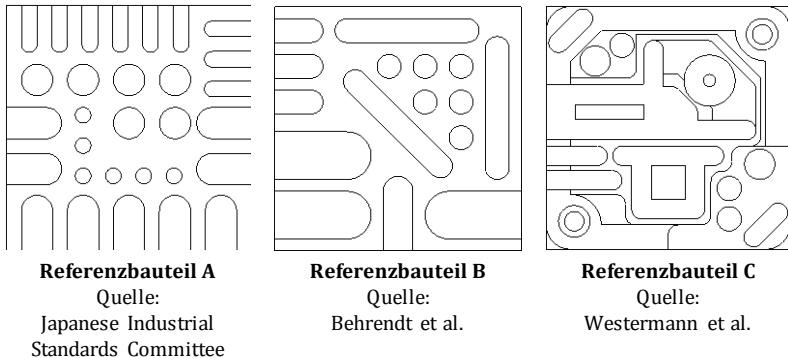
## 4.2 Festlegung des Referenzbauteils

Im Kapitel 3 wurde herausgearbeitet, dass der überwiegende Anteil der spannenden Fertigungsverfahren zu ca. 63 % mit geometrisch bestimmter Schneide durchgeführt wird, wobei der Einsatz von Fräsoperationen am häufigsten erfolgt. Weiterhin werden bei diesen Bearbeitungsprozessen überwiegend KSS-Emulsionen zur Bearbeitung des Werkstoffs Stahl empfohlen. Auf Basis dieser Parameter soll ein Referenzbauteil ausgewählt werden, welches durch einen Fräsprozess hergestellt wird und die damit verbundenen Bearbeitungsoperationen mit den häufigsten konstruktiven Gestaltungselementen, wie Nuten oder Bohrungen unterschiedlicher Dimension, widerspiegelt.

Durch eine Literaturrecherche konnten drei Referenzbauteile ermittelt werden, die den Ansprüchen einer solchen Fräsbearbeitung entsprechen. Alle

<sup>72</sup> Vgl. VDI 3397 Blatt 3 (2008).

drei Referenzbauteile sind ursprünglich konzipiert worden, um die Energieeffizienz verschiedener Werkzeugmaschinen während der Herstellung eines Bauteils bewerten und miteinander vergleichen zu können. Abbildung 9 stellt die drei Referenzbauteile (gekennzeichnet mit A, B und C) dar.



**Abbildung 9: Gegenüberstellung möglicher Referenzbauteile<sup>73</sup>**

Das Referenzbauteil A der Japan Machine Tool Builders' Association (JMTBA) umfasst zwei unterschiedliche konstruktive Elemente (Bohrungen und offene Nuten/Taschen), die in unterschiedlichen Ausführungen (Radien, Tiefen und Längen) gefertigt werden. In Anlehnung an die JMTBA entwarfen Behrendt et al. ein Referenzbauteil B, welches ähnlich gestaltet ist, jedoch zusätzlich über geschlossene Längsnuten verfügt. Das Referenzbauteil C von Westermann et al. besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher konstruktiver Elemente, die unter anderem Bohrungen, offene und geschlossene Taschen und Konturen umfassen. Dieses Referenzbauteil wurde auf Basis von mehr als tausend realen Bauteilen errechnet.<sup>74</sup>

Der Vergleich der Referenzbauteile zeigt, dass die Version von Westermann et al. die höchste Komplexität an verwendeten konstruktiven Elementen besitzt. Um den wechselnden Anforderungen der industriellen Fertigung gerecht zu werden, wird im Weiteren das Referenzbauteil von Westermann

<sup>73</sup> Japanese Industrial Standards Committee (2010), S. 1 ff.; Behrendt, T., Zein, A. und Min, S. (2012), S. 44; in Anlehnung an Westermann, H.-H., Kafara, M. und Steinhilper, R. (2015), S. 525.

<sup>74</sup> Vgl. Westermann, H.-H., Kafara, M. und Steinhilper, R. (2015), S. 524.

et al. verwendet. Es ist in Abbildung 10 dargestellt und wird aus einem Stahlrohrling mit einer Länge und Breite von 200 mm und einer Höhe von 30 mm gefräst. Pro 15 Minuten wird ein Bauteil hergestellt bzw. eine Spanmenge von 5,05 kg abgetragen, so dass das Endgewicht des Bauteils 4,37 kg beträgt.

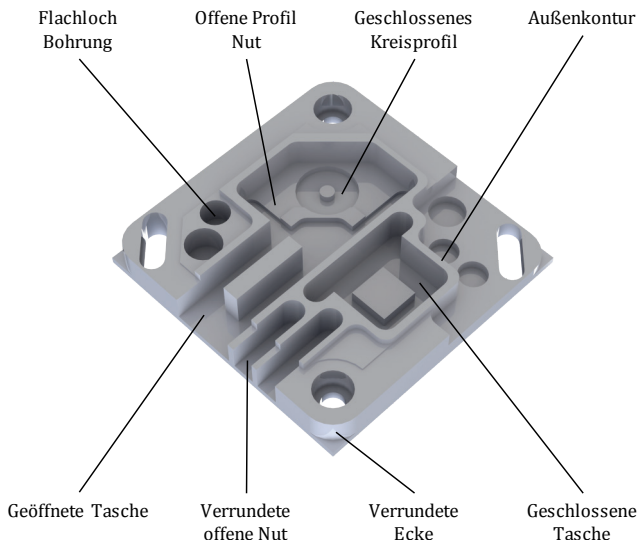


Abbildung 10: Ausgewähltes Referenzbauteil von Westermann et al.<sup>75</sup>

In Anlehnung an die Untersuchung von Westermann et al. wird der Stahlwerkstoff mit der Bezeichnung C60E bzw. 1.1221 in Betracht gezogen, welcher gut spanend bearbeitbar ist. Dieser Werkstoff wurde auf Basis der Zugfestigkeit (ca. 750 bis 1.000 N/cm<sup>2</sup>) ausgewählt. Grundlagen hierfür waren die Analyse der Zugfestigkeit der zuvor genannten tausend realen Werkstücke und die Bildung des Mittelwerts aller Zugfestigkeiten. Diese Analyse ergab, dass insbesondere der Werkstoff C60E einen repräsentativen Schnitt aller Werte darstellt.<sup>76</sup>

<sup>75</sup> Vgl. in Anlehnung an Westermann, H.-H., Kafara, M. und Steinhilper, R. (2015), S. 525.

<sup>76</sup> Vgl. Westermann, H.-H.; Kafara, M. und Steinhilper, R. (2015), S. 524.

### 4.3 Festlegung der funktionellen Einheit

Der Begriff funktionelle Einheit ist gemäß der DIN EN ISO 14044 definiert als der quantifizierte Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.<sup>77</sup> Unter der Bestimmung weiterer Randbedingungen für den Fräsprozess (u. a. 240 Arbeitstage, 2-Schichtsystem à acht Stunden etc., Tabelle 7) errechnet sich für das vorliegende Betrachtungssystem eine funktionelle Einheit, also ein quantifizierter Nutzen von 13.000 gefertigten Referenzbauteilen pro Jahr bzw. eine erzeugte Spanmenge von jährlich ca. 65.650 kg (Tabelle 7).

**Tabelle 7: Ableitung der funktionellen Einheit**

| Beschreibung                | Einheit           | Zahlenwert    |                                |
|-----------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|
| Schichten am Tag            | -                 | 2,00          | festgelegte<br>Randbedingungen |
| Schichtdauer                | h                 | 8,00          |                                |
| Arbeitstage pro Jahr        | Tage              | 240           |                                |
| Gesamtbetriebsstundenzahl   | h/Jahr            | 3.840         |                                |
| Auslastung                  | %                 | 85,00         |                                |
| Produktive Maschinenzeit    | h/Jahr            | 3.264         |                                |
| Produktionszeit pro Bauteil | h/Stück           | 0,25          |                                |
| Spanmenge pro Bauteil       | kg/Stück          | 5,05          |                                |
| <b>Produzierte Bauteile</b> | <b>Stück/Jahr</b> | <b>13.000</b> | funktionelle Einheit           |
| <b>Spanmenge pro Jahr</b>   | <b>kg/Jahr</b>    | <b>65.650</b> |                                |

Die Produktionsmenge von 13.000 Stück ergibt sich unter der Annahme, dass an 240 Arbeitstagen mit je zwei Schichten à acht Stunden die Referenzbauteile in einer Bearbeitungszeit von 15 Minuten pro Bauteil und mit einer Maschinenverfügbarkeit von 85 % gefertigt werden.

Die Erstellung der funktionellen Einheit erfolgt in der Nutzungsphase und gliedert sich wie folgt in das gesamte Materialflussschema des Anwendungsfalls ein (Abbildung 11). Das Materialflussschema ist dabei identisch für beide KSS-Grundöialternativen Solvent-Raffinat und Rapsmethylester.

<sup>77</sup> Vgl. DIN EN ISO 14044:2006 (2006), S. 11.

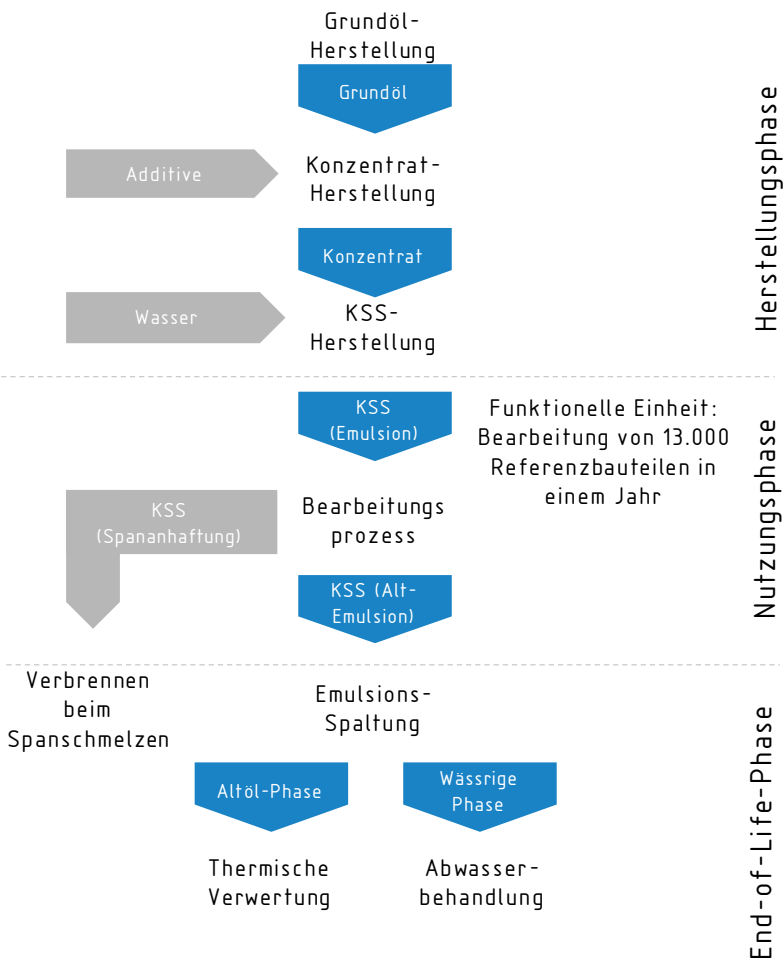


Abbildung 11: Materialflussschema für den gesamten KSS-Lebenszyklus



#### 4.4 Ökologische Bewertung: Quantifizierung von Randparametern und In- und Output-Strömen

Für die Durchführung der Fräsoperation ist innerhalb des Betrachtungszeitraums von einem Jahr eine spezifische Menge an KSS-Emulsion erforderlich, um die festgelegte funktionelle Einheit von 13.000 Bauteilen zu produzieren. Dabei wird die gleiche Zusammensetzung beider KSS-Emulsionen angenommen (Kapitel 4.1.3). Sie ist auf Basis von Literatur-<sup>78</sup> und Praxisdaten<sup>79</sup> wie folgt festgelegt:

$$100 \% \text{ KSS}_{\text{Emulsion}} = 5 \% \text{ KSS}_{\text{Konzentrat}} + 95 \% \text{ Wasser}$$

$$100 \% \text{ KSS}_{\text{Konzentrat}} = 37 \% \text{ Grundöl} + 63 \% \text{ Additive}$$

Die resultierenden Mengen an benötigtem KSS-Konzentrat und Grundöl für die Herstellung der funktionellen Einheit (13.000 Bauteile) errechnen sich mit Hilfe der KSS-Zusammensetzung und der erforderlichen Mengen der KSS-Emulsion. Diese werden über das Füllvolumen der Einzelversorgungsanlage sowie die Standzeit und Verlustmenge der Emulsion in diesem Zeitraum berechnet (Tabelle 8). Ein typisches Füllvolumen einer Einzelanlage für den beschriebenen Fräsprozess beträgt 450 Liter. Die Standzeit wird, wie in Kapitel 4.1.3 hergeleitet, für die KSS-Emulsionen mit Solvent-Raffinat sowie Rapsmethylester auf 20 Wochen festgesetzt. Zusätzlich werden verringerte Standzeiten von zwölf und acht Wochen für die KSS-Emulsionen auf Rapsmethylester-Basis betrachtet. Die KSS-Verluste sind, wie in Kapitel 4.1.3 erläutert, beschränkt auf die Ausschleppmengen durch restliche KSS-Anhaftungen am Span (Restfeuchte 1 %) und bleiben für die unterschiedlichen Standzeiten konstant.

<sup>78</sup> Vgl. Baumann, W. und Herberg-Liedtke, B. (1996), S. 48; Mang, T. und Dresel, W. (2007), S. 412.

<sup>79</sup> Vgl. FUCHS Schmierstoffe GmbH (2013); Carl Bechem GmbH (2015).

Tabelle 8: In- und Output-Mengen für die Nutzungsphase

| Standzeit  | Input-Menge:<br>KSS-Emulsion<br>(2,6*450 l bei 20 Wo) |              | Output-Menge:<br>KSS-Alt-emulsion                  |              | Menge:<br>Konzentrat<br>(5 % von Input) | Menge:<br>Grundöl<br>(37 % von Konzentrat) |
|--|---|--------------|--|--------------|---|--|
|  |   | kg/a         |  | kg/a         | kg/a                                    | kg/a                                       |
| 20 Wochen für<br>RME und MIN<br>(2,6 Badwechsel) | Menge<br>Neubefüllungen                               | 1.170        | KSS-Entsorgung<br>(Alt-emulsion<br>nach Standzeit) | 1.170        | 58,5                                    | 21,6                                       |
|  | Nachsetzmenge<br>für Spananhaftung                    | 663          | KSS-Verlust<br>über<br>Spananhaftung               | 663          | 33,2                                    | 12,3                                       |
|  | <b>Gesamt</b>   | <b>1.833</b> | <b>Gesamt</b>                                      | <b>1.833</b> | <b>91,7</b>                             | <b>33,9</b>                                |
| 12 Wochen<br>für RME<br>(4,3 Badwechsel)         | Menge<br>Neubefüllungen                               | 1.950        | KSS-Entsorgung<br>(Alt-emulsion<br>nach Standzeit) | 1.950        | 97,5                                    | 36,1                                       |
|  | Nachsetzmenge<br>für Spananhaftung                    | 663          | KSS-Verlust<br>über<br>Spananhaftung               | 663          | 33,2                                    | 12,3                                       |
|  | <b>Gesamt</b>   | <b>2.613</b> | <b>Gesamt</b>                                      | <b>2.613</b> | <b>130,7</b>                            | <b>48,3</b>                                |
| 8 Wochen<br>für RME<br>(6,5 Badwechsel)          | Menge<br>Neubefüllungen                               | 2.925        | KSS-Entsorgung<br>(Alt-emulsion<br>nach Standzeit) | 2.925        | 146,3                                   | 54,1                                       |
|  | Nachsetzmenge<br>für Spananhaftung                    | 663          | KSS-Verlust<br>über<br>Spananhaftung               | 663          | 33,2                                    | 12,3                                       |
|  | <b>Gesamt</b>   | <b>3.588</b> | <b>Gesamt</b>                                      | <b>3.588</b> | <b>179,4</b>                            | <b>66,4</b>                                |

RME = Rapsmethylester; MIN = Solvent-Raffinat

Die dargestellten Grundölmengen werden nur für die Herstellung der KSS-Emulsion eingesetzt (letzte Spalte, siehe Tabelle 8). Während des Grundölerstellungsprozesses entstehen jedoch Kuppelprodukte, die einen zusätzlichen Nutzen während der Grundölproduktion schaffen. Über Allokationsfaktoren, wie in Kapitel 4.1.1 erläutert, werden daher die Haupt- und Co-Produkte gewichtet, um die tatsächlichen auf die Grundölerstellung zurückzuführenden ökologischen Auswirkungen zu bestimmen. Die angewandten Allokationsfaktoren (in %) für die Grundölerstellungsschritte eins bis drei mit den dazugehörigen Mengen (in kg) sind im Folgenden dargestellt (Solvent-Raffinat: Abbildung 12, Rapsmethylester: Abbildung 13). Die Datenbasis der jeweiligen Prozessketten für das Solvent-Raffinat<sup>80</sup> und den Rapsmethylester<sup>81</sup> ist der Literatur entnommen.

<sup>80</sup> Vgl. Fehrenbach, H. (2005), S. 27 – 30; Kolshorn, K.-U. und Fehrenbach, H. (2000), S. A-47 ff.<sup>81</sup> Vgl. Ecoinvent 3.2 (2015).

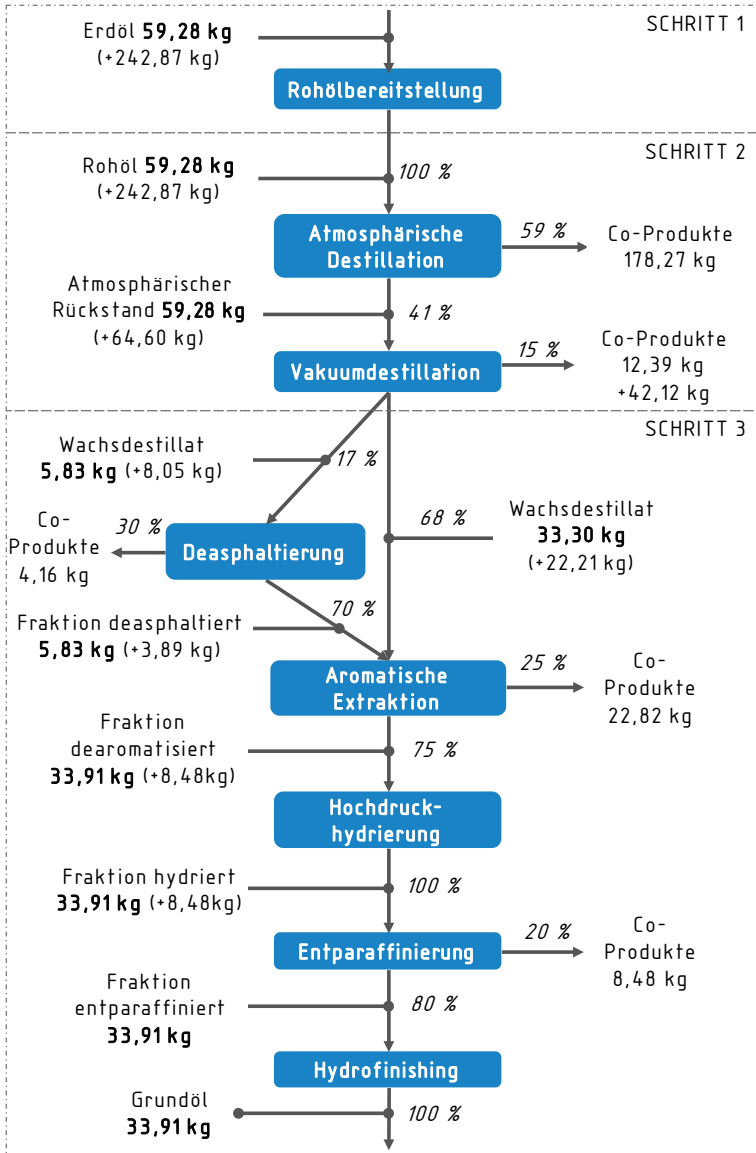


Abbildung 12: Prozesskette Herstellung Grundöl Solvent-Raffinat<sup>82</sup>

<sup>82</sup> Mengen in kg, Allokationsfaktor auf Basis Masse in %, Fettdruck: dem Grundöl zugerechnete Mengen, Normaldruck: den Co-Produkten zugerechnete Mengen

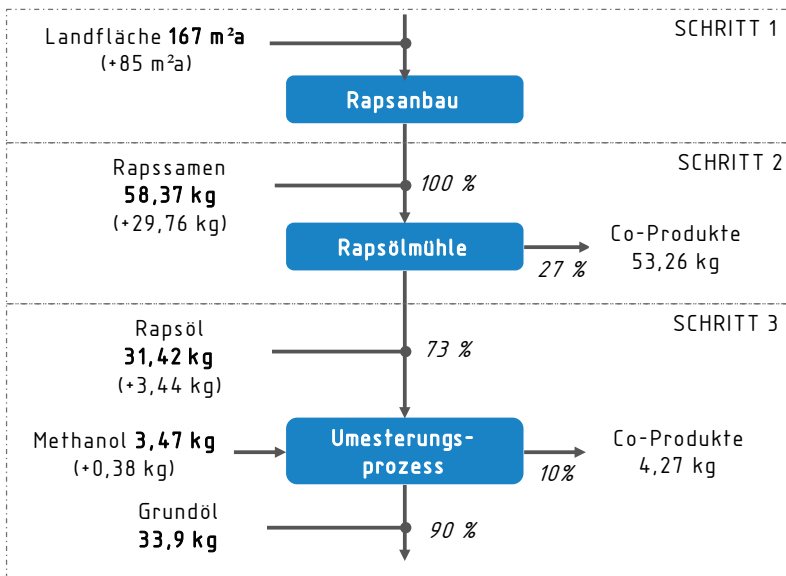


Abbildung 13: Prozesskette Herstellung Grundöl Rapsmethylester<sup>83</sup>

Mithilfe der Ökobilanzierungssoftware Umberto NXT wurden die ermittelten Daten und Mengengerüste in ein Stoffflussmodell überführt und die Sachbilanz berechnet, die als Grundlage für die Bewertung erforderlich ist. Für die Hintergrundprozesse (Energiebereitstellung etc.) wurden Datensätze aus Ecoinvent 3.2 verwendet.

Die vergleichende ökologische Bewertung der Grundölalternativen bezieht sich schwerpunktmäßig auf die „inputseitigen“ Aufwendungen, die durch den Energie- und Ressourcenaufwand bestimmt werden. Die Ressource Wasser und die Ressource Landfläche werden gesondert betrachtet. Ergänzt wird die ökologische Bewertung durch die Betrachtung der „outputseitigen“ Emissionen von Treibhausgasen und deren Beitrag zum Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP), das in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausgedrückt wird. Darüber hinaus wird das Versorgungsrisiko für die Hauptrohstoffe Erdöl und Raps durch eine Kritikalitätsbewertung abgeschätzt.

<sup>83</sup> Mengen in kg, Allokationsfaktor auf Basis Preis in %, Fettdruck: dem Grundöl zugerechnete Mengen, Normaldruck: den Co-Produkten zugerechnete Mengen

## 4.5 Ökonomische Bewertung: Auswahl und Quantifizierung der Kostenpositionen

### 4.5.1 Auswahl der Kostenpositionen

Der Fokus der ökonomischen Bewertung liegt auf den Kosten des KSS-Anwenders, d. h. einem kleinen oder mittleren Unternehmen des metallverarbeitenden Gewerbes. Dadurch wird eine detaillierte Kostenbetrachtung der Herstellungs- als auch Entsorgungsphase obsolet. Die Schnittstellen zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase sowie Nutzungs- und Entsorgungsphase stellen die Beschaffungspreise (Einkaufspreise) des KSS-Konzentrats sowie die Gate Fees<sup>84</sup> beim zuständigen Entsorger dar. Diese Kostenpositionen beinhalten bereits die detaillierten Herstellungskosten für das KSS-Konzentrat sowie die detaillierten Kosten für die Entsorgung der Altemulsion. Da die ökonomische Bewertung aus Sicht eines KSS-Anwenders durchgeführt wird, werden die in der Herstellungsphase entstehenden Kosten nur am Rande, d. h. zum Abgleich der Marktpreise, betrachtet und die während der Entsorgungsphase resultierenden Kosten nicht herangezogen.

Folgende Kostenpositionen werden für die ökonomische Bewertung während der Nutzungsphase bilanziert:

- Beschaffungskosten des KSS-Konzentrats
- Wasserkosten für die Mischung des KSS-Konzentrats mit Wasser
- Gate Fees (Entsorgungskosten) für die KSS-Altemulsion beim zuständigen Entsorger

Die Kosten, die während der Nutzungsphase durch den Fräsvorgang mit KSS-Kreislaufführung entstehen, werden dagegen nicht in Betracht gezogen, da hier, basierend auf der als gleich festgelegten technologischen Wirkung der Grundöialternativen, keine Unterschiede resultieren.

---

<sup>84</sup> Gate Fee = Annahmepreis für Abfälle von Entsorgern

#### 4.5.2 Quantifizierung ausgewählter Kostenpositionen

Die Kosten werden mit realitätsnahen Durchschnittswerten bilanziert. Für die Kostenschätzungen wurden vorrangig öffentlich zugängliche Daten verwendet sowie eigene Abschätzungen erhoben. Ergänzend wurden ausgewählte Hersteller und Formulierer kontaktiert, mit dem Ziel, getroffene Annahmen zu beurteilen und zu verifizieren.

##### (1) Beschaffungskosten für wassermischbare KSS-Konzentrate

Die Beschaffungskosten für wassermischbare KSS-Konzentrate setzen sich zusammen aus den Kosten für die Grundölherstellung, dem Gewinnzuschlag des Grundölherstellers, den Kosten für die Formulierung (Additivzusatz) des KSS-Konzentrats und dem Gewinnzuschlag des Formulierers.

Aus der Perspektive des KSS-Anwenders ist für die ökonomische Bewertung nur der Markt- bzw. Beschaffungspreis der KSS-Konzentrate relevant, so dass die Herstellkosten im Detail nicht weiter betrachtet werden. Die Beschaffungspreise hängen dabei stark von benötigten Mengen, den Zulieferern des KSS-Anwenders und den Verträgen und damit verbundenen Nachlässen ab. Die folgend präsentierten Marktpreise können somit nur eine Momentaufnahme unabhängig von Lieferantenbeziehungen (Mengenrabatten) oder auch spezifischen Produktpreisen abbilden.

Die Marktpreise für wassermischbare KSS-Konzentrate sind Schwankungen unterworfen. Im Jahr 2012 wurde eine Expertenbefragung<sup>85</sup> durchgeführt, die einen durchschnittlichen Preis von 3,64 €/kg für 2010 als Basisjahr und eine jährliche Preissteigerungsrate von 2 % für KSS-Konzentrate auf Solvent-Raffinat-Basis ermittelte. Hieraus errechnet sich für das Jahr 2016 ein durchschnittlicher Preis von 4,10 €/kg. Im Abgleich mit durchschnittlichen Preisen auf einschlägigen Internetbörsen, die für KSS-Konzentrate auf Solvent-Raffinat-Basis zwischen 3,40 €/kg und 4,60 €/kg<sup>86</sup> liegen, kann die Annahme von 4,10 €/kg als plausibel verifiziert werden.

---

<sup>85</sup> Interne Expertenbefragung zur Preisabfrage von wassermischbaren KSS, durchgeführt von BIPRO im Jahr 2012

<sup>86</sup> Die Preise pro KSS-Konzentrat werden mit drei bis vier Euro je Liter angegeben. Bei einer Dichte von 0,874 g/cm<sup>3</sup> (vgl. Sicherheitsdatenblatt BP Europa, SE bei 15 °C: BP (2012), S. 5.) errechnen sich Kilogrammpreise von 3,40 Euro bis 4,70 Euro.

Der Anteil des Grundölpreises an den Marktpreisen des KSS-Konzentrats konnte nur von einem Hersteller in Erfahrung gebracht werden. Dieser bezieht sein Grundöl zu einem Durchschnittspreis von 0,95 €/kg.<sup>87</sup> Diese Preisangabe wurde durch folgende Überlegung als plausibel verifiziert: Bei handelsüblichen Hydraulikölen, die auch als Multifunktionsöle unterschiedliche Verwendung finden, liegt der Kilogrammpreis im Durchschnitt bei ca. 1 €/kg. Das Fertigprodukt besteht zu 95 - 99 % aus einem Mineralölschnitt als Grundöl, der vergleichbar mit dem des Solvent-Raffinats ist.<sup>88</sup>

Die Marktpreise für Rapsmethylester-basierte KSS-Konzentrate schwanken ebenfalls stark. Eine Abfrage einschlägiger Internetbörsen ergab Marktpreise von ca. 5 €/l bis 10 €/l (5,68 €/kg - 11,36 €/kg bei einer mittleren Dichte des Rapsmethylesters von 0,88 g/cm<sup>3</sup>).<sup>89</sup> Es ist dabei zu beachten, dass Rapsmethylester überwiegend als Biokraftstoff Verwendung findet. Die Großhandelspreise auf dem Biodieselmart lagten 2015 für Rapsmethylester weitgehend starr um 0,7 €/l (exklusive Energiesteuer).<sup>90</sup> Nach Aussage von Experten ist davon auszugehen, dass für Nischenmärkte wie die KSS-Produktion gleiche Handelspreise für das Grundöl gelten, da dieselben zertifizierten Eigenschaften erfüllt werden müssen.<sup>91</sup> Daraus ermittelt sich ein durchschnittlicher Preis von 0,80 €/kg für das Rapsmethylester-Grundöl bei einer mittleren Dichte von 0,88 g/cm<sup>3</sup>. Dieser Grundölpreis liegt minimal unter dem des Solvent-Raffinats mit rund 0,95 - 1 €/kg. Da für diese Studie festgelegt wurde, dass die KSS-Konzentratherstellung identisch für beide Grundölalternativen sein soll, die Literatur jedoch KSS-Konzentrate auf Rapsmethylester-Basis als teurer beschreibt<sup>92</sup>, wird für das KSS-Konzentrat auf Rapsmethylester-Basis ein Beschaffungspreis von 5,68 €/kg entsprechend der unteren recherchierten Preisspanne festgelegt.

---

<sup>87</sup> E-Mail-Korrespondenz, 10.05.2016, Anhang B.

<sup>88</sup> Telefonische Auskunft, 17.05.2016, Anhang B.

<sup>89</sup> Vgl. Angaben aus verfügbaren Sicherheitsdatenblättern, etwa von SysKem (2011), S. 4.

<sup>90</sup> Vgl. Burghardt, B. (2015).

<sup>91</sup> Telefonische Auskunft, 19.05.2016, Anhang B.

<sup>92</sup> Vgl. Möller, U.J. und Nassar, J. (2013), S. 91.

## (2) Kosten für die Wasserbereitstellung zur Mischung der KSS-Emulsion

Entsprechend der Annahme, dass die Menge des mit dem KSS-Konzentrat zu mischenden Wassers gleich ist, resultieren gleiche Kosten für beide Grundölvarianten.

Der Wasserverbrauch wird mit dem Industriewasserpreis angesetzt. Dieser lag für das Jahr 2012 im gewichteten Mittel bei 1,735 €/m<sup>3</sup>.<sup>93</sup> Für das Jahr 2016 wird von einem Wert von rund 1,80 €/t für den durchschnittlichen Industriewasserpreis ausgegangen.

## (3) Entsorgungskosten (Gate Fees des zuständigen Entsorgers)

Die Entsorgung setzt sich aus der Spaltung der Altemulsion in eine wässrige Phase und eine Altölphase, der Abwasserbehandlung, der Altölverbrennung sowie den erforderlichen Energiekosten zusammen. Da die zu entsorgenden KSS-Mengen des Anwenders direkt an den Entsorger übermittelt werden, ist eine Splittung der Kosten in Abwasserbehandlung und Altölverbrennung nicht erforderlich. Für die ökonomische Betrachtung werden die an den Entsorger zu entrichtenden Gate Fees kalkuliert. Diese werden in gleicher Höhe für beide KSS-Alternativen angesetzt, da gemäß Abbildung 11 derselbe Entsorgungsweg festgelegt ist.

Die Entsorgungskosten pro Kubikmeter verbrauchter Emulsion sind in Deutschland regional unterschiedlich und schwanken konjunkturbedingt. Eine Abfrage bei deutschen Entsorgern ermittelte eine Spanne von 120 - 180 €/m<sup>3</sup> als Gate Fees. Dies gründet unter anderem auf begrenzten Kapazitäten zur Behandlung der Abfälle, was sich gerade in Zeiten des Konjunkturaufschwungs in steigenden Preisen bemerkbar macht.

Für die vorliegende Studie wird für die Entsorgungskosten der Mittelwert des Intervalls von 150 €/m<sup>3</sup> für beide KSS-Alternativen festgelegt. Dies entspricht den Kosten von 150 €/t, da die KSS-Emulsion zu 95 % aus Wasser besteht und vereinfachend eine Dichte von 1 g/cm<sup>3</sup> angenommen wird.

---

<sup>93</sup> Vgl. ZfK (2012).



Zusammenfassend resultieren aus Sicht des KSS-Anwenders für die Beschaffung, die Mischung der KSS-Emulsion sowie die Entsorgung der Altemulsion folgende spezifische Kosten (Tabelle 9).

**Tabelle 9: Kosten für Beschaffung des KSS-Konzentrats, Wasserverbrauch und Entsorgung**

| Kostenposition                   | Solvent-Raffinat       | Rapsmethylester        |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Marktpreis KSS-Konzentrat (€/kg) | 4,10 €/kg              | 5,68 €/kg              |
| Kosten für Wasserverbrauch (€/t) | 1,80 €/t (0,0018 €/kg) | 1,80 €/t (0,0018 €/kg) |
| Entsorgungskosten (€/t)          | 150 €/t (0,150 €/kg)   | 150 €/t (0,150 €/kg)   |

Für die ökonomische Bewertung wird ebenfalls der Bezug zur funktionellen Einheit hergestellt, indem die vorgestellten spezifischen Kosten mit den Daten aus dem Mengengerüst von Tabelle 8 verknüpft werden.

## 5 ERGEBNISSE DER ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN BEWERTUNG

### 5.1 Ergebnisse der ökologischen Bewertung

#### 5.1.1 Kumulierter Energieaufwand

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) gibt als Bewertungsindikator „... die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann“<sup>94</sup>. Dabei werden neben der energetischen Verwendung auch „der nichtenergetische Verbrauch sowie der stoffgebundene Energieinhalt berücksichtigt“<sup>95</sup>. Die Angabe erfolgt in Megajoule-Äquivalenten (MJ-eq).

Zum nichtenergetischen Verbrauch zählt hier die stoffliche Verwendung von Erdöl für die Herstellung des Grundöls Solvent-Raffinat (MIN). Diese stofflich genutzte Menge wird über den Brennwert (45,8 MJ/kg)<sup>96</sup> dem KEA zugerechnet. Die geerntete Menge Rapssamen beinhaltet einen stoffgebundenen Energiegehalt (24,07 MJ/kg Energie in Biomasse)<sup>97</sup> und wird bei der Berechnung des KEA für die Grundölvariante Rapsmethylester (RME) berücksichtigt.

Der KEA wird nach Primärenergieträgern gruppiert und hier in den übergeordneten Gruppen „KEA, erschöpflich“ und „KEA, regenerativ“ zusammengefasst. Dabei wurde folgende Zuordnung getroffen:

|                    |  |
|--------------------|--|
| KEA, erschöpflich: | KEA-fossil, -nuklear, -Biomasse/Primärwald |
| KEA, regenerativ:  | KEA-Biomasse, -Wind, -Solar, -Wasserkraft  |

Für die Berechnung der KEA-Werte wird die in Ecoinvent 3.2 bereitgestellte Methode verwendet. Dabei erfolgt die primärenergetische Bewertung anhand der Brennwerte (obere Heizwerte).

---

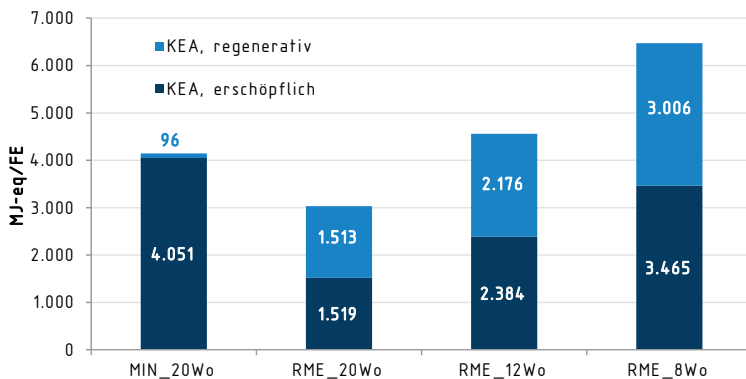
<sup>94</sup> VDI 4600:2012-01, S. 6.

<sup>95</sup> Kosmol, J. et al. (2012), S. 11.

<sup>96</sup> Vgl. Ecoinvent 3.2 (2015).

<sup>97</sup> Vgl. Ecoinvent 3.2 (2015).

Die im Folgenden dargestellten KEA-Werte basieren auf den Ergebnissen der Sachbilanz und sind jeweils bezogen auf die funktionelle Einheit (FE). Abbildung 14 zeigt die Anteile an „KEA, erschöpflich“ und „KEA, regenerativ“ der Grundölvarianten Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) und Rapsmethylester (RME\_20Wo) für eine Standzeit der Emulsion von 20 Wochen. Zusätzlich sind die Ergebnisse für das Grundöl Rapsmethylester mit verkürzten Standzeiten von zwölf Wochen (RME\_12Wo) und acht Wochen (RME\_8Wo) für den gesamten Lebenszyklus dargestellt.



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

**Abbildung 14: Kumulierter Energieaufwand (KEA) pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus**

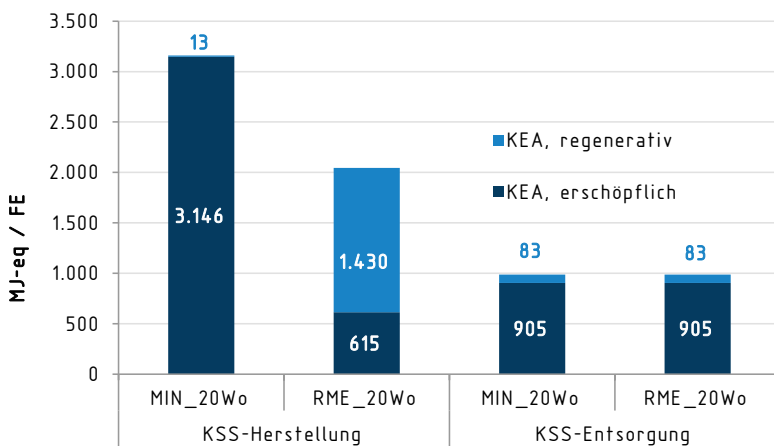
Es lässt sich erkennen, dass die Grundölvariante Rapsmethylester (RME\_20Wo) den geringsten KEA bei einer Standzeit der Emulsion von 20 Wochen verursacht. Dabei wird der erhebliche stoffgebundene Beitrag der Rapssamen zum „KEA, regenerativ“ von 1.513 MJ-eq/FE deutlich (Energie in der Biomasse = 1.405 MJ-eq/FE).

Der nichtenergetische Verbrauch an Erdöl trägt bei der Grundölvariante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) mit 2.715 MJ-eq/FE zum „KEA, erschöpflich“ von insgesamt 4.051 MJ-eq/FE bei.

Wird eine verkürzte Standzeit von zwölf Wochen betrachtet, übersteigt der KEA der Grundölvariante Rapsmethylester (RME\_12Wo) bereits den KEA für das mineralölbasierte Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo). Die Steigerung resultiert hierbei zu 57 % aus der Erhöhung des „KEA, erschöpflich“, der sowohl

auf die Herstellung als auch insbesondere auf die Entsorgung durch die Emulsionsspaltung zurückzuführen ist, und zu 43 % aus der Erhöhung des „KEA, regenerativ“, durch die Komponente des stoffgebundenen Energiebeitrags der Rapssamen.

Für eine detaillierte Betrachtung des KEA wurden in Abbildung 15 die Grundölvarianten Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) und Rapsmethylester (RME\_20Wo) bei einer Standzeit von 20 Wochen in die Lebensphasen KSS-Herstellung und -Entsorgung aufgeteilt. Dabei sind für die Nutzungsphase keine Aufwendungen zu verzeichnen, da annahmekonform der Energiebedarf für den Betrieb der Maschinen etc. für beide betrachteten KSS-Emulsionen gleich ist und sich deren Umweltbeitrag bei der vergleichenden ökologischen Bewertung herauskürzt.



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

Abbildung 15: Kumulierter Energieaufwand (KEA) pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen

Diese Darstellung macht deutlich, dass der KEA für die Entsorgungsphase beider Grundölvarianten gleich ist. Annahmebedingt ist für alle Alternativen derselbe Energieaufwand für die Emulsionsspaltung sowie die Abwasseraufbereitung und die Altölverbrennung erforderlich. Dabei hat die Emulsionsspaltung mit 890 MJ-eq/FE für „KEA, erschöpflich“ und 82 MJ-eq/FE für „KEA, regenerativ“ den größten Anteil am KEA der Entsorgungsphase. Die

Unterschiede bei den KEA-Gesamtwerten sind daher auf die Herstellungsphase zurückzuführen. Diese KEA-Werte werden dominiert durch den nicht-energetischen Beitrag des Erdöls zum „KEA, erschöpflich“ und den stoffgebundenen Energiebeitrag der Rapsamen zum „KEA, regenerativ“. Für das Solvent-Raffinat beträgt der stoffliche Anteil 86 % (2.715 MJ-eq/FE von 3.159 MJ-eq/FE) und für das Rapsmethylester 69 % (1.405 MJ-eq/FE von 2.044 MJ-eq/FE) vom Gesamt-KEA der Herstellungsphase. Wird ausschließlich die energetische Verwendung betrachtet, so leistet das Solvent-Raffinat den geringsten Beitrag zum KEA.

### 5.1.2 Kumulierter Rohstoffaufwand

Der Bewertungsindikator Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) ist die „Summe der zur Bereitstellung eines Produktes eingesetzten Rohstoffmengen entlang der Wertschöpfungskette. Der KRA umfasst alle zur Herstellung und Transport eines Produktes aufgewendeten Rohstoffe, inklusive der Energierohstoffe. Nicht wirtschaftlich verwendete Stoffe und Stoffgemische, wie die nicht verwertete Entnahme, bleiben unberücksichtigt.“<sup>98</sup> Der KRA wird auch definiert als „... die Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe – außer Wasser und Luft – ausgedrückt in Gewichtseinheiten“<sup>99</sup>. Wird der gesamte Lebensweg (cradle-to-grave) eines Produktes betrachtet, so können die Rohstoffaufwendungen nach Lebensphasen unterschieden werden. Zu berücksichtigende Rohstoffe sind Energierohstoffe sowie mineralische, fossile und biotische Rohstoffe, die noch in Primär- und Sekundärrohstoffe zu differenzieren sind.<sup>100</sup> Bei der Erstellung der Sachbilanz wurden alle Primärrohstoffe, die entlang dem Lebensweg in das Produktsystem eingehen, quantifiziert und nach Rohstoffen und Energierohstoffen gruppiert und aggregiert. Sekundärrohstoffe kamen in den hier betrachteten Produktsystemen nicht zum Einsatz.

Der fossile Primärrohstoff Erdöl wird hier sowohl stofflich (Herstellung des Grundöls Solvent-Raffinat) als auch energetisch (Energiebereitstellungs- und Transportprozesse) verwendet. Daher werden das stofflich genutzte Erdöl sowie der biotische Rohstoff Rapsamen, der durch Anbau erzeugt wird und

---

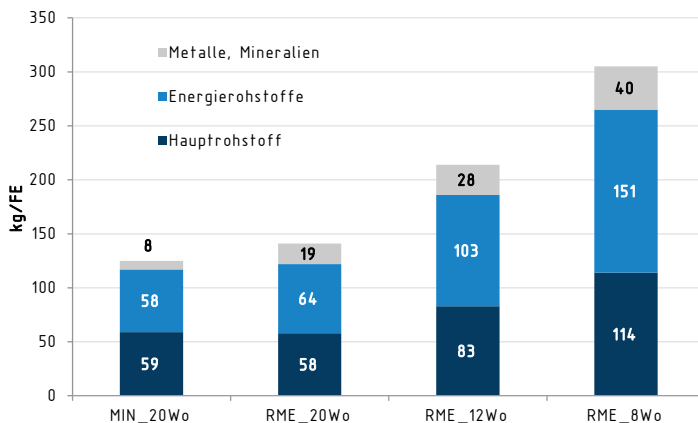
<sup>98</sup> Kosmol, J. et al. (2012), S. 12.

<sup>99</sup> Giegerich, J. et al. (2012), S. 22.

<sup>100</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2, S. 7.

seine eigentliche Funktion als Rohstoff für die Herstellung des Grundöls Rapsmethylester hat, durch die Bezeichnung „Hauptrohstoff“ gesondert betrachtet.

Die Gruppe „Energierohstoffe“ beinhaltet die energetisch genutzte Menge an Erdöl sowie weitere in Masse ausgewiesene Energierohstoffe wie Erdgas (Umrechnung von Volumen in Masse über die Dichte  $0,78 \text{ kg/m}^3$ )<sup>101</sup>, Kohle, Torf und Uran. Zu der Gruppe „Metalle, Mineralien“ wurden alle mineralischen Primärrohstoffe, die für die Bereitstellung von Energie, Betriebsstoffen, Infrastruktur etc. gebraucht werden, zusammengefasst. Abbildung 16 zeigt den KRA über den gesamten Lebenszyklus in Bezug auf die funktionelle Einheit.



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

**Abbildung 16: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus**

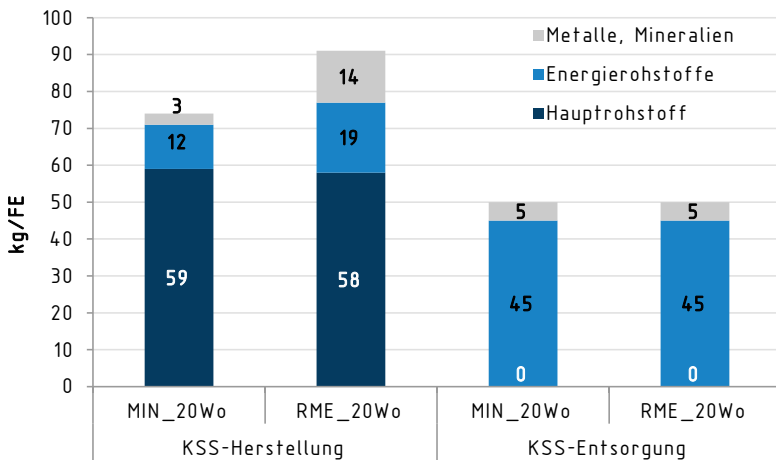
Die Grundölvariante Rapsmethylester benötigt im Vergleich zur Variante Solvent-Raffinat einen um 17 kg/FE höheren Rohstoffaufwand (RME\_20Wo: 142 kg/FE, MIN\_20Wo: 125 kg/FE). Die mineralischen Rohstoffe spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Den wesentlichen Beitrag am KRA über den gesamten Lebensweg haben die Hauptrohstoffe (MIN\_20Wo: 59,3 kg/FE,

<sup>101</sup> Vgl. Klöpffer, W. und Grahl, B. (2009), S. 84.

RME\_20Wo: 58,4 kg/FE) und die Energierohstoffe (MIN\_20Wo: 58 kg/FE, RME\_20Wo: 64 kg/FE).

Verkürzt sich die Standzeit der KSS-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis auf zwölf bzw. acht Wochen, erhöhen sich die KRA-Werte deutlich und zeigen einen um Faktor 1,7 (RME\_12Wo) bzw. Faktor 2,6 (RME\_8Wo) höheren benötigten Ressourcenaufwand über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur Grundölvariante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo).

Eine Unterteilung in die Lebenszyklusphasen verdeutlicht, dass der größte Anteil der Energierohstoffe in der Entsorgungsphase benötigt wird (Abbildung 17).



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

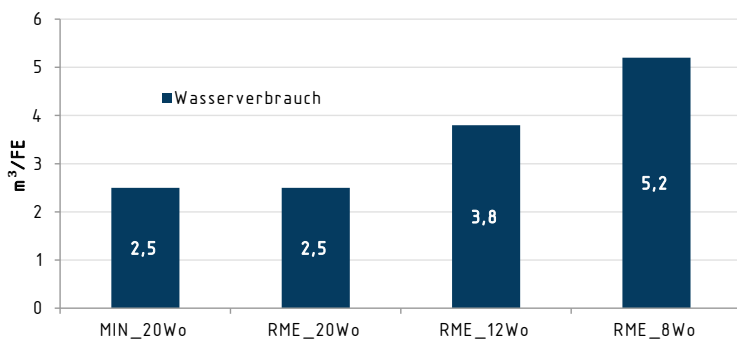
Abbildung 17: Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen

Wie beim KEA ist der KRA in der Entsorgungsphase für die Standzeit von 20 Wochen bei den KSS-Varianten gleich, wobei der Hauptbeitrag (99 % der Energierohstoffe) aus der Energiebereitstellung für die Emulsionsspaltung resultiert.

### 5.1.3 Wasserverbrauch

Die Rohstoffgruppe Wasser ist definitionsgemäß nicht im Indikator KRA enthalten und wird gesondert betrachtet. Dabei wird nur Frischwasser bewertet, das der Natur entnommen und durch Verdunstung, Bewässerung in der Landwirtschaft, Produktintegration etc. verbraucht wird, d. h. dem ursprünglichen „hydrologischen Einzugsgebiet nicht mehr zur Verfügung steht“<sup>102</sup>. Die Nutzung von Kühl- und Meerwasser wird nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Sachbilanzierung wurden die entsprechenden Mengen an Frischwasserressourcen (Fluss-, See-, Grundwasser etc.) quantifiziert und aggregiert. Dies entspricht auch dem Vorgehen der Umweltbewertungsmethode ReCiPe 2008<sup>103</sup> für die Ermittlung des Indikators Wasserverbrauch, der in Kubikmetern angegeben wird (Abbildung 18).



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

**Abbildung 18: Wasserverbrauch pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus der KSS-Varianten**

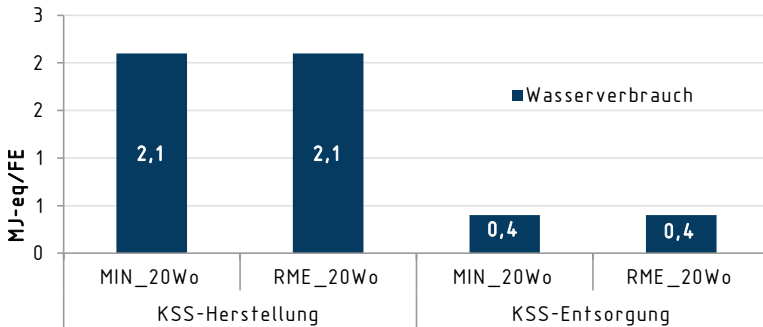
Beim Vergleich der Grundölvarianten mit einer Standzeit von 20 Wochen resultiert der gleiche Wasserverbrauch von 2,5 m<sup>3</sup> je funktioneller Einheit, der zu 82 % auf den erforderlichen Mengen an Trinkwasser und dem Aufbereitungsaufwand basiert. Eine verkürzte Standzeit des Rapsmethylesters von zwölf bzw. acht Wochen erhöht den Wasserverbrauch folglich um den Faktor 1,5 (RME\_12Wo) bzw. 2,1 (RME\_8Wo).

<sup>102</sup> VDI 4800 Blatt 2, S. 10.

<sup>103</sup> Vgl. Goedkoop, M. et al. (2013).



Eine Differenzierung in die einzelnen Lebenszyklusphasen zeigt nochmals, dass der Hauptanteil des Wasserverbrauchs für beide Grundölvarianten auf die KSS-Herstellungphase zurückzuführen ist (Abbildung 19).



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

Abbildung 19: Wasserverbrauch pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen

Der in der Herstellungsphase benötigte Wasserbedarf beinhaltet die Bereitstellung des Trinkwassers für die Mischung mit dem Konzentrat zur 5%igen KSS-Emulsion. Die erforderliche Menge an Trinkwasser und der Aufbereitungsaufwand sind für beide Varianten bei einer Standzeit von 20 Wochen gleich und es ergeben sich 2,1 m<sup>3</sup>/FE. Damit ist der Wasserverbrauch in der Herstellungsphase der Grundölvarianten Solvent-Raffinat und Rapsmethylester zu über 90 % durch die Trinkwasserbereitstellung bestimmt (Abbildung 19).

### 5.1.4 Flächeninanspruchnahme

Auch Flächen zählen zu den natürlichen Ressourcen. Sie werden nach ihrem Nutzen unterteilt, z. B. in Acker-, Weide-, Forst-, Gebäude-, Verkehrs- oder Deponieflächen. Die Flächeninanspruchnahme betrachtet die Nutzung einer bestimmten Fläche während einer bestimmten Nutzungsdauer. Ihre Maßeinheit ist somit Quadratmeter pro Jahr (m<sup>2</sup>\*a).

Für die Bewertung der Flächeninanspruchnahme werden hier die gleichen Flächenarten betrachtet, die auch in der Umweltbewertungsmethode

CML 2001<sup>104</sup> zum Tragen kommen. Sie werden für eine bessere Übersicht eingeteilt in die zwei Gruppen „Landwirtschaftsflächen“ und „Siedlungsflächen“. Folgende Flächennutzungen sind ihnen zugeordnet:

Landwirtschaftsflächen: Ackerflächen für ein- und mehrjährige Pflanzen, Weide-, Strauch- und Forstflächen

Siedlungsflächen: Industrie-, Stadt-, Baustellen-, Verkehrs-, Mineralabbau- und Deponieflächen

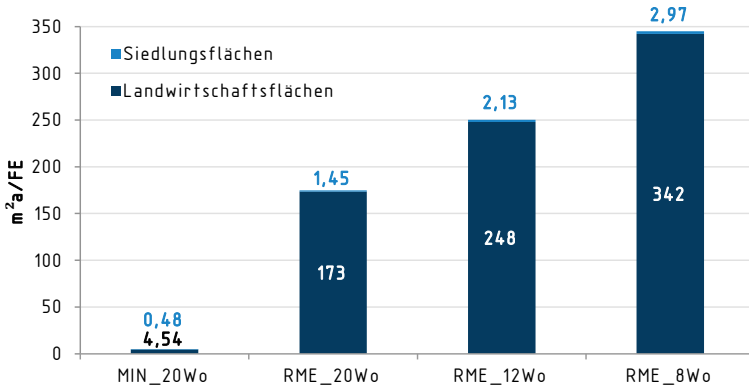
Basierend auf den Sachbilanzdaten wurden die entsprechenden Landnutzungen quantifiziert und aggregiert. Bezogen auf die funktionelle Einheit ergeben sich die in Abbildung 20 dargestellten Werte für die Flächeninanspruchnahme der Grundölkalternativen.

Die Grundölvariante Rapsmethylester weist für alle Standzeiten die größte Flächeninanspruchnahme über den gesamten Lebensweg auf. Dies lässt sich auf die erforderliche Landwirtschaftsfläche für den Rapsanbau zurückführen. Für die Standzeit von 20 Wochen ergibt sich basierend auf dem Flächenertrag von 3500 kg Rapssamen/(ha\*a)<sup>105</sup> eine Flächeninanspruchnahme von 167 m<sup>2</sup>\*a/FE für die Bereitstellung von 58,4 kg Rapssamen/FE. Mit verkürzten Standzeiten von zwölf bzw. acht Wochen erhöht sich der Flächenbedarf um den Faktor 1,4 bzw. den Faktor 2 für die Bereitstellung der Rapssamen für die funktionelle Einheit (Abbildung 20).

---

<sup>104</sup> Vgl. Giunée, J. B. (Ed.) (2002).

<sup>105</sup> Vgl. Ecoinvent 3.2 (2015).

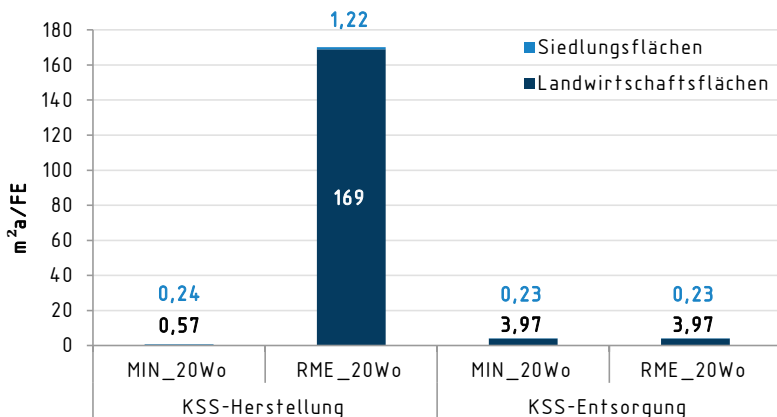


RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

Abbildung 20: Flächeninanspruchnahme pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus

Im Vergleich zur Grundölvariante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) wird für die Grundölvariante Rapsmethylester (RME\_20Wo) 38-mal mehr Fläche benötigt, bei einer verkürzten Standzeit von zwölf Wochen (RME\_12Wo) fast 55-mal mehr Fläche und für eine verkürzte Standzeit von acht Wochen (RME\_8Wo) ca. 75-mal mehr Fläche. Die beanspruchte Siedlungsfläche ist für alle betrachteten Varianten vernachlässigbar.

Eine Differenzierung in die Lebenszyklusphasen Herstellung und Entsorgung verdeutlicht den Sachverhalt (Abbildung 21).



RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

Abbildung 21: Flächeninanspruchnahme pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen

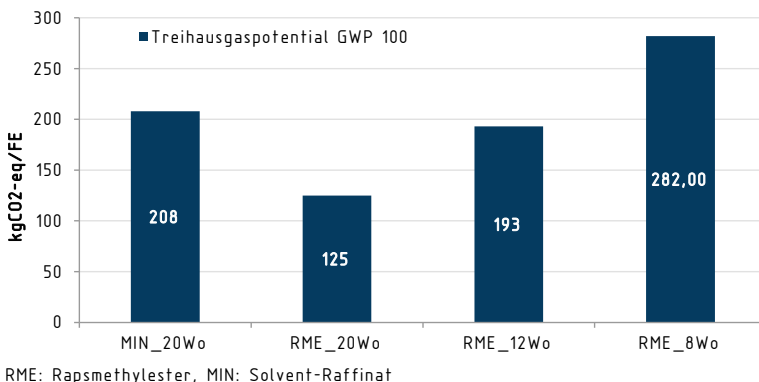
In der Herstellungsphase des Grundöls Rapsmethylester (Standzeit von 20 Wochen) wird der größte Teil an Fläche von 169 m<sup>2</sup>\*a/FE beansprucht. Die Flächeninanspruchnahme für die Entsorgungsphase ist für die KSS-Varianten bei einer Standzeit von 20 Wochen gleich und wird von dem Beitrag für die Energiebereitstellung hinsichtlich der Emulsionsspaltung dominiert.

### 5.1.5 CO<sub>2</sub>-Äquivalente

Emissionen von Treibhausgasen führen dazu, dass diese in die Atmosphäre gelangen, dort verweilen und Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) absorbieren sowie reflektieren, wodurch sich die Erdoberfläche erwärmt. Dieser natürliche Prozess wird durch zunehmende anthropogene Emissionen von Treibhausgasen verstärkt, führt zu einer globalen Erwärmung und trägt zum Klimawandel bei. Zu den Treibhausgasen zählen unter anderem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffmonoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O). Sie haben unterschiedliche Absorptionskapazitäten und Verweildauern. Ihr Potenzial, mit dem sie zum Treibhauseffekt beitragen, wird in Relation zur Leitsubstanz CO<sub>2</sub> ausgedrückt (CO<sub>2</sub>-Äquivalente). Als Indikator wird das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Verweildauern der Treibhausgase in der Atmosphäre muss der

betrachtete Zeithorizont angegeben werden. Üblich ist ein Bezug auf 100 Jahre (GWP100). Die Angabe erfolgt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (kg CO<sub>2</sub>-eq). Dieser Indikator ist in der Wissenschaft weit verbreitet und wird häufig zur ökologischen Bewertung eingesetzt.

Für die Bewertung der in der Sachbilanz ermittelten Emissionen an Treibhausgasen wurden die Äquivalenzfaktoren nach IPCC 2007<sup>106</sup> verwendet. In Abbildung 22 sind die Treibhausgaspotenziale GWP100 der Grundölvarianten für den gesamten Lebensweg dargestellt. Bezogen auf die funktionelle Einheit und bei einer Standzeit der Emulsion von 20 Wochen weist die Grundölvariante Rapsmethylester das geringere Treibhausgaspotenzial (RME\_20Wo: 125 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) im Vergleich zur Grundölvariante Solvent-Raffinat auf (MIN\_20Wo: 208 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE).



**Abbildung 22: Treibhausgaspotenzial GWP100 pro funktionelle Einheit (FE) für den gesamten Lebenszyklus**

Verkürzen sich die Standzeiten der KSS-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis auf zwölf bzw. acht Wochen, nimmt das GWP100 deutlich zu. Bei einer Standzeitverkürzung auf zwölf Wochen liegt das Treibhausgaspotenzial von 193 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE im Bereich der Solvent-Raffinat-Variante (208 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE). Verringert sich die Standzeit auf acht Wochen, so übersteigt das GWP100 diesen Wert um 69 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE.

<sup>106</sup> Vgl. IPCC (2007).

Eine detailliertere Analyse entlang den Lebenszyklusphasen für alle Varianten zeigt, dass das Treibhausgaspotenzial der Rapsmethylester-Varianten mit einer Standzeit von 20, zwölf und acht Wochen in der Entsorgungsphase stärker zunimmt als in der Herstellungsphase (Abbildung 23). Der Haupttreiber in der Entsorgungsphase ist der Energiebereitstellungsprozess für die Emulsionsspaltung, der im Wesentlichen mit CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden ist.

Dagegen ist der Hauptverursacher in der Herstellungsphase im landwirtschaftlichen Rapsanbau und im Düngemittleinsatz zu sehen, wodurch CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen freigesetzt werden. Eine Detailanalyse zeigt, dass der Prozess des landwirtschaftlichen Rapsanbaus der größte Verursacher von Treibhausgasen ist und mit 48 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE (RME\_20Wo) zum GWP100 beiträgt. Dies begründet auch das geringere GWP100 der Grundölvariante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) von 41 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE im Vergleich zu einem GWP100 von 59 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE der Rapsmethylester-Variante (RME\_20Wo) in der Herstellungsphase. Bei der Grundölvariante Solvent-Raffinat ist neben der Rohölbereitung (14,5 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) die Energiebereitstellung im dritten Grundölherstellungsschritt (20 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) hauptsächlich verantwortlich für das GWP100 und wird überwiegend durch CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht.

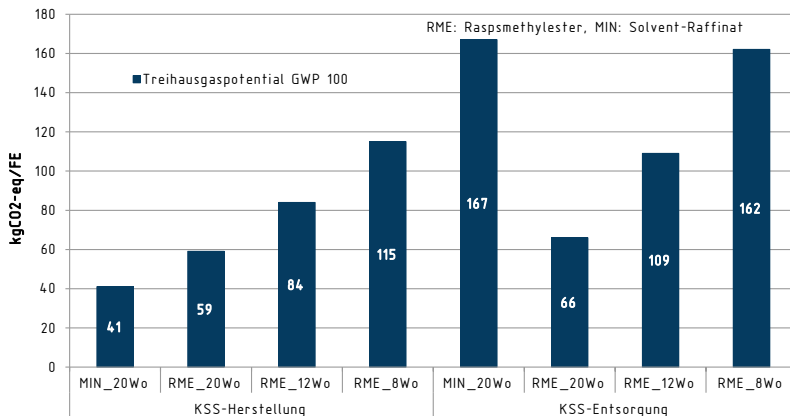


Abbildung 23: Treibhauspotential GWP100 pro funktionelle Einheit (FE), unterteilt nach Lebenszyklusphasen

In der KSS-Entsorgungsphase ergibt sich für die erdölbasierte Variante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) ein Treibhauspotential von 167 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE, das um ca. 100 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE über dem der rapsölbasierten Variante (RME\_20Wo) liegt. Ein Beitrag am GWP100 in der Entsorgungsphase stammt aus der Energiebereitstellung für die Emulsionsspaltung (59,5 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) und ist für die Varianten Rapsmethylester und Solvent-Raffinat bei einer Standzeit von 20 Wochen gleich. Auch der Beitrag am GWP100, der durch die Aufbereitung der wässrigen Phase verursacht wird, ist für diese Varianten (MIN\_20Wo, RME\_20Wo) identisch, wenn auch vergleichsweise gering (0,35 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE).

Unterschiede ergeben sich durch die Emissionen bei der Altölverbrennung (MIN\_20Wo: 68,6 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE, RME\_20Wo: 4,3 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE) und der Verbrennung der KSS-Spananhaftung (MIN\_20Wo: 38,9 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE, RME\_20Wo: 1,8 kg CO<sub>2</sub>-eq/FE). Dies ist auf die CO<sub>2</sub>-Korrektur für die rapsölbasierte KSS-Emulsion zurückzuführen, wodurch deren biogener Kohlenstoffanteil berücksichtigt wird. Dieser trägt nicht zum Treibhauseffekt bei, da er zuvor beim Pflanzenwuchs aus der Atmosphäre aufgenommen wurde.

Aus dem „Output-seitigen“ Indikator GWP100 erwächst somit ein Vorteil der Grundölvariante Rapsmethylester (RME\_20Wo), weil der biogen gebundene Kohlenstoff CO<sub>2</sub>-neutral wieder freigesetzt wird. Dieser Effekt wird jedoch

mit sinkender Standzeit aufgehoben, da die steigenden Emissionen aus Herstellungs- und Entsorgungsphase das gesamte Treibhausgaspotenzial der mineralölbasierten Variante Solvent-Raffinat nach ca. zwölf Wochen überschreiten.

## 5.2 Rohstoffkritikalität

Zur Bewertung der Rohstoffkritikalität wird die Kritikalitätsanalyse entsprechend der VDI 4800 Blatt 2 durchgeführt. Die Analyse „... zielt darauf ab, Rohstoffe eines rohstoffnutzenden Systems (Bezugssystem) zu identifizieren, die für dieses essentielle Funktionen erfüllen, deren Versorgung jedoch risikobehaftet ist. Sie ermöglicht die Bewertung der Vulnerabilität (Verletzbarkeit) eines Bezugssystems (z. B. eines Unternehmens) gegenüber Versorgungsstörungen spezifischer Rohstoffe.“<sup>107</sup>

Als Hauptrohstoffe, die für die Herstellung der hier betrachteten Grundöle essentiell sind, wurden Erdöl und Raps (Rapssamen bzw. Rapsöl) identifiziert. Für diese Rohstoffe wurde die Kritikalitätsdimension Versorgungsrisiko anhand der in der VDI-Richtlinie<sup>108</sup> genannten Kriterien und Indikatoren ermittelt. Für den fossilen organischen Rohstoff Erdöl lagen bereits entsprechende Ergebnisse vor<sup>109</sup>, die hier übernommen wurden. Für den biotischen Rohstoff Raps (Rapssamen/Rapsöl) wurde eine eigene Bewertung durchgeführt, die sich wie folgt begründet:

### (1) Geologische, technische und strukturelle Kriterien

#### (a) Statische Reichweite

Als Indikator für die statische Reichweite dient das „Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion“. Da biotische Rohstoffe jedoch nachwachsende Rohstoffe darstellen, muss der Begriff Reserve anders definiert und zwischen Anbau und Entnahme von biotischen Rohstoffen differenziert werden. Für die durch Anbau bereitgestellten biotischen Rohstoffe (wie Raps) ist der Standardwert 0,7 als Indikatorwert festgelegt.

---

<sup>107</sup> VDI 4800 Blatt 2:Entwurf, S. 11.

<sup>108</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:Entwurf, S. 13.

<sup>109</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:Entwurf, Anhang B, Tab. 4.



(b) Koppelproduktion/Nebenprodukt

Wird ein Rohstoff als Neben- oder Koppelprodukt gewonnen, so ist dessen Verfügbarkeit abhängig von dem Angebot bzw. der Nachfrage des Hauptprodukts. Die Klassifizierung erfolgt daher über den Indikator „Grad Koppelproduktion/Nebenproduktion“. Da Rapsöl gegenüber dem Rapsschrot als Hauptprodukt identifiziert werden kann, wird der Indikatorwert 0 (Rohstoff ist ausschließlich Hauptprodukt) ermittelt.

(c) Recycling

Recycling im Sinne einer stofflichen Verwertung von End-of-Life-Abfällen schont einerseits natürliche Ressourcen und bietet andererseits Sekundärrohstoffe als Ersatz oder Ergänzung für Primärrohstoffe. Als Indikator für dieses Kriterium dient der „Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Recyclingtechnologien“. Der End-of-Life-Abfall des KSS auf Basis von Rapsmethylester ist die Altemulsion, die nach der Emulsionsspaltung einer thermischen Verwertung zugeführt wird. Eine stoffliche Verwertung ist nicht bekannt. Daher wird der Indikatorwert auf 1 (Recycling nicht etabliert) gesetzt.

(d) Logistische Beschränkungen

Transportentfernungen, Handelsverflechtungen und Lagerfähigkeit sind die Parameter, die den Indikator „Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport“ bestimmen. Da in dieser Studie die Annahme getroffen wurde, dass der verwendete Rohstoff Raps in Deutschland angebaut wird, ergibt sich der Indikatorwert 0 (Lagerung und Transport unproblematisch und wirtschaftlich vertretbar).

(e) Beschränkungen durch Naturereignisse

Die Verfügbarkeit biotischer Rohstoffe kann durch Naturereignisse (z. B. Dürre, Schädlingsbefall) beeinträchtigt werden. Da noch keine adäquate Datenbasis für die Quantifizierung der Anfälligkeit der Rohstoffgewinnung gegenüber Naturereignissen vorliegt, werden Standardindikatorwerte in Abhängigkeit vom Anbaubereich definiert. Für Raps, der grundsätzlich weltweit angebaut wird, beträgt daher der Indikatorwert 0,3 (biotische Rohstoffe, deren Vorkommen/Hauptanbaubereich auf mehrere Kontinente verteilt ist).

## (2) Geopolitische und regulatorische Kriterien

## (a) Länderkonzentration der Reserven

Mit zunehmender Verteilung der Reserven auf mehrere Länder wird das Risiko zur Ausnutzung einer Marktmacht reduziert. Als Indikator für das Länderrisiko der Reserven wird der Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) verwendet, der definiert ist als die Summe der quadrierten Anteilswerte der Reserven aller Marktteilnehmer. Für biotische Rohstoffe, die durch Anbau gewonnen werden, bezieht sich der HHI auf die weltweiten Anbauflächen. Die Berechnung des HHI für Raps basiert auf den statistischen Werten von FAOSTAT<sup>110</sup> für das Bezugsjahr 2013. Hierfür wurden die 19 Länder mit den größten Anteilen herangezogen, wodurch insgesamt 95 % der weltweiten Anbauflächen berücksichtigt werden konnten. Der berechnete HHI beträgt 0,149. Daraus ergibt sich ein Indikatorwert von 0,3 ( $\text{HHI} < 0,15$  geringe Reservekonzentration).

## (b) Länderkonzentration der Produktion

Eine Konzentration der Rohstoffproduktion auf wenige Länder erhöht das Risiko zur Einflussnahme einer Marktmacht und kann sich negativ auf die Rohstoffverfügbarkeit auswirken. Als Indikator wird hier ebenfalls der Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) herangezogen und die Summe der quadrierten Anteilswerte der Produktionsmengen aller Marktteilnehmer wird gebildet. Die Berechnung des HHI für Raps wurde für das Bezugsjahr 2013 mit den statistischen Angaben für die weltweiten Produktionsmengen nach FAOSTAT<sup>111</sup> durchgeführt. Dafür wurden 19 Länder in der Rangfolge ihrer Produktionsmengen berücksichtigt. Sie decken insgesamt 95 % der Weltproduktion ab. Der berechnete HHI beträgt 0,144, wodurch sich ein Indikatorwert von 0,3 ( $\text{HHI} < 0,15$  geringe Konzentration der Produktion) ergibt.

---

<sup>110</sup> Vgl. FAOSTAT (2013), Area harvested, Rapeseed, 2013, World List.

<sup>111</sup> Vgl. FAOSTAT (2013), Production Quantity, Rapeseed, 2013, World List.

(c) Geopolitische Risiken der Weltproduktion

„Der Zugang zu Rohstoffen wird von der politischen Stabilität der Exportländer und Abbauregionen wesentlich beeinflusst.“<sup>112</sup> Insbesondere Länder mit anhaltenden politischen Auseinandersetzungen und gewaltsamen Konflikten können die Rohstoffverfügbarkeit beeinträchtigen. Für die Ermittlung des Indikators „Politisches Länderrisiko“ (PLI) werden daher Merkmale wie Mitspracherecht und Destabilisierungswahrscheinlichkeit berücksichtigt, die über die zwei Weltbank-Indikatoren „Mitspracherecht und Verantwortung“ und „Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt“ quantifiziert werden. Die Berechnung des PLI für den biotischen Rohstoff Raps erfolgte nach den in der VDI-Richtlinie<sup>113</sup> angegebenen Formeln anhand der von der Weltbank<sup>114</sup> aufgeführten Perzentil-Werte für „Mitspracherecht und Verantwortung“ und „Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt“ für das Bezugsjahr 2013 bezogen auf die neun weltweit größten Produktionsländer (Kanada, China, Indien, Deutschland, Frankreich, Australien, Polen, Ukraine, Großbritannien), die insgesamt 85 % der Weltproduktion abdecken. Der berechnete PLI-Wert beträgt 0,39, woraus sich der Indikatorwert 0,3 ( $0,15 \leq \text{PLI} < 0,5$ ; moderates relatives politisches Länderrisiko) ableitet.

(d) Regulatorische Situation für Rohstoffprojekte

Auch regulatorische Rahmenbedingungen, die beispielsweise aus der Wirtschafts-, Steuer- und Umweltpolitik resultieren, können die Rohstoffverfügbarkeit beeinflussen. Zur Berechnung des Indikators „Regulatorisches Länderrisiko“ (RLI) werden die hierfür relevanten vier Weltbankindikatoren „Schutz des Eigentums“, „Handels-, Wettbewerbs- und Umweltpolitik“, „Korruptionskontrolle“ und „Bürokratieaufwand und öffentliche Daseinsfürsorge“ berücksichtigt. Die Berechnung des RLI für den biotischen Rohstoff Raps erfolgte nach den in der VDI-Richtlinie<sup>115</sup> angegebenen Formeln anhand der von der Weltbank<sup>116</sup> aufgeführten Perzentil-Werte für die genannten Weltbankindikatoren. Auch hier beziehen sich die Werte auf das Jahr 2013 für die neun weltweit größten Produktionsländer, wodurch 85 % der

---

<sup>112</sup> VDI 4800 Blatt 2:Entwurf, S. 18.

<sup>113</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:Entwurf, S. 18 – 19.

<sup>114</sup> Vgl. Kaufmann, D., Kraay, A. und Mastruzzi, M. (2010).

<sup>115</sup> VDI 4800 Blatt 2:Entwurf, S. 19 – 20.

<sup>116</sup> Vgl. Kaufmann, D.; Kraay, A. und Mastruzzi, M. (2010).

globalen Produktion abgedeckt sind. Der ermittelte RLI-Wert beträgt 0,27. Daraus ergibt sich der Indikatorwert 0,3 ( $0,15 \leq \text{RLI} < 0,5$ ; moderates relatives regulatorisches Länderrisiko).

### (3) Ökonomische Kriterien

#### (a) Unternehmenskonzentration der globalen Produktion

Da auch die rohmaterialherstellenden Unternehmen einen erheblichen Einfluss auf das Rohstoffangebot und damit die Rohstoffpreise ausüben können, gibt eine hohe Unternehmenskonzentration einen Hinweis auf ein Versorgungsrisiko. Als Indikator dient der „Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) der Unternehmen“. Für den biotischen Rohstoff Raps (Rapssamen-/Rapsöl) konnten jedoch keine Werte zur Berechnung des HHI ermittelt werden. Da aber sowohl der Rapsanbau als auch die weiteren Verarbeitungsstufen (Rapsölproduktion und Umesterung) weltweit etablierte Verfahren bilden und kein Unternehmen über eine Monopolstellung verfügt, wurde ein Indikatorwert von 0,3 (geringe Unternehmenskonzentration) qualitativ abgeschätzt.

#### (b) Globaler Nachfrageimpuls

Eine steigende Rohstoffnachfrage erfordert eine Ausweitung des Rohstoffangebots und geht häufig mit Preissteigerungen einher. Als Indikator für das Versorgungsrisiko wird der „Grad der Nachfragesteigerung“ gesehen. Das Risiko wächst, je stärker die Nachfrage steigt und je sprunghafter diese ist. Der biotische Rohstoff Raps hat neben seiner Bedeutung als Nahrungsmittel bereits eine zunehmende Nachfrage als Rohstoff für die Biodieselproduktion erlangt. Nachfrage und Angebot sind in den vergangenen Jahren relativ parallel verlaufen. So ist die Nachfrage nach Biodiesel in Deutschland seit 2011 etwa gleichgeblieben, wobei der Import von Raps zugenommen hat und die heimische Rapsanbaufläche zurückgegangen ist.<sup>117</sup> Als zukünftiger Trend für die globale Nachfrage nach Ölsaaten zeichnet sich eine weitere Zunahme ab, wobei die Haupttreiber die wachsende Bevölkerung und die energetische Nutzung der pflanzlichen Öle sind. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass die

---

<sup>117</sup> Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2013), S. 29.

Anbauflächen für wichtige Ölsaaten ausgedehnt und die Preise für Pflanzenöle weiter steigen werden.<sup>118</sup> Für den Indikator „Grad der Nachfragesteigerung“ wird daher ein Wert von 0,3 (Steigerung der Nachfrage entwickelt sich parallel zum Weltwirtschaftswachstum) abgeschätzt.

(c) Substituierbarkeit

Die Möglichkeit, einen Rohstoff durch einen alternativen Rohstoff ersetzen zu können, nimmt Einfluss auf das Versorgungsrisiko. Dabei spielen funktionale und wirtschaftliche Aspekte eine wesentliche Rolle. Für die Substitution von Rapsöl bzw. Rapsmethylester zur Verwendung als Grundöl für wmb KSS könnten Alternativen auf pflanzlicher, tierischer oder mineralischer Basis identifiziert werden. Der Indikator „Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen“ wird daher mit 0,3 (Substituierbarkeit zu geringen Kosten) abgeschätzt.

(d) Rohstoffpreisschwankungen

Formell können Rohstoffpreisschwankungen mit Hilfe des Indikators der Volatilität ausgedrückt werden, der idealerweise als aktuelle Berechnung auf Basis der Daten eines Jahres formell berechnet werden kann.

Als Quellen für aktuelle Preisentwicklungen, die Preise für Rapsöl erfassen, wurden die Internetplattformen „index mundi“<sup>119</sup> sowie der „Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.“ (C.A.R.M.E.N. e.V.)<sup>120</sup> identifiziert und für eine Bewertung herangezogen. Diese Quellen erlauben eine qualitative Einschätzung der Preisänderungen, im Fall von index mundi in monatlichen Intervallen über die vergangenen sechs Monate und im Fall von C.A.R.M.E.N. e.V. in zweimonatlichen Intervallen von November 2012 bis November 2015. Nach Einschätzung dieser Preisentwicklungen für Rapsöl sind die zu erwartenden Preisschwankungen von moderatem Umfang und führen nicht zu hohen Versorgungsunsicherheiten auf diesem Rohstoffmarkt.

---

<sup>118</sup> Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (2014b), S. 49.

<sup>119</sup> Vgl. index mundi (2016).

<sup>120</sup> Vgl. C.A.R.M.E.N. e.V. (2016).

Da noch keine verbindliche Einschätzung, etwa durch die DERA, getroffen wurde, wurde der Indikator „Annualisierte Preisvolatilität“ qualitativ gemäß den einsehbaren Intervallen der Preisentwicklungen für Rapsöl mit 0,3 (Preisvolatilität  $\geq 5\%$ ,  $< 10\%$ ) abgeschätzt.

In Abbildung 24 sind die hier ermittelten Indikatorwerte für den biotischen Rohstoff Raps (Rapssamen/Rapsöl) und die der VDI-Richtlinie entnommenen Indikatorwerte für den fossil organischen Rohstoff Erdöl zusammengestellt.

| Rohstoff/<br>Element  | Geologische, technische<br>und strukturelle<br>Indikatoren                                   | Geopolitische und<br>regulatorische<br>Indikatoren | Ökonomische<br>Indikatoren |              |
|---|--|--|----------------------------|--------------|
|   |  |  | Standardwert               | Referenzwert |
| Biotische Rohstoffe<br>Rapssamen/Rapsöl<br>Fossil organ. Rohstoffe<br>Erdöl | Verbreitungsgrad natürlicher<br>Vorkommen/Anbauggebiete                                      |  | 0,3                        |              |
|   | Wirtschaftlichkeit von Lagerung<br>und Transport   |  | 0                          | 0,3          |
|   | Verbreitungsgrad funktionaler<br>EoL-Recyclingtechnologien                                   |  | 1                          |              |
|   | Grad der Koppelproduktion/<br>Nebenproduktion  |  | 0                          |              |
|   | Verhältnis von Reserven zu<br>globaler Jahresproduktion                                      | 0,7  |                            |              |
|   | Annualisierte Preisvolatilität   |  | 0,3                        |              |
|   | Technische Machbarkeit und<br>Wirtschaftlichkeit von Substi-<br>tutionen in Hauptanwendungen |  | 0,3                        | 0            |
|   | Grad der Nachfragesteigerung   |  | 0,3                        | 0,7          |
|   | Herfindahl-Hirschmann-Index<br>der Unternehmen   |  | 0,3                        | 0,3          |
|   | Regulatorisches Länderrisiko   |  | 0,3                        | 0,3          |
| Politisches Länderrisiko  |  |  |                            |              |
| Herfindahl-Hirschmann-Index<br>der Länderproduktion                         |  | 0,3  |                            |              |
| Herfindahl-Hirschmann-Index<br>der Reserven                                 |  | 0,3  | 0,3                        |              |

Legende: Zellenfüllung weiß: Daten berechnet und Quellen bekannt und referenziert; grau gestreift: Standardwert durch Richtlinie vorgegeben; grau Expertenabschätzung

Abbildung 24: Bewertung des Versorgungsrisikos für Raps und Erdöl

## 5.3 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

### 5.3.1 Beschaffungs- und Wasserkosten

Die für die Beschaffung des KSS-Konzentrats notwendigen Kosten aus Sicht des KSS-Anwenders belaufen sich für die mineralölbasierte Variante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) auf 375,97 €/a bei einer Standzeit von 20 Wochen. Die jährlichen Wasserkosten zur Herstellung der Emulsion betragen 3,13 €/a. In der Summe verursacht die Grundölvariante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) jährliche Kosten von 379,10 € (Tabelle 10).

**Tabelle 10: Beschaffungs- und Wasserkosten der funktionellen Einheit in Euro/a**

| Variante | KSS-Konzentrat | Beschaffungs-kosten | Wasser-menge | Wasser-kosten | Gesamt-kosten |
|----------|----------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|
|          |                | KSS-Konzentrat      |              |               |               |
|          | kg/a           | €/a                 | kg/a         | €/a           | €/a           |
| MIN_20Wo | 91,7           | 375,97 €            | 1.741        | 3,13 €        | 379,10 €      |
| RME_20Wo | 91,7           | 520,86 €            | 1.741        | 3,13 €        | 523,99 €      |
| RME_12Wo | 130,7          | 742,38 €            | 2.482        | 4,47 €        | 746,84 €      |
| RME_8Wo  | 179,4          | 1.018,99 €          | 3.409        | 6,14 €        | 1.025,13 €    |

Basierend auf dem festgelegten Beschaffungspreis von 5,68 €/kg für das KSS-Konzentrat auf Rapsmethylester-Basis liegen die Gesamtkosten inklusive der Wasserkosten für die Grundölvariante Rapsmethylester (RME\_20Wo) um ca. das 1,4-Fache höher als für die Variante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo). Verkürzen sich die Standzeiten auf zwölf bzw. acht Wochen erhöhen sich die Kosten weiter um das Doppelte bzw. 2,7-Fache.

### 5.3.2 Entsorgungskosten

Die Entsorgungskosten für die Altemulsion beziehen sich auf den Output, ohne die Mengen, die über die Spananhaftungen aus dem betrachteten KSS-System ausgeschleppt werden, zu berücksichtigen. Der für die Emulsionspaltung erforderliche Energiebedarf, der bei verkürzter Standzeit von 93,6 kWh/FE auf 156 kWh/FE bzw. 234 kWh/FE steigt, ist in den Entsorgungskosten enthalten, da sie als Bestandteil der Gate Fees zu verstehen sind. Die Entsorgungskosten für die Grundölvarianten Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) und Rapsmethylester (RME\_20Wo) betragen somit bei einer



Standzeit von 20 Wochen 175,50 €/a bei einem spezifischen Preis von 150 €/t (Tabelle 11).

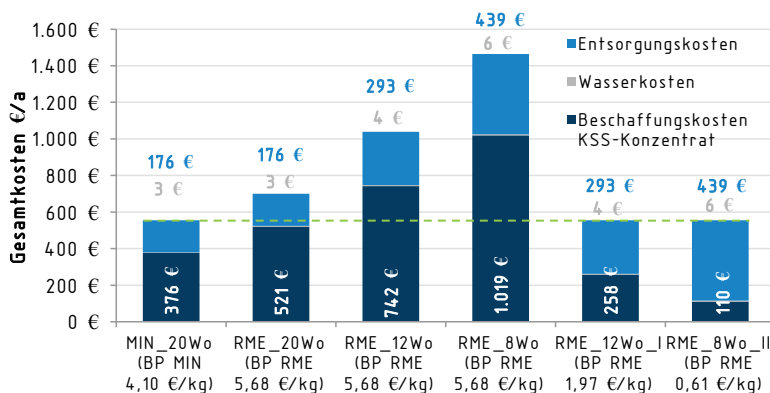
**Tabelle 11: Kosten der funktionellen Einheit für die Entsorgung in Euro/a**

| Variante | Altemulsion<br>kg/a | Entsorgungskosten<br>€/a |
|----------|---------------------|--------------------------|
| MIN_20Wo | 1.170               | 175,50 €                 |
| RME_20Wo | 1.170               | 175,50 €                 |
| RME_12Wo | 1.950               | 292,50 €                 |
| RME_8Wo  | 2.925               | 438,75 €                 |

Eine verkürzte Standzeit von zwölf bzw. acht Wochen führt zu erhöhten Entsorgungskosten von jährlich 292,50 € bzw. 438,75 €. Dies entspricht einer Kostensteigerung um den Faktor 1,7 bzw. 2,5 im Vergleich zu den Varianten MIN und RME mit einer Standzeit von 20 Wochen.

### 5.3.3 Gesamtkosten aus Sicht des KSS-Anwenders

Abbildung 25 zeigt die Gesamtkosten für alle betrachteten KSS-Varianten, unterteilt nach den Kostenpositionen. Zusätzlich sind zwei weitere Szenarien dargestellt, die geringere, hypothetische Beschaffungspreise für die KSS-Konzentrate auf Rapsmethylester-Basis so kalkulieren (RME\_12Wo\_I, RME\_8Wo\_I), dass die Gesamtkosten denen der mineralölbasierten Variante (MIN\_20Wo) entsprechen.



BP = Beschaffungspreis in €/kg, RME: Rapsmethylester, MIN: Solvent-Raffinat

**Abbildung 25: Gesamtkosten der KSS-Varianten pro funktionelle Einheit (FE) und Jahr, unterteilt nach Kostenpositionen**

Die Gesamtkosten betragen für die Grundölvariante Rapsmethylester (RME\_20Wo) 699,49 €/a und sind um das 1,3-Fache höher als die Kosten für die Grundölvariante Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) mit Gesamtkosten von 554,60 €/a. Mit sinkenden Standzeiten erhöhen sich die benötigten Kühlschmierstoff-, Wasser- und Entsorgungsmengen, so dass sich die Kosten im Vergleich zur Rapsmethylester-Variante mit einer Standzeit von 20 Wochen (RME\_20Wo) bei einer Standzeit von zwölf Wochen um ca. das 1,5-Fache erhöhen (1039,34 €/a) und bei einer Standzeit von acht Wochen verdoppeln (1463,88 €/a).

Für den betrachteten Anwendungsfall müsste bei gleichbleibenden Wasser- und Entsorgungskosten der Beschaffungspreis für die Variante Rapsmethylester mit zwölf Wochen Standzeit (RME\_12Wo\_I) bzw. mit acht Wochen Standzeit (RME\_8Wo\_I) bis auf 1,97 €/kg KSS-Konzentrat bzw. 0,61 €/kg KSS-Konzentrat sinken, um die gleichen Gesamtkosten von 554,60 €/a des Solvent-Raffinats zu erzeugen (MIN\_20Wo).

Im umgekehrten Fall müsste die KSS-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis bei einem spezifischen Beschaffungspreis von 5,68 €/kg eine Standzeit von 26,5 Wochen erreichen, um die gleichen jährlichen Gesamtkosten des Solvent-Raffinats zu erzielen (Abbildung 26).

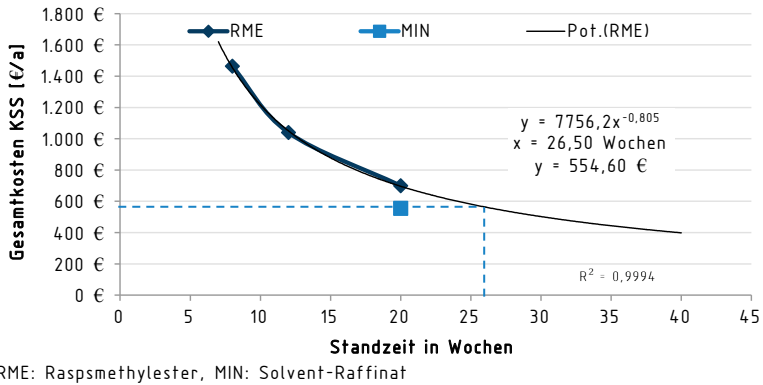


Abbildung 26: Break-Even-Point der Grundölalternativen Solvent-Raffinat und Rapsmethylester

Die Beschaffungskosten haben mit 68 % beim Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) und bis zu 74,5 % beim Rapsmethylester (RME\_20Wo) den größten Anteil an den Gesamtkosten. Wasserkosten machen jeweils ca. 0,5 % aus. Der Anteil der Entsorgungskosten beläuft sich auf ca. 25 % für Rapsmethylester (RME\_20Wo) und auf bis zu 32 % für Solvent-Raffinat (MIN\_20Wo) (Tabelle 12).

Tabelle 12: Kostenverteilung Beschaffung, Wasser, Entsorgung

| Variante | Anteil Kosten Beschaffung | Anteil Kosten Wasser | Anteil Kosten Entsorgung |
|----------|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| MIN_20Wo | 67,79 %                   | 0,57 %               | 31,64 %                  |
| RME_20Wo | 74,46 %                   | 0,45 %               | 25,09 %                  |
| RME_12Wo | 71,43 %                   | 0,43 %               | 28,14 %                  |
| RME_8Wo  | 69,61 %                   | 0,42 %               | 29,97 %                  |

In Anbetracht der Gesamtkosten für die KSS-Alternativen ist die Überprüfung einer Anwendung von Minimalmengenschmierung bzw. Trockenbearbeitung für KSS-Anwender zu empfehlen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel der Studie war es, die Aufwendungen an Material, Energie, Wasser und die Inanspruchnahme des Flächenverbrauchs über den Lebensweg des KSS zu quantifizieren, die Verwendung von versorgungskritischen Rohstoffen aufzuzeigen, das Treibhausgaspotenzial in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten abzuschätzen und die relevanten Kosten für verschiedene Grundölvarianten zu kalkulieren. Dazu wurden die wassermischbaren Kühlschmierstoffe Solvent-Raffinat mit einer Standzeit von 20 Wochen und Rapsmethylester mit unterschiedlichen Standzeiten von 20 Wochen, zwölf Wochen und acht Wochen in einem zuvor festgelegten Betrachtungssystem (Fräsoperation mit KSS-Kreislaufführung zur Fertigung von jährlich 13.000 Bauteilen aus Stahl (Kapitel 4) gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchung werden in Tabelle 13 zusammengefasst und in ein Skalensystem mit „++“ als bestem sowie „-“ als schlechtestem Indikatorwert eingeteilt. Unter Verwendung der Zwischenstufen „+“, „0“ und „-“ wird die relative Performance der Alternativen in dem Skalensystem zwischen dem besten und dem schlechtesten Indikatorwert ausgedrückt.

**Tabelle 13: Gesamtvergleich der Kriterien für die Grundölvarianten, bezogen auf die funktionelle Einheit**

| Indikator                    | Solvent Raffinat | Rapsmethylester mit Standzeit |           |          |
|------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------|----------|
|                              |                  | 20 Wochen                     | 12 Wochen | 8 Wochen |
| Kumulierter Energieaufwand   | 0                | ++                            | 0         | --       |
| Kumulierter Rohstoffaufwand  | ++               | +                             | -         | --       |
| Wasserverbrauch              | ++               | ++                            | +         | 0        |
| Flächeninanspruchnahme       | ++               | 0                             | -         | --       |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente | 0                | ++                            | 0         | --       |
| Gesamtkosten                 | ++               | +                             | -         | --       |

Die Ergebnisse zeigen für alle Kriterien eine deutliche Zunahme der Aufwendungen, des Verbrauchs, der Emissionen als auch der Kosten bei sinkender Standzeit der KSS-Emulsion auf Rapsmethylester-Basis. Innerhalb des betrachteten Anwendungsfalls ist von einem Einsatz des Rapsmethylesters als

Grundöl bereits bei einer Standzeit von weniger als 20 Wochen abzuraten. Aus einer reduzierten Standzeit von acht Wochen der Rapsmethylester-Variante resultieren die höchsten Aufwände an Rohstoffen, Energie und Wasser sowie die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen und die größte notwendige Nutzfläche. Somit ist nur die Performance zwischen dem Einsatz der Grundölalternative Solvent-Raffinat und dem Rapsmethylester mit einer Standzeit der KSS-Emulsion von jeweils 20 Wochen genauer zu betrachten.

Aus ökologischer Sicht sprechen die Ergebnisse nicht eindeutig für oder gegen den Einsatz einer der beiden Varianten. Während der Einsatz des Rapsmethylesters einen geringeren Energieaufwand über den gesamten Lebensweg verursacht, benötigt die Verwendung des Solvent-Raffinats einen geringeren Rohstoffaufwand. Die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Solvent-Raffinat verbrauchen und nutzen zudem kaum Wasser und Fläche, wohingegen der Parameter Fläche für den Rapsmethylester stärker beansprucht wird. Die Emissionen wiederum, angegeben als CO<sub>2</sub>-Äquivalente, die über den gesamten Lebensweg ausgestoßen werden, verursachen eine um 30 % höhere Umweltbelastung durch den Einsatz des Solvent-Raffinats.

Die Ergebnisse der Evaluierung der Rohstoffkritikalität des fossil organischen Rohstoffs Erdöl und des biotischen Rohstoffs Raps (Rapssamen bzw. Rapsöl) zeichnen ein eindeutigeres Bild. Für Erdöl wird die Abhängigkeit von internationalen Märkten als kritisch eingeschätzt, was sich durch eine hohe Preisvolatilität, eine steigende Nachfrage und ein höheres politisches Länderrisiko begründet. Für Raps zeigt das Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion kritische Werte, wird aber als nachwachsender Rohstoff insgesamt weniger kritisch beurteilt als Erdöl.

Aus ökonomischer Sicht ist für den betrachteten Anwendungsfall der Einsatz von Solvent-Raffinat zu empfehlen, da der Beschaffungspreis, der bei beiden Varianten den größten Anteil an den betrachteten Gesamtkosten ausmacht (über 68 %), um mehr als ein Drittel günstiger ist als der des Rapsmethylesters. Hier ist jedoch nur eine Momentaufnahme möglich, die Zuliefererverträge, Mengenrabatte und spezifische Preise für Spezialprodukte nicht mit abbildet. Die Preise für den Rapsmethylester als auch für das Solvent-Raffinat können stark schwanken. Unter geänderten Gegebenheiten, wie bspw.

einer anderen Produktauswahl, kann sich das Ergebnis zu Gunsten des biologischen wassermischbaren KSS ändern. Der KSS-Anwender sollte im Falle einer Kaufentscheidung die ausgewiesenen Standzeiten des KSS prüfen, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die ökonomische Bilanz ausüben.

## 6.2 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass neben der klassischen Anwendung mineralölbasierter KSS-Grundöle pflanzliche Grundöle (in Form von Rapsmethylester) bei gleicher Standzeit eine unter ökologischen Gesichtspunkten akzeptable Alternative darstellen.

In dieser Studie wurde ein typischer und häufig angewandter, aber dennoch selektiv spezifizierter Prozess ausgewählt. In der Praxis unterscheiden sich die Anforderungen an den Prozess je nach Prozesstyp, Bauteil, geforderter Präzision und Toleranz sowie danach, welche geforderten Eigenschaften, die der KSS erfüllen muss, konkret im Vordergrund stehen. Danach hat der Anwender stets situativ zu entscheiden, wie der KSS zu formulieren und zusammenzustellen ist. Je nach Anwendung und Anforderungsprofil können auch nichtwassermischbare KSS sowie auf viskosem Wasser basierende, mineralölfreie KSS in Frage kommen. Hierfür sind in der Regel langjährige Erfahrungen aus der Praxis erforderlich, um einen erfolgreichen Einsatz dieser Techniken für den jeweiligen spezifischen Anwendungsfall zu gewährleisten.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie kann KMUs der spanenden Metallbearbeitung grundsätzlich empfohlen werden, den Einsatz von KSS auf pflanzlicher Basis anstelle von mineralölbasierten KSS unter Umwelt- und Kostenaspekten zu prüfen. Gerade für kleine Unternehmen sind als weiterer Input die kompetente Betreuung und Erfahrung durch ihre Lieferanten, Formulierer, Händler und Verbände erforderlich.

---

## LITERATURVERZEICHNIS

**Baumann, W.; Herberg-Liedtke, B. (1996):** Chemikalien in der Metallbearbeitung: Daten und Fakten zum Umweltschutz. 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, ISBN 978-364264651-5.

**Bartz, W.; Möller, U. (2000):** Expert Praxislexikon Tribologie Plus, 2. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, ISBN 3-8169-0691-5.

**Behrendt, T.; Zein, A.; Min, S. (2012):** Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier B.V., Ausgabe 61, Heft 1, Seite 43 - 46.

**Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015a):** Umweltgerechter Einsatz von wassermischbaren Kühlschmierstoffen, KSS-Emulsionen und -Lösungen [online]. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.bubw.de/?lvl=3312>

**Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015b):** Gewindecneiden und Räumen [online]. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.bubw.de/?lvl=355>

**Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015c):** Spanende Bearbeitungsverfahren [online]. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.bubw.de/?lvl=352>

**Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015d):** Kühlschmierstoffe für die spanende und umformende Metallbearbeitung [online]. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.bubw.de/?lvl=531>

**Betrieblicher Umweltschutz in Baden-Württemberg (2015e):** Fräsen und Drehen [online]. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.bubw.de/?lvl=360>

**BP (2012):** Sicherheitsdatenblatt Solvent-Raffinat (46 ISO) [online]. BP Europa SE [abgerufen am: 18.05.2016], verfügbar unter: [http://msdspd.bp.com/ussds/amerdsf.nsf/0/5FD3FE6E3446AC80257A1700527B7A/\\$file/128529Solvent-Raffinat%20\(46%20ISO\).pdf](http://msdspd.bp.com/ussds/amerdsf.nsf/0/5FD3FE6E3446AC80257A1700527B7A/$file/128529Solvent-Raffinat%20(46%20ISO).pdf).

**Brinksmeier, E.; Meyer, D.; Huesmann-Cordes, A.G.; Herrmann, C. (2015):** Metalworking Fluids - Mechanisms and Performance. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier B.V., Ausgabe 64, Heft 2, Seite 605 - 628.

**Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrollen (2015):** Amtliche Mineralöl-daten - Entwicklung von Inlandsschmierstoffablieferungen 1995 - 2014 [online]. [abgerufen am: 21.11.2016], verfügbar unter: [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel\\_rohoel/ausgewaehlte\\_statistiken/index.html?fold=false](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/ausgewaehlte_statistiken/index.html?fold=false).

**Burghardt, B. (2015):** Biodieselmärkte kommen 2015 nicht in Schwung. AMI Themen Pflanzenbau/Analyse [online]. Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH (AMI), 07.05.2015 [abgerufen am: 02.02.2016], verfügbar unter: <http://www.ami-informiert.de/ami-themen/ami-themen/themen-singleansicht/article/biodieselmärkte-kommen-2015-nicht-in-schwung.html>.

**Carl Bechem GmbH (2015):** BECHEM Avantin Kühlschmierstoffe [online]. Carl Bechem GmbH, [abgerufen am: 28.02.2017], verfügbar unter: [http://www.bechem.de/index.php?eID=tx\\_naw-secured1&u=0&g=0&t=1488362937&hash=fcb550c0e1769e9c6a077ee53cd8e5c6c567a99&file=/fileadmin/pdf/BECHEM\\_Avantin\\_2015\\_de.pdf](http://www.bechem.de/index.php?eID=tx_naw-secured1&u=0&g=0&t=1488362937&hash=fcb550c0e1769e9c6a077ee53cd8e5c6c567a99&file=/fileadmin/pdf/BECHEM_Avantin_2015_de.pdf)

**C.A.R.M.E.N. e.V.(2016):** Preisentwicklung Rapsöl als Kraftstoff [online]. Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N.) e.V. [abgerufen am: 06.05.2016], verfügbar unter: [www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/pflanzenoel](http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/pflanzenoel).

**Cuevas, P. (2010):** Comparative life cycle assessment of biolubricants and mineral based lubricants [online]. Masterarbeit University of Pittsburgh, Pittsburgh, [abgerufen am: 23.03.2016], verfügbar unter: <http://d-scholarship.pitt.edu/6829/1/Cuevas-4-7-2010.pdf>.

**Dettmer, T. (2006):** Nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Vulkan Verlag, Essen, ISBN 978-3802786945.



**Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (2011):** Regel Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen [online]. BGR/GUV-R 143. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Berlin, Ausgabe Mai 2009, aktualisierte Fassung März 2011, [abgerufen am: 25.04.2016], verfügbar unter: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/r-143.pdf>

**DIN 8589-0:2003-09:** Deutsches Institut für Normung e. V., Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**DIN 51521:1999-03:** Deutsches Institut für Normung e. V., Kühlschmierstoffe - Wassermischbare Kühlschmierstoffe SE - Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**DIN CEN/TR 16227 (DIN SPEC 51523):2011-10:** Deutsches Institut für Normung e. V., Flüssige Mineralöl-Erzeugnisse - Bio-Schmierstoffe - Empfehlungen für die Terminologie und Charakterisierung von Bio-Schmierstoffen und bio-basierten Schmierstoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

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

**Dopatka, J.; Obst, M.; Siegfried, F. (1993):** Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren. Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg, Stuttgart.

**Ecoinvent 3.2 (2015):** International Life Cycle Inventory Database, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

**Effizienz-Agentur NRW (2008):** Erfolgsstoff - Nachwachsende Rohstoffe in Produktion und Produkten [online]. Effizienz-Agentur NRW, [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: [http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/praxis\\_info/pdf/0804\\_EFA\\_Erfolgsstoff.pdf](http://www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/praxis_info/pdf/0804_EFA_Erfolgsstoff.pdf)

**Ekman, A.; Börjesson, P. (2011):** Life cycle assessment of mineral oil-based and vegetable oil-based hydraulic fluids including comparison of biocatalytic and conventional production methods. The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer-Verlag, Ausgabe 16, Heft 4, Seite 297 - 305.

**Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012):** Technische Bioöle, Grundlagen - Produkte - Rahmenbedingungen [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., [abgerufen am: 18.05.2016], verfügbar unter: [https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/t/e/technische\\_bioeele\\_dina5\\_web.pdf](https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/t/e/technische_bioeele_dina5_web.pdf).

**Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013):** Jahresbericht 2012/2013 [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., [abgerufen am: 03.05.2016], verfügbar unter: [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/j/a/jahresbericht\\_2012-13\\_web.pdf](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/j/a/jahresbericht_2012-13_web.pdf).

**Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a):** Bioschmierstoff-Kongress. Gülzower Fachgespräche, Gülzow-Prüzen, Band 50, ISBN 978-3-942147-26-2.

**Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014b):** Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow-Prüzen, Ausgabe 34, ISBN 978-3942147187.

**Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016):** Bioschmierstoff-Ta-gung 2016 [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., [abgerufen am: 20.09. 2016], verfügbar unter: <https://veranstaltungen.fnr.de/bioschmierstoff-tagung-2016/>

**FAOSTAT (2013):** Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database [online]. FAOSTAT, [abgerufen am: 25.4.2016], verfügbar unter: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>, auch verfügbar unter: [http://faostat3.fao.org/browse/rankings/countries\\_by\\_commodity/E](http://faostat3.fao.org/browse/rankings/countries_by_commodity/E).

**Fehrenbach, H. (2005):** Ecological and energetic assessment of re-refining used oils to base oils: Substitution of primarily produced base oils including semi-synthetic compounds. Endbericht, im Auftrag des GEIR - Groupement Européen de l'industrie de la Régénération, Heidelberg.

**Fischer, P. (2010):** Verdampferanlagen senken Entsorgungskosten [online]. MM Maschinenmarkt 19/2010, S. 34-36 [abgerufen am: 06.05.2016], verfügbar unter: [http://www.antech-guetling.de/fileadmin/fachartikel-pdfs/02-Fachartikel-S034\\_MM0192010\\_p.pdf](http://www.antech-guetling.de/fileadmin/fachartikel-pdfs/02-Fachartikel-S034_MM0192010_p.pdf).

**Fischer, P.; Itasse, S. (2010):** Metallbearbeitungs-Abfälle: Verdampferanlagen senken Entsorgungskosten von Flüssigabfällen aus der Metallbearbeitung [online]. Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 5. Mai 2010 [abgerufen am: 06.05.2016], verfügbar unter: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/verdampferanlagen-senken-entsorgungskosten-von-fluessigabfaellen-aus-der-metallbearbeitung-a-263142/>.

**Fuchs Schmierstoffe GmbH (2013):** ECOCOOL - Wassermischbare Kühlschmierstoffe der neuen Generation [online]. [abgerufen am: 20.04.2016], Verfügbar unter: [https://www.fuchs-schmierstoffe.de/fileadmin/fuchs\\_upload/downloads/Industrieschmierstoffe\\_Projekte/2013/ECOCOOL\\_Prospekt\\_deutsch\\_05-2013.pdf](https://www.fuchs-schmierstoffe.de/fileadmin/fuchs_upload/downloads/Industrieschmierstoffe_Projekte/2013/ECOCOOL_Prospekt_deutsch_05-2013.pdf)

**Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C. und Reinhardt, J. (2012):** Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion [online]. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 01/2012, [abgerufen am: 03.05.2016], verfügbar unter: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4237.html>, auch verfügbar als PDF unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf>

**Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J. und van Zelm, R. (2013):** A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, Report I: Characterisation. Ministerie van VROM, Den Haag.

**Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Menges, V.; Näher, F.; Oesterle, S.; Scholer, S.; Stephan, A.; Wieneke, F. (2014):** Tabellenbuch Metall. 46. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, ISBN 978-3808517260.

**Giunée, J. B. (Ed.) (2002):** Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

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

**Hessen-Biotech (2016):** Bioökonomie in Hessen – Nachhaltiges Wirtschaften mit Bioschmierstoffen [online]. Hessen Trade & Invest GmbH [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <https://www.hessen-biotech.de/dynasite.cfm?dsmid=13862&newsid=24866&skipfurl=1>

**index mundi (2016):** Rapsöl monatlicher Preis – Euro pro Tonne [online]. index mundi [abgerufen am: 06.05.2016], verfügbar unter: [www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=rapsol&wahrung=eur](http://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise/?ware=rapsol&wahrung=eur)

**IPCC (2007):** Intergovernmental Panel on Climate Change [online]. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Working Group I: The Physical Science Basis. [abgerufen am: 25.04.2016], verfügbar unter: [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/errataserrata-errata.html#table214](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/errataserrata-errata.html#table214)

**Japanese Industrial Standards Committee (2010):** Machine tools – Test methods for electric power consumption, Part 1: Machining Centres (TS B 0024-1:2010).

**Kassack, J.F. (1994):** Einfluss von Kühlschmierstoff-Additiven auf Werkzeugverschleiß, Zerspankraft und Bauteilqualität. Eigenverlag, Aachen.

**Kaufmann, D.; Kraay, A. und Mastruzzi, M. (2010):** The Worldwide Governance Indicators: Methodology and Analytical Issues. World Bank Policy Research Working Paper No. 5430, ([http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1682130](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1682130)). [abgerufen am: 25.4.2016], verfügbar unter: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=worldwide-governance-indicators#>

**Kiechle, A. (1996):** Kostenanalyse beim Einsatz von Kühlschmierstoffen. Beratungsgesellschaft für MINERALÖLANWENDUNGSTECHNIK mbH, Hamburg, ISSN 0341-1893.

**Klöpffer, W. und Grahl, B. (2009):** Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. WILEY-VCH-Verlag, Weinheim, ISBN 978-3-527-32043-1.

**Kolshorn, K.-U. und Fehrenbach, H. (2000):** Ökologische Bilanzierung von Altöl-Verwertungswegen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 297 92 382/01, im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 20/00, Umweltbundesamt, Berlin, Darmstadt, Heidelberg.

**Kosmol, J.; Kanthak, J.; Herrmann, F.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, N.; Gromke U. (2012):** Glossar zum Ressourcenschutz. Umweltbundesamt Dessau: Umweltbundesamt.

**Liedtke, S. (1999):** Schleifschlammmentölung und Qualitätskontrolle der zurückgewonnenen Kühlschmierstoffe. Dissertation Technische Universität Braunschweig.

**Madanchi, N.; Kurle, D.; Winter, M.; Thiede, S.; Herrmann, C. (2015):** Energy Efficient Process Chain: The Impact of Cutting Fluid Strategies. Proceedings of the 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Elsevier B.V., Sydney, Ausgabe 29, Seite 360 - 365.

**Mang, T. (1983):** Die Schmierung in der Metallbearbeitung. 1. Auflage, Vogel-Buchverlag, Würzburg, ISBN 978-3802306822.

**Mang, T.; Dresel, W. (2007):** Lubricants and Lubrication. 2. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 978-3527314973.

**Mayfran (2015):** Spänezentrifugen - Für die effektive Rückgewinnung von Kühlschmierstoffen und Ölen [online]. Prospekt, [abgerufen am: 20.04.2016], verfügbar unter: [http://www.mayfran.de/fileadmin/user\\_upload/brochures\\_de/12DE201502\\_Spaenezentrifugen.pdf](http://www.mayfran.de/fileadmin/user_upload/brochures_de/12DE201502_Spaenezentrifugen.pdf)

**McManus, M.; Hammond, G. und Burrows, C. (2004):** Life-Cycle Assessment of Mineral and Rapeseed Oil in Mobile Hydraulic Systems. Journal of Industrial Ecology, Ausgabe 7, Heft 3-4, Seite 163 - 177.

**Miller, S.; Landis, A; Theis, T.; Reich, R. (2007):** A Comparative Life Cycle Assessment of Petroleum and Soybean-Based Lubricants. Environmental Science & Technology, Ausgabe 41, Heft 11, Seite 4143 - 4149.

**Mortier, R. M.; Fox, M. F.; Orszulik, S. T. (2010):** Chemistry and Technology of Lubricants. 3. Auflage, Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, ISBN 978-402086618.

**Möller, U. J.; Nassar, J. (2013):** Schmierstoffe im Betrieb. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, Berlin, ISBN 978-364262620.

**Oemeta Chemische Werke GmbH (2016):** Hycut [online]. Oemeta Chemische Werke GmbH, [abgerufen am: 09.11.2016], verfügbar unter: <https://de.oemeta.com/produkte/hycut/>

**Rehbein, W. (2016):** Basisflüssigkeiten für Schmierstoffe [online]. oelheld GmbH, [abgerufen am: 09.11.2016], verfügbar unter: <http://www.oelheld.de/innovation/wissenschaftliche-berichte/basisfluessigkeiten-fuer-schmierstoffe.html>

**Riedel Schmierstoffe (2016):** Kühlschmierstoffe „green line“ [online]. Riedel GmbH, [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: [http://www.riedel-schmierstoffe.de/fileadmin/user\\_upload/pdf/katalog\\_green\\_line.pdf](http://www.riedel-schmierstoffe.de/fileadmin/user_upload/pdf/katalog_green_line.pdf)

**Schischke, K.; Hohwieler, E.; Feitscher, R.; König, J.; Kreuschner, S.; Wilpert, P.; Nissen, N. F. (2012):** Energy-Using Product Group Analysis - Lot 5, Machine tools and related machinery, Task 2 Report - Economic and Market Analysis, Berlin.

**Schröter, M.; Lerch, C.; Jäger, A. (2011):** Materialeffizienz in der Produktion: Einsparpotenziale und Verbreitung von Konzepten zur Materialeinsparung im Verarbeitenden Gewerbe [online]. Endberichterstattung an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Karlsruhe, [abgerufen am: 07.05.2016] verfügbar unter: [http://www.deutscher-rohstoffeffizienzpreis.de/DERA/DE/Downloads/frauenhofer\\_materialeffizienz\\_2014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.deutscher-rohstoffeffizienzpreis.de/DERA/DE/Downloads/frauenhofer_materialeffizienz_2014.pdf?__blob=publicationFile&v=3)

**statista (2016):** Industriestrompreise in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2015 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde) [online]. Das Statistik-Portal [abgerufen am: 06.05.2016], verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/>

**Statistisches Bundesamt (2013):** Umwelt Abfallentsorgung 2011 [online]. Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden, Seite 25, [abgerufen am: 16.11.2016], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/AlteAusgaben/AbfallentsorgungAlt.html>

**Statistisches Bundesamt (2014):** Umwelt Abfallentsorgung 2012 [online]. Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden, Seite 23,24, [abgerufen am: 16.11.2016], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/AlteAusgaben/AbfallentsorgungAlt.html>

**Statistisches Bundesamt (2015):** Umwelt Abfallentsorgung 2013 [online]. Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden, Seite 25, [abgerufen am: 16.11.2016], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/AlteAusgaben/AbfallentsorgungAlt.html>

**Statistisches Bundesamt (2016a):** Umwelt Abfallentsorgung 2014 [online]. Fachserie 19 Reihe 1, Wiesbaden, Seite 24, [abgerufen am: 16.11.2016], verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallbilanz.html>.

**Statistisches Bundesamt (2016b):** Produzierendes Gewerbe und Dienstleistungen im Überblick [online]. Statistisches Jahrbuch 2016, Nummer 20, Wiesbaden, Seite 503-532, [abgerufen am: 15.11.2016], verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/ProdGewerbeDienstleistung/en.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/ProdGewerbeDienstleistung/en.pdf?__blob=publicationFile).

**SysKem (2011):** Sicherheitsdatenblatt Rapsmethylester (techn.) [online]. SysKem Chemie GmbH [abgerufen am: 13.05.2016], verfügbar unter: [http://www.syskem.de/syskem\\_datenblaetter/sdb\\_190904.pdf](http://www.syskem.de/syskem_datenblaetter/sdb_190904.pdf).

**Vag, C.; Marby, A.; Kopp, M.; Furberg, L.; Norrby, T. (2002):** A Comparative Life Cycle Assessment of the Manufacture of Base Fluids for Lubricants. Journal of Synthetic Lubrication, Ausgabe 19, Heft 1, Seite 39 - 57.

**VDI 3397 Blatt 2:2014-06:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Pflege von Kühlschmierstoffen für spanende und umformende Fertigungsverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**VDI 3397 Blatt 3:2008-03:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Entsorgung von Kühlschmierstoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

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

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

**VDI 4800 Blatt 2:2016-03:** Entwurf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**Verband Schmierstoff-Industrie e. V. (2016a):** KSS-Kosten [online]. Verband Schmierstoff-Industrie e.V., [abgerufen am: 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.vsi-schmierstoffe.de/schmierstoffe/technische-information/kuehlschmierstoffe.html>.

**Verband Schmierstoff-Industrie e. V. (2016b):** Grundöle [online]. Verband Schmierstoff-Industrie e.V., [abgerufen am 20.09.2016], verfügbar unter: <http://www.vsi-schmierstoffe.de/schmierstoffe/technische-information/grundoele.html>

**Wascut Industrieöle GmbH (2001):** Entwicklung von umweltverträglichen Emulsionen mit dem Produktnamen 'Biowas EP' für die Metallzer-spanung [online]. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, [abgerufen am: 14.11.2016], verfügbar unter: [https://www.dbu.de/projekt\\_11986/01\\_db\\_2409.html](https://www.dbu.de/projekt_11986/01_db_2409.html)

**Weinert, K.; Schmidt, J.; Klocke, F.; Holland-Letz, K.; Würz, T. (2002):** Technologienetz Trockenbearbeitung. Eigenverlag, Karlsruhe, ISSN 1610-8213.

**Westermann, H.-H.; Kafara, M.; Steinhilper, R. (2015):** Development of a Reference Part for the evaluation of energy efficiency in milling operations. Procedia CIRP, Ausgabe 26, Seite 521 - 526.

**Winter, M.; Öhlschläger, G.; Dettmer, T.; Ibbotson, S.; Kara, S.; Herrmann, C. (2012):** Using jatropha oil based metalworking fluids in machining processes: A functional and ecological life cycle evaluation. Proceedings of the 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Springer-Verlag, Berkeley, USA, Seite 311 - 316.

**ZfK (2012):** Industrie-Wasserpreise stabil [online]. Zeitung für kommunale Wirtschaft (ZfK), 7. August 2012, [abgerufen am: 13.05.2016], verfügbar unter: <https://www.zfk.de/wasser/wasser/artikel/industrie-wasserpreise-stabil.html>



## ANHANG A

Tabelle 14: Abfallmengen wassergemischter und nichtwassermischbarer KSS<sup>121</sup>

| AVV-Nr.                                   | Beschreibung  | 2011             | 2012             | 2013             | 2014             |
|---|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Nichtwassermischbare KSS in Tonnen</b> |   |                  |                  |                  |                  |
| 120106*                                   | halogenhaltige Bearbeitungsöle auf Mineralölbasis (außer Emulsionen und Lösungen) | 200 t            | 200 t            | 200 t            | 300 t            |
| 120107*                                   | halogenfreie Bearbeitungsöle auf Mineralölbasis (außer Emulsionen und Lösungen)   | 71.400 t         | 58.000 t         | 56.000 t         | 55.700 t         |
| 120110*                                   | synthetische Bearbeitungsöle  | 1.100 t          | 800 t            | 800 t            | 800 t            |
| 120119*                                   | biologisch leicht abbaubare Bearbeitungsöle                                       | 0 t              | 0 t              | 0 t              | 0 t              |
| Summe nichtwassermischbare KSS            |   | 72.700 t         | 59.000 t         | 57.000 t         | 56.800 t         |
| <b>Wassergemischte KS in Tonnen</b>       |   |                  |                  |                  |                  |
| 120108*                                   | halogenhaltige Bearbeitungs-emulsionen und -lösungen                              | 300 t            | 300 t            | 400 t            | 700 t            |
| 120109*                                   | halogenfreie Bearbeitungs-emulsionen und -lösungen                                | 644.700 t        | 672.300 t        | 721.700 t        | 733.500 t        |
| Summe wassergemischte KSS                 |   | 645.000 t        | 672.600 t        | 722.100 t        | 734.200 t        |
| <b>Summe gesamt</b>                       |   | <b>717.700 t</b> | <b>731.600 t</b> | <b>779.100 t</b> | <b>791.000 t</b> |
| <b>% nichtwassermischbare KSS</b>         |   | <b>10,1%</b>     | <b>8,1%</b>      | <b>7,3%</b>      | <b>7,2%</b>      |
| <b>% wassergemischte KSS</b>              |   | <b>89,9%</b>     | <b>91,9%</b>     | <b>92,7%</b>     | <b>92,8%</b>     |

Tabelle 15: Inlandsablieferungen von wassermischbaren (wmb) KSS und nichtwassermischbaren (nwmb) KSS (2004-2015)<sup>122</sup>

|            | 2015   | 2014   | 2013   | 2012   | 2011   | 2010   |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| wmb KSS    | 21.099 | 17.025 | 17.597 | 18.920 | 20.208 | 27.548 |
| nwmb KSS   | 28.779 | 27.365 | 27.238 | 26.945 | 25.494 | 42.148 |
| Summe      | 49.878 | 44.390 | 44.835 | 45.865 | 45.702 | 69.696 |
| % wmb KSS  | 42%    | 38%    | 39%    | 41%    | 44%    | 40%    |
| % nwmb KSS | 58%    | 62%    | 61%    | 59%    | 56%    | 60%    |
|            | 2009   | 2008   | 2007   | 2006   | 2005   | 2004   |
| wmb KSS    | 17.250 | 27.407 | 30.776 | 29.482 | 30.607 | 27.010 |
| nwmb KSS   | 24.779 | 38.370 | 41.532 | 38.339 | 45.094 | 46.846 |
| Summe      | 42.029 | 65.777 | 72.308 | 67.821 | 75.701 | 73.856 |
| % wmb KSS  | 41%    | 42%    | 43%    | 43%    | 40%    | 37%    |
| % nwmb KSS | 59%    | 58%    | 57%    | 57%    | 60%    | 63%    |

## ANHANG B

Tabelle 16: Interviews zu Grundöialternativen für KSS-Emulsionen I

| Frage   | Antwort   | Interviewart und Datum                             |
|---|---|--|
| Befragung von KSS-Herstellern, KSS-Formulierern, Verbänden und Behörden   |   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Werden pflanzliche oder tierische Öle und Stoffe als Alternativen zum Mineralöl für KSS-Grundöle eingesetzt?</li> <li>• Wenn ja, welche sind diese?</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pflanzliche oder tierische Öle und Stoffe werden wenn, dann in synthetischer Form eingesetzt, z. B. als Rapsmethylester. Diese Öle und Stoffe werden häufiger als Additive in kleineren Mengen verwendet.</li> <li>• Als tierische Ausgangsstoffe kommen überwiegend veresterte Talgfettsäuren oder Lardöl zum Einsatz.</li> </ul>   | telefonisch, Februar 2016                          |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Einsatz von Rapsmethylester überwiegt in Deutschland. Raps kann aber auch von synthetischen Estern aus Palm- oder Kokosnussöl substituiert werden.</li> <li>• Synthetische Öle auf Basis von Palmölen werden aber überwiegend als Additiv eingesetzt. Als Grundöl sind sie zu teuer und zu wertvoll.</li> <li>• Tierfett und auch Altspesiefett als Grundöl genießen tendenziell bei Anwendern keine Akzeptanz.</li> </ul>   | telefonisch, Februar 2016                          |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Einsatz von tierischen Ölen und Stoffen ist eher rückläufig aufgrund der BSE-Krise und religiösen Einschränkungen, da eine 'koschere' oder 'Halal'-Zertifizierung von KSS vergleichsweise zu aufwendig ist.</li> <li>• Bei den pflanzlichen Ölen überwiegt der Einsatz von Rapsmethylester, wobei diese häufig zu einem kleineren Anteil in die Formulierung eingehen.</li> </ul>  | telefonisch, Februar 2016                          |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptsächlich wird Mineralöl verwendet. Pflanzliche und tierische Grundöle haben bisher kaum einen Einfluss.</li> </ul>  | telefonisch, Februar 2016                          |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei der zu treffenden Auswahl der Alternativen spricht für den rapsöl-basierten Ester versus Palmöl-basierten, dass Rapsöl von der Zukunftsperspektive aus mehreren Gründen vorzuziehen ist. Rapsöl wird überwiegend in Deutschland und der EU angebaut; es stehen auch in der EU noch bisher brachliegende Flächen zur Verfügung. Hauptanbauggebiete für Palmöl sind dagegen Indonesien und Malaysia sowie Südamerika und Afrika. Zum einen ist eine weitere Verwendung von Palmöl vor dem Hintergrund der Abholzung des tropischen Regenwaldes bedenklich, zum anderen macht sich Deutschland bei der Rohstoffbeschaffung somit weiter vom Import abhängig. Rapsölanbau hätte dagegen u. a. auch eine Stärkung der regionalen Wirtschaft zur Folge.</li> </ul> | E-Mail, anschließend telefonisch, 05.02./10.2.2016 |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pflanzliche und tierische Fette (unverestert) sind ungeeignet (schlechter emulgierbar, biologisch abbaubar, neigen zu Ablagerungen und Verklebungen, sind mit Dichtungen und Beschichtungen oft inkompatibel usw.)</li> </ul>  | E-Mail, 04.02./05.02.2016                          |

Tabelle 17: Interviews zu Grundölalternativen für KSS-Emulsionen II

| Frage  | Antwort  | Interviewart und Datum                              |
|--|--|---|
| Befragung von KSS-Herstellern, KSS-Formulierern, Verbänden und Behörden  |  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sind PAOs für die Verwendung in wmb KSS geeignet?</li> <li>• Wie hoch ist deren praxisrelevante Bedeutung?</li> <li>• Für welche speziellen Anwendungen werden sie bevorzugt verwendet und ggf. in welchen Mengen?</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PAO machen die ohnehin bereits teureren wmb KSS noch teurer.</li> <li>• Lösungsverhalten ist zu schlecht.</li> <li>• Verwendung wird als kaum vorhanden eingeschätzt.</li> </ul>  | telefonisch, 01.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PAO werden aufgrund ihres Preises nur bei MMS eingesetzt; es sind Additive notwendig, um sie wmb zu machen; keine wmb KSS im eigenen Portfolio auf PAO-Basis; Verwendung von Polyglykol.</li> </ul>   | telefonisch, 04.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PAO werden in wmb KSS verwendet, teilweise bis zu anteilig 50 %, abhängig von Anforderungen des Anwenders: wenn viel Kraft benötigt wird, bei langen und hohen Standzeiten, besonders in der Schleifindustrie.</li> </ul>   | telefonisch, 01.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• KSS auf PAO-Basis werden maximal für Spezialanwendungen in kleinen Tonnagen, z. B. Schleifanwendungen, verwendet; KSS auf Mineralölbasis eignen sich besser aufgrund ihrer Polarität und ihres Preises; für die eigenen wmb KSS wird kein PAO eingesetzt.</li> </ul>  | telefonisch, 04.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PAO ist so teuer, dass die Rohstoffkosten zu hoch wären; Formulierer hat noch keine wmb KSS auf PAO-Basis hergestellt; dies hat zwar positive Eigenschaften (u. a. biologische Abbaubarkeit), es wird aber gegen den Preis gespielt. Es gibt durchaus Anwendung von PAO in Schmierfetten und Ölsätzen, sie hat im Spanbereich aber kaum eine Bedeutung.</li> </ul>                | telefonisch, 04.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fa. Castrol bietet seit 2012 wmb KSS auf PAO-Basis an (Castrol Syntilo 75 EF), der für das Schleifen, Drehen und Fräsen geeignet ist</li> </ul>   | E-Mail, anschließend telefonisch, 17.05./19.05.2016 |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• GTL base oils werden ausgetestet; PAO ist als Grundöl zu teuer. Auf Produktionsseite und auch bei Spezialanwendungen ist eine rückläufige Entwicklung zu erkennen.</li> </ul>   | telefonisch, 01.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PAO findet in ihren wmb KSS keine Verwendung; nur in nwm KSS wie Schmierölen. Besondere Eigenschaften von PAO wie z. B. Thermostabilität und Viskositätsindex spielen in wmb KSS keine Rolle, da diese Eigenschaften über das Wasser erreicht werden; bei Spezialanwendung, bei denen z. B. Verdunstung an der Bearbeitungsstelle auftritt, kann PAO von Vorteil sein.</li> </ul> | telefonisch, 04.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PAO wird bei ihren KSS nur für nwm KSS verwendet, aber nicht für wmb; PAO haben positive Eigenschaften wie besseres Luftabscheidevermögen und höheren Viskositätsindex von 10 - 30 Ns/m<sup>2</sup>, aber einen zu teuren Produktpreis.</li> </ul>  | telefonisch, 04.07.2016                             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Die positiven Eigenschaften von PAO kommen bei der Verwendung als Grundöl in wmb KSS durch die starke Verdünnung nicht zur Geltung; dafür sind sie zu teuer</li> </ul>  | telefonisch, 04.07.2016                             |

Tabelle 18: Interviews zu Preisen für Grundöle und Grundölkomponenten

| Frage   | Antwort  | Interviewart und Datum                                       |
|---|--|--|
| Befragung von KSS-Herstellern, KSS-Formulierern, Verbänden und Behörden   |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Wie hoch liegen die Preise (Datenquellen) für Grundölkomponenten?</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aktuelle Tagespreise für naphthenbasisches Mineralöl im Einkauf liegen um die 95 Cent/kg.</li> <li>PAOs werden nicht für wmb KSS eingesetzt, da sie teurer als normale Mineralöle sind und seiner Ansicht nach keine Vorteile in wmb KSS bringen. Genauere Preisangaben für PAOs konnte er nicht nennen.</li> <li>Hersteller benutzt kein RME wegen mangelnder Wasserbeständigkeit, jedoch ein anderes umesterifiziertes Rapsöl, das ca. 2 €/l kostet.</li> </ul> | E-Mail-Kontaktformular und Mailwechsel/<br>10.05./11.05.2016 |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Für derart spezielle Erdöl-Zwischenprodukte sind keine Preise oder Preisindizes bekannt.</li> </ul>   | telefonisch,<br>09.05.2016                                   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Folgende Plausibilitätsüberlegung: Bei handelsüblichen Hydraulikölen, die auch als Multifunktionsöle unterschiedliche Verwendungen finden, liegt der kg-Preis im Durchschnitt bei ca. 1,00 €. Dieses Fertigprodukt besteht zu 95 - 99 % aus einem Mineralölschnitt als Grundöl, der vergleichbar dem des Solvent-Raffinats ist</li> </ul>   | E-Mail,<br>anschließend telefonisch,<br>04.05./17.05.2016    |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Für derartige Erdöl-Zwischenprodukte sind keine Preise oder Preisindizes bekannt.</li> </ul>  | telefonisch,<br>09.05.2016                                   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Für derartige Erdöl-Zwischenprodukte sind keine Preise oder Preisindizes bekannt.</li> </ul>  | E-Mail, anschließend telefonisch,<br>04.05.2016              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Wie hoch liegen die Preise für RME-Grundölkomponenten?</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Da es keinen Grund gibt, dass sich der Preis für RME auf dem Biokraftstoffmarkt (Hauptanwendung) von dem auf den kleinen Nischenmärkten außerhalb der Verwendung als Biodiesel unterscheidet, da das Produkt für beide Anwendungen dieselben zertifizierten Eigenschaften erfüllen muss, kann davon ausgegangen werden, dass 0,70 €/l (Quelle: Burghardt 2015) auch der durchschnittliche Preis sind, den KSS-Formulierer für RME als Grundöl zahlen.</li> </ul>  | telefonisch,<br>anschließend E-Mail,<br>18.05./19.05.2016    |



VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30-2759506-0  
Fax +49 30-2759506-30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE  
**KLIMASCHUTZ**  
INITIATIVE