

Leistungsbewertung von wassermischbaren Kühlschmierstoffen durch Triboteste und reale Bearbeitungsprozesse

Dipl.-Ing. Stefan Joksch
Oemeta Chemische Werke GmbH, Uetersen
joksch@oemeta.com

1. Einleitung

Moderne Hochleistungskühlschmierstoffe (KSS) sind ein unverzichtbares Werkzeug für eine kosteneffektive, prozesssichere Produktion in der metallbearbeitenden Industrie.

Wassermischbare Kühlschmierstoffe müssen eine Reihe von Anforderungen erfüllen, wie z.B. Reibungsverringerung, Wärmetransport, Spantransport, Korrosionsschutz, eine lange Lebensdauer u.v.m.

Das wichtigste Leistungskriterium für Hochleistungs-KSS ist das Vermögen, Werkzeugverschleiß zu verringern und eine ausreichend gute Oberflächengüte der bearbeitenden Werkstücke sicherzustellen.

Geringer Werkzeugverschleiß und sicheres Einhalten der Qualitätsanforderungen an die gefertigten Bauteile sind also die wesentlichen Merkmale einer möglichst optimalen Anwendung von wassermischbaren Kühlschmierstoffen. Die Werkzeugkosten beeinflussen in hohem Maße, neben anderen KSS-spezifischen Faktoren, die Fertigungskosten pro Werkstück. So kann der Einsatz eines qualitativ höherwertigen, im Einkauf teureren KSS, durchaus einen starken positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Fertigungsprozesses ausüben (Bild 1).

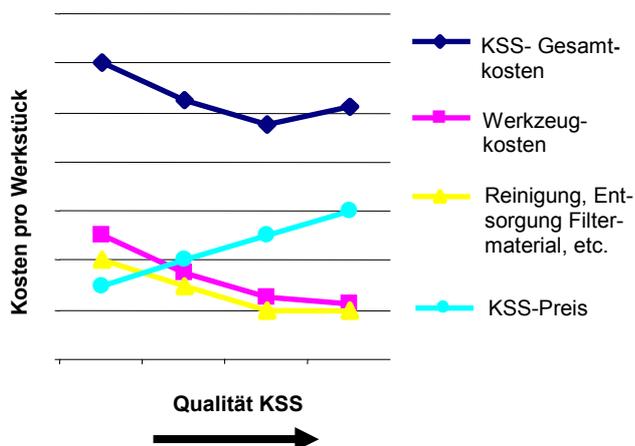


Bild 1: Wirtschaftlichkeitsfaktoren KSS

In Zeiten eines globalen Wettbewerbs muss jedes Potential zur sinnvollen Kostensenkung ausgeschöpft werden, um auf Dauer wettbewerbsfähig zu bleiben. D.h. für die Anwender von wassermischbaren Kühlschmierstoffen muss sich die Beurteilung, der im Markt erhältlichen Produkte verschieben, von einer "Prozessfähigkeitsbetrachtung" hin zu einer technisch, wirtschaftlichen Potentialanalyse. Dabei wird zunehmend nicht nur ein Prozess, sondern die gesamte Prozesskette mit Wechselwirkungen und Quereinflüssen zu betrachten sein. Für den Entwickler und Hersteller von KSS stellt sich nun die Aufgabe Produkte zu entwickeln, die es ermöglichen Kostensenkungspotentiale zu erschließen.

Zu diesem Zweck werden Prüfverfahren benötigt, die eine grundsätzliche Aussage über die tribologische Leistungsfähigkeit von KSS-Formulierungen generieren. Gäbe es Labor-Prüfverfahren deren Ergebnisse sich mit einigermaßen hoher Sicherheit auf reale Bearbeitungsprozesse übertragen lassen, wäre eine deutliche Effektivitätssteigerung bei der Entwicklung neuer KSS-Rezepturen möglich. Auch bei der Vermarktung von KSS könnte ein geeignetes Prüfraster hilfreich sein. Im Auswahlprozess für Prozessstoffe ist immer seltener die Möglichkeit vorhanden, nach dem "trial and error-Verfahren" vorzugehen. Zum einen stehen kaum noch Zeit bzw. Freiraum zur Verfügung, um bestehende Prozesse weiter zu optimieren. Auf der anderen Seite muss, bevor in einer funktionierenden Prozesskette ein Glied verändert wird, eine Risiko-/Nutzen-Analyse durchgeführt werden. Die Risikoanalyse kann unter Umständen einen sehr großen Aufwand bedeuten. Innerhalb dieses Projektes musste, vor Durchführung der Feldversuche bei einem Automobilhersteller, eine Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse (FMEA) durchgeführt werden. Bei dieser Risikoanalysenmethode werden alle Fehlermöglichkeiten und deren Einflüsse entlang der Fertigungskette bis hin zum Fertigprodukt betrachtet, ein entsprechend zeit- und arbeitsintensiver Vorgang.

Neben den Eckdaten für eine, wie auch immer geartete, Risikoanalyse muss von Beginn an der Nutzen durch die Verwendung eines neuen Kühlschmierstoffes zumindest grob quantifizierbar sein.

Nur dann ist es für den Anwender interessant sich mit dem Einsatz

eines neuen Produktes auseinander zu setzen. Ein Verfahren zur Verdeutlichung, welches Potential ein KSS hinsichtlich der Reduzierung der Werkzeugkosten hat, könnte also sehr wertvolle Verkaufsargumente liefern.

Die Hauptschwierigkeit bei der Ermittlung geeigneter Prüfmethode oder eines Prüfrasters ist die Vielzahl unterschiedlicher Metallbearbeitungsprozesse. In Anbetracht der zigtausend unterschiedlichen tribologischen Beanspruchungskollektive, bei denen zumeist nicht einmal alle relevanten Randparameter bekannt sind (z.B. p, T an der Wirkstelle), erscheint der Versuch, ein universelles Prüfverfahren zu etablieren, von vornherein zum Scheitern verurteilt zu sein. In der Tat wird auch zukünftig nur der relative Leistungsvergleich bei den Kühlschmierstoffen möglich sein. Eine allgemein gültige, reproduzierbare Leistungskennzahl wird sich nicht ermitteln lassen.

Sicherlich ist es aber möglich durch geschickte Kombination verschiedener neuer und traditioneller Prüfverfahren dem Kühlschmierstoffentwickler und -Anwendungstechniker das Leben etwas leicht zu machen.

2. Stand der Technik

Der Schlüssel für die Effizienzsteigerung bei der Entwicklung von Hochleistungs-KSS ist sicherlich das Verständnis der tribochemischen und tribophysikalischen Vorgänge zwischen Werkstück und Werkzeug und ihr Einfluss auf den Bearbeitungsvorgang.

In den letzten 50 Jahren wurde eine Reihe von Studien zum o. g. Thema durchgeführt. Bis in die 90er Jahre des letzten Jahrhunderts handelte es sich allerdings ausschließlich um theoretische Arbeiten, da die Messtechnik für den Nachweis der dünnen Reaktionsschichten der Schmierleistungsadditive auf der Metalloberfläche bis dato nicht zur Verfügung stand.

Die resultierenden Theorien für die Absorption und Reaktion von Additiven sind hinlänglich bekannt und haben für zwei Generationen von Chemikern das Grundlagenwissen für die Entwicklung und Optimierung von Hochleistungs-KSS dargestellt (Bilder 2 + 3).

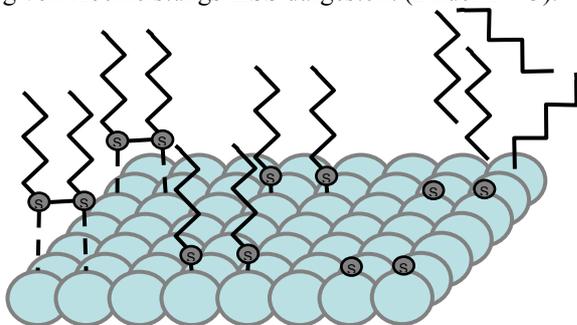


Bild 2: Theorie zur Wirkung von Additiven auf Metalloberflächen Beispiel Schwefelträger [1]

Polare Substanzen mit hoher Affinität zur Metalloberfläche können als Schmierleistungsträger benutzt werden. Durch Physisorption, Chemisorption und Reaktion werden druckaufnahmefähige Schichten gebildet. Welcher Prozess stattfindet ergibt sich aus der Art des Schmierleistungsadditivs, seiner Verfügbarkeit an der Metalloberfläche und der zur Verfügung stehenden Aktivierungsenergie.

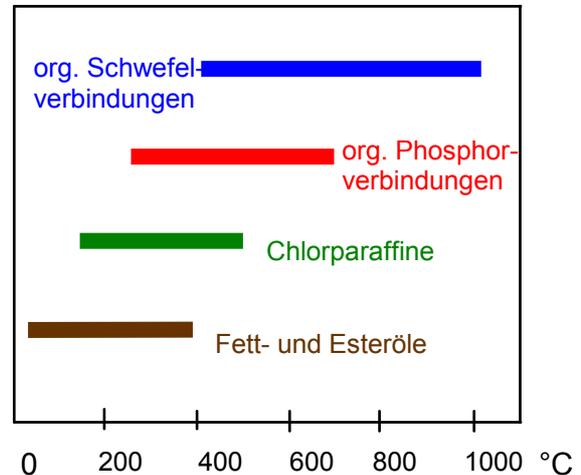


Bild 3: Temperaturbereiche der Wirksamkeit von Schmierleistungsadditiven

Erst 1994 gelang Tönshoff und Roethel der Nachweis von Schwefel auf zerspannter Al-Oberfläche. 1996 standen Brinksmeier et al die Elektronenspektroskopie für die chemische Analyse (ESCA) zur Verfügung, mit der die Elementverteilung auf Metalloberflächen in Nanometerschichten bestimmbar ist. Mit ESCA wurden u. a. Schwefel Reaktions- und Sorptionsschichten auf Stahl nachgewiesen.

Durch diese experimentellen Arbeiten wurden die theoretischen Modelle zum großen Teil bestätigt und ein weitergehendes Verständnis der Vorgänge zwischen Werkzeug und Werkstück erreicht.

Die Bewertung der Zerspanungsleistung von KSS-Formulierungen ist in der Vergangenheit ebenfalls Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte gewesen. Anfang der 90er Jahre versuchten Hübner und Heck die Leistung von nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffen mittels einfacher und häufig verwendeter Prüfverfahren zu bewerten. Die ermittelten Ergebnisse wurden mit Daten aus der industriellen Anwendung und aus Zerspanungsversuchen an einem Drehautomat verglichen und validiert. Die Autoren kamen zu dem Schluss, "dass eine zuverlässige und umfassende Abschätzung der Zerspanungsleistung nur in der Praxis möglich ist."

Einzig der Falex Tapping Torque Tester war geeignet, brauchbare Hinweise auf die Leistung der geprüften KSS-Formulierungen zu liefern [2 + 3].

In 2005 wurde eine Arbeit von Rehbein und Emmer veröffentlicht, bei der die "Optimierung von Minimalmengenkühlschmierstoffen" für die Gewindefertigung in Aluminiumgusslegierungen im Vordergrund stand [4]. In dieser Studie wurden Messwerte einer realitätsnahen Kurzprüfmethode zum Gewindebohren bzw. -formen mit den Daten üblicher Laborprüfmethode verglichen. Auch hier wurde bei den klassischen Triboprüfverfahren wie Reichert, Brugger, VKA und Almen-Wieland eine nur sehr eingeschränkte Übertragbarkeit auf reale Bearbeitungsprozesse festgestellt. Der Prüfstand mit dem modellhaften Gewindebohr- / formprozess lieferte allerdings Daten mit hoher Praxisrelevanz. Geprüft wurden ausschließlich nichtwassermischbare Schmierstoffe.

Bis heute steht also kein einfaches Laborprüfverfahren zur Verfügung mit dem es möglich wäre umfassende, allgemein gültige Aussagen zur Zerspanungsleistung von Kühlschmierstoffen zu ermitteln.

Der Tapping Torque Test scheint noch das größte Potential zu besitzen, ist allerdings hinsichtlich Wiederholbarkeit und Aufwand sicherlich nicht 100% zufriedenstellend.

Es ist dem Autor keine Studie bekannt, bei der die Ergebnisse verschiedener tribologischer Prüfverfahren mit wassergemischten Kühlschmierstoffen miteinander und mit Daten aus der Praxis verglichen worden wären. Die wassermischbaren Kühlschmierstoffe sind in ihrer wirtschaftlichen Bedeutung höher einzuschätzen, als die nichtwassermischbaren. Das sich im Einsatz befindende Umlaufvolumen ist beim wassergemischten Kühlschmierstoff 10-20 mal so hoch wie beim nichtwassergemischten.

Es ist allerdings verständlich, dass Forschungsprojekte zum Thema Triboteste mit Metallbearbeitungsflüssigkeiten vorzugsweise mit Schneid- und Schleifölen durchgeführt werden. Die wassergemischten KSS sind zumeist disperse Systeme, die durch Sekundäreinflüsse und -Eigenschaften in ihrer Prozessleistung stärker beeinflusst werden, als die homogenen, einphasigen nichtwassermischbaren Öle. Vergleicht man beispielsweise die Zerspanungsleistung eines wassergemischten KSS in einer Anwendung in der systembedingt Schaum entsteht mit dem Ergebnis in einem aus tribologischer Sicht gleichartigen Prozess, in dem durch geschicktere Auslegung des Zuführungssystems kein Schaum vorliegt, so können die Ergebnisse völlig unterschiedlich sein. Getreu dem Motto: "Luft schmiert nicht gut". Es ist bei Lösungen und Emulsionen die Gefahr noch größer, als bei Schneid- und Schleifölen, dass die Zerspanungsleistung in der realen industriellen Anwendung durch Faktoren beeinflusst wird, welche im Labortest nicht berücksichtigt werden können.

Es besteht vor allem hinsichtlich der wassermischbaren KSS Bedarf, das vorhandene Instrumentarium zur Bewertung der Leistung zu optimieren bzw. zu erweitern.

3. Projektziel und -Definition

Das Ziel dieser Studie ist der Aufbau einer geeigneten Prüfmatrix zur Bestimmung der Zerspanungsleistung von wassermischbaren Kühlschmierstoffen. Die technischen Daten der entsprechenden Prüfverfahren sollen in industriellen Feldversuchen auf ihre wirtschaftliche Relevanz geprüft werden.

Die generellen Anforderungen an eine entsprechende Prüfmatrix bzw. die verwendeten Verfahren sind:

- geringer Zeitbedarf
- geringe Kosten
- reproduzierbare Ergebnisse
- in die Praxis übertragbare Ergebnisse.

Natürlich entspricht dieses Anforderungsprofil einer Quadratur des Kreises, da man bei einer starken Vereinfachung der realen Prozesse, welche zur Begrenzung des zu treibenden Aufwandes notwendig ist, naturgemäß Abstriche bei der Übertragbarkeit machen muss [5]. Ein möglichst gut ausbalancierter Kompromiss zwischen den o.g. Anforderungen ist also das Ziel. Die gesamte Studie wurde in drei Teilprojekte mit unterschiedlichen Projektpartnern untergliedert (Bild 4).

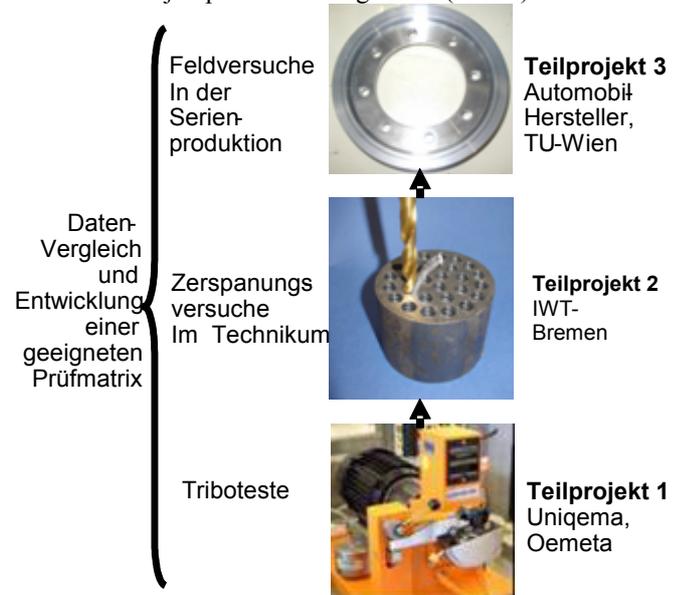


Bild 4: Projektskizze

3.1 Werkstoffe

Auf der Materialseite wurden drei verschiedene Werkstoffe ausgewählt, welche repräsentativ für die unterschiedlichen Zerspanungseigenschaften von üblicherweise in der mechanischen Bearbeitung eingesetzten Legierungen sind. Der Vergütungsstahl 16 Mn Cr5, der globulare Grauguss GGG 60 und die untereutektische Al-Legierung Al Si9 Cu3 decken mit ihren Zerspanungseigenschaften sicherlich einen sehr weiten Bereich der in der mechanischen Bearbeitung eingesetzten Werkstoffe ab. Da nicht für alle Verfahren Prüfkörper der 3 Grundwerkstoffe verfügbar waren sind insgesamt 6 Werkstoffe für die Untersuchungen verwendet worden.

Werkstoff	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Härte HB 10
-----------	------------------------------------	-------------

GGG 60	600	175-290 (HB 30)
16 Mn Cr5	800-1100	155-180
Al Si8	160-310 *	90-140 *
Al Si9 Cu3	290-310	80-110
Al Mg Si0,5	120-190	95
Lagerstahl **	k.A.	700 (HV)

* Literatur-Daten, Werte variieren je nach Wärmebehandlung

** Reichert Prüfkörper

Tabelle 1: Werkstoffdaten

3.2 Test-Kühlschmierstoffe

Als Prüfkandidaten für die Studie wurden vier verschiedene wassermischbare Kühlschmierstoffe festgelegt, welche die gesamte Leistungsbandbreite der Metallbearbeitungsflüssigkeiten abbilden sollen. Die Kühlschmierstoffe wurden in unterschiedlichen Konzentrationen untersucht.

Es handelt sich um drei handelsübliche, marktgängige Formulierungen (KSS A-C) sowie ein Entwicklungsprodukt (KSS D) mit dem außerhalb dieses Projektes noch keine Anwendungserfahrungen vorliegen.

Die Tabelle 2 fasst die wichtigsten technischen Daten der Kühlschmierstoffe zusammen und beinhaltet einen Relativvergleich der Praxiseigenschaften nach Schulnoten.

KSS	Basis Öl	EP-Add.	AW / Fric. Mod.	V ₂₀ / cSt	Wassergehalt in %	
A	33 % Min.Öl	-	Fettsäuren (als Seifen)	124	22	
A'	33 % Min.Öl	-	Fettsäuren (als Seifen)	60	27	
B	29 % Min.Öl	S - KW 1 % S	Polyol-ester 8 %	100	18	
C*	75 % Polyol-Ester	-	- (Basisöl)	113	0	
D*	40 % Komplex-ester 25 % Mono-Ester	S - KW 3 % S	- (Basisöl)	150	0	
KSS	Anwendungserfahrung Bearbeitungsprozess					
	Stahl		GG		Al-Leg.	
	leicht	schwer	leicht	schwer	leicht	schwer
A	4	4	2	4	4	4
A'	-	-	-	-	-	-
B	3	3	2	2	3	3
C*	3	2	2	2	1	2
D*	(1)	-	-	(1)	-	(1)

Tabelle 2: KSS-Daten und Anwendungserfahrungen

3.3 Teilprojekt 1 - Tribologische Prüfungen mit Laborgeräten

Gemeinsam mit dem Projektpartner Uniqema wurde die im ersten Schritt zu betrachtenden Prüfverfahren festgelegt:

- Reichert-Reibverschleiß
- Mini Traction Machine Reichert
- Micro Tapping Torque
- Falex V-Block
- VKA-Verschleiß/Fresslast
- Optische Messung der Schmierfilmdicke
- Hochfrequenz-Oszillationsprüfstand

Eine detaillierte Definition bzw. Diskussion der genannten Prüfmethode würde den Umfang dieses Berichtes sprengen. Einen guten, kompakten Überblick über die verwendeten Verfahren und die relevanten Prüfparameter gibt die Tabelle 3.

Nach einem ersten Screening der Methoden sollten dann die geeigneten Verfahren weiter untersucht werden. Zur Bewertung der Ergebnisqualität erfolgte der Abgleich mit den bis dahin vorliegenden Ergebnissen der beiden anderen Teilprojekte sowie den Anwendungserfahrungen der im Markt verwendeten KSS-Formulierungen. In der letzten Phase von Teilprojekt 1 erfolgt dann, je nach Notwendigkeit, eine Anpassung der Prüfbedingungen, um die Ergebnisqualität noch weiter zu verbessern.

3.4 Teilprojekt 2 - Zerspanversuche auf einem BAZ unter "Laborbedingungen"

Am IWT - Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bereich Fertigungstechnik wurde die Zerspanungsleistung beim Bohren im Vergütungsstahl 16 Mn Cr5, im Kugelgraphitguss GGG 60 und in der Aluminiumgusslegierung Al Si18 beurteilt. Die Kühlschmierstoff-Tests wurden auf einem Hermle Fräs- und Bohrzentrum U 630 T durchgeführt. (Bild 5). Die Maschine verfügt über eine Antriebsleistung von 11 kW und kann eine maximale Drehzahl von 7000 min⁻¹ realisieren. Das Fräs- und Bohrzentrum ist mit einer CNC-Steuerung vom Typ TNC 428 der Firma Haidenhain ausgestattet.

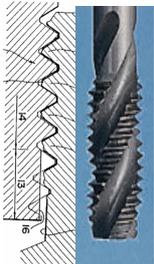
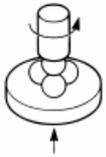
Methode	Kontakt	V	Norm	Verwendung für KSS übl.		Ergebnis	Sonst.
				Ja	Nein		
Micro-Tapping-Torque	 	0,08-0,8 m/s 5 - 220 Ncm Dreh mom	-	X		Drehmoment normiert mittels Standard-KSS -> Effizienz-Zahl	Tauchschnie- rung. Geflutetes Bohrloch
Reichert-Reibverschleiß	  Zylinder auf Ring	1,7 m/s 1,5 kg -> 1470 MPa	-	X		Verschleiß-ellipse + Last -> Druckaufnahme Zeit bis Schmierfilm-aufbau	Tauchschnie- rung
Falex Stift / V-Block	  Stift auf V-Block	0,1 m/s 0 - 1350 kg	ASTM D 2670 und D 3233		X	Verschleiß, Reibzahl, (Bruchlast)	Tauchschnie- rung
Vier-Kugel-Apparat	  Kugel auf Kugel (gleitend)	1 m/s 6 - 800 kg	ASTM D 2783	X	nwm	Verschleiß, Fresslast	Tauchschnie- rung
Hochfrequenz-Oszillationsprüfstand	  Kugel auf Scheibe (gleitend)	10-200 Hz 0 - 1 kg	-		x	Verschleiß, Reibwert	Mangelschnie- rung
Mini-Traction-Machine	  Kugel auf Scheibe (rollend)	0,02-4 m/s 1000 MPa max.	-		x	Reibzahl (Stribeck-Kurve)	Tauchschnie- rung
EHD Ultra Dünnsfilm-Prüfstand	  Kugel auf Glasscheibe	0-5 m/s 700 MPa max.	-		x	Schmierfilm-dicke 1-1000 nm	Mangelschnie- rung



Bild 5: Hermle Fräs- und Bohrzentrum U 630 T



Bild 6: Prüfblock 16 Mn Cr5 / Bohrer

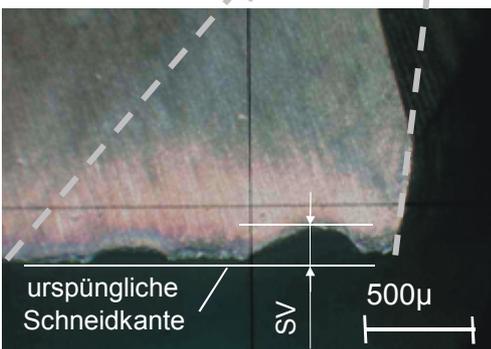
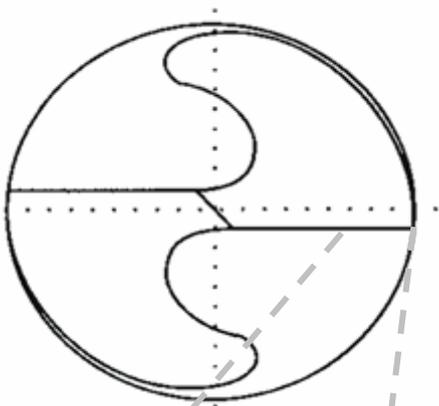


Bild 7: Schneidkantenversatz SV

Es wurden Spiralbohrer DIN 338 HC/TiN mit $d = 8,5$ und $d = 6$ mm unbeschichtet für die Al-Zerspänung verwendet (Bild 6). In einer ersten Untersuchungsreihe wurden der Verschleißfortschritt, die Zerspankräfte und die Oberflächengüte gemessen (Bild 7). Darüber hinaus wurden während des Bohrprozesses Späne entnommen anhand derer der Einfluss der Kühlschmierstoffe auf die Ausbildung der Späne analysiert.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde der Prüfstand um eine Einrichtung zur Messung des Drehmomentes erweitert (Bild 8) sowie der in der ersten Reihe nicht berücksichtigte KSS A untersucht.

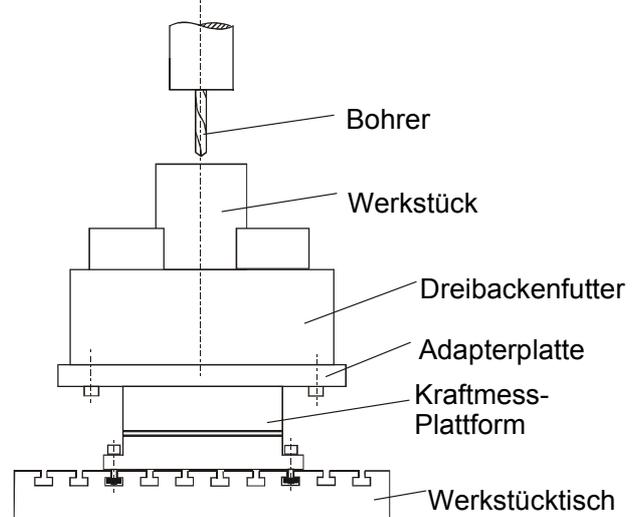


Bild 8: Versuchsaufbau für die Bohrversuche

3.4 Teilprojekt 3 – Feldversuche in der Serienproduktion bei einem Automobilhersteller

Das Teilprojekt 3 wurde gemeinsam mit dem Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Wien und einem Automobilhersteller im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt. Ziel war es, einen Wirtschaftlichkeitsnachweis zu erbringen, der den höheren Einkaufspreis einer KSS-Neuentwicklung (KSS D) mit einer Zunahme der Werkzeugstandzeiten bei gleichzeitiger Beibehaltung der Werkstückqualitäten rechtfertigen würde.

Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, wurden die Versuche parallel zur laufenden Serienproduktion gefahren. Dafür wurden drei Produktionseinheiten mit unterschiedlichen Bearbeitungsprozessen und verschiedenen Werkzeug-Werkstoff-Paarungen ausgewählt.



Bild 9: Feldversuche

Es wurde der in der Serie eingesetzte KSS C mit dem Versuchsprodukt KSS D verglichen. Die Daten wurden über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten gesammelt. Um die laufende Produktion nicht zu gefährden, wurde - unter Einbindung der örtlichen Qualitätssicherung gemeinsam mit den Linienverantwortlichen (Fertigungsplanern), den Meistern, den Teamsprechern sowie den Maschinenbedienern - der „Quality-Readiness-Prozess“ eingeleitet, um vorab alle möglichen Risiken abzuschätzen und die Kosten möglicher Ausschuss-Teile so gering wie möglich zu halten. Dieser „Quality-Readiness-Prozess“ wurde mittels einer FMEA-Analyse durchgeführt.

Folgende Bearbeitungsverfahren wurden untersucht:

- Innenfeindreihen (Bauteil: Mitnehmer – Schaltung)
- Drehen (Bauteil: Ring – Lager)
- Bohren (Bauteil: Stirnrad – Ausgleich)

Ein geplanter Vergleichsversuch mit dem KSS B konnte aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden.

4. Ergebnisse

Bei der hier vorgestellten Studie handelt es sich um ein Langzeitprojekt, welches in 2002 gestartet wurde. Dieser Text ist ein Zwischenbericht.

4.1 Teilprojekt 1

4.1.1 Micro-Tapping-Torque (Microtap)

Die Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen Standorten durchgeführt. Ein Labor nutzte ein Form-, das andere ein Schneidwerkzeug. Der Microtap-Versuchsaufbau sowie die Durchführung der Prüfungen entsprechen in etwa der ASTM D 5619-00 [3] bzw. dem Falex Tapping Torque Tester. Bei der Microtapanlage wird allerdings im Gegensatz zur Falex-Maschine das Drehmoment an der Spindel und nicht an der Prüfmateriale Spannung aufgenommen. Das ermöglicht die Nutzung von vorgebohrten Prüfplatten, um den Zeit- und Kostenaufwand gegenüber dem Falex-Tester zu reduzieren (Bild 10).

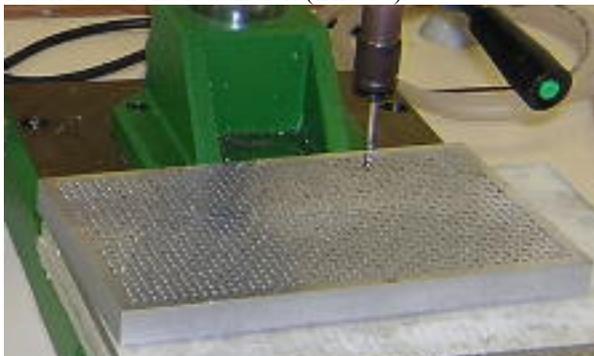


Bild 10: Microtap-Prüfplatte

In einer ersten Untersuchungsreihe wurden in Al Mg Si_{0,5} und 1018 Stahl Gewinde geformt und in Al Mg

Si_{0,5}, Al Si₁₈, 16 Mn Cr₅ sowie GGG 60 Gewinde geschnitten. Nachdem vor allem die Ergebnisse beim Formen eine recht gute Abbildung der Praxiserfahrungen zeigten wurde eine zweite Messreihe zum Formen gestartet.

Diese Messreihe wurde um den später in das Projekt aufgenommenen leistungsschwächeren Standard KSS A erweitert. Da einige tribologische Prüfungen auch mit unverdünntem KSS durchgeführt wurden stellte sich die Frage in wie weit die Viskosität einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Um diese Frage zu beantworten wurde von dem KSS A eine niedrigviskose Version, mit deckungsgleichen Anteilen an schmierwirksamen Anteilen erstellt und ebenfalls mit den interessantesten Verfahren, wie dem Microtap-Test, untersucht. Die Ergebnisse im Überblick zeigt Tabelle 4. Die Bewertung erfolgte im Relativvergleich der Messwerte (Platz 1-4). Die KSS-Konzentration betrug 8 %.

KSS	Schneiden				Formen	
	Al 1	Al 2	Stahl	GGG	Al 1	Stahl
A	-	-	-	-	4	4
A'	-	-	-	-	4	4
B	2	2	1	2	3	3
C	3	2	2	2	1	2
D	1	2	2	2	2	1

A' = KSS A - Einstellung niedrige Viskosität

Al 1: Al Mg Si_{0,5} Al 2: Al Si₁₈

Tabelle 4. Relativer Vergleich (Ranking) Microtap-Messwerte

Bildet man, bezogen auf die verschiedenen Legierungstypen die Mittelwerte lässt sich für die einzelnen Formulierungen ein Ranking aufstellen. Der Vergleich des Microtap-Ranking mit den Praxiserfahrungen ergab gute bis sehr gute Übereinstimmung (Tabelle 5).

KSS		A	B	C	D
Al-Leg.	Microtap	4,0	2,3	2,0	1,7
	Praxis	4,0	3,0	1,5	(1,0)
Stahl	Microtap	4,0	2,0	2,0	1,5
	Praxis	4,0	3	1,5	(1,0)
GGG 60	Microtap	-	2,0	2,0	2,0
	Praxis	3	2,0	2,0	(1,0)
Gesamt	Microtap	4,0	2,1	2,0	1,7
	Praxis	3,7	2,7	1,6	(1,0)
Übereinstimmung		++	+	+	+

Tabelle 5: Vergleich Ranking Praxis / Microtap-Ergebnisse

Je nach Werkstoff kann mit dem Microtap auch die Abhängigkeit der Schmierleistung von der KSS-Konzentration recht gut ermittelt werden (Bild 11).

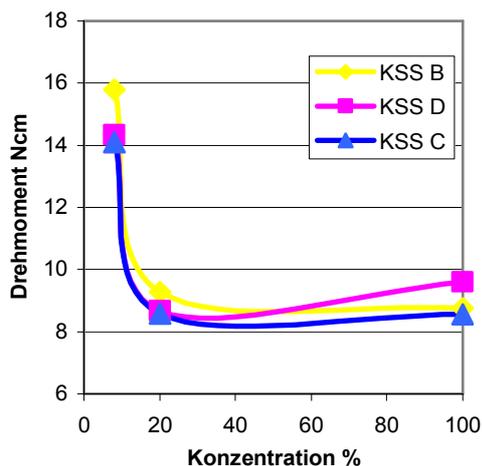


Bild 11: Gewindeschnitt in Al Si18

In der obenstehenden Grafik ist deutlich zu erkennen dass bis zu einer Konzentration von 20 % bei allen KSS-Formulierungen eine deutliche Verringerung des Drehmomentes durch Erhöhung der Konzentration möglich ist. Diese Beobachtung kann man auch in der Praxis der Al-Bearbeitung machen. Oberhalb dieses Grenzwertes scheint eine Verbesserung des Ergebnisses nicht mehr möglich zu sein.

Bild 12 macht die beim Formen höheren Drehmomente mit der klareren Differenzierung der unterschiedlichen Kühlschmierstoffe deutlich. Es ist davon auszugehen, dass beim Formen deutlich höhere Schnittdrücke als beim Gewindeschneiden auftreten, trotzdem bringen EP-additivierte Produkte nicht automatisch bessere Werte als nicht additivierte.

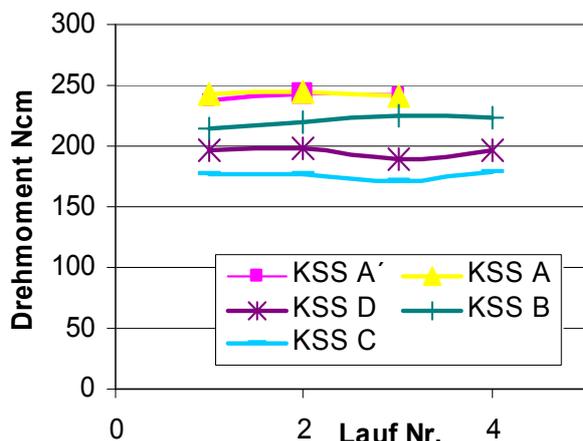


Bild 12: Gewindeformen Al Mg Si0,5, KSS-Konz. 8 %

Bei der Prüfung von GGG 60 und 16Mn Cr5 stellt sich interessanterweise ein von der Konzentration relativ unabhängiger Verlauf dar (Bild 12 + 13). Für den kugelgraphitischen Guss ist im Teilprojekt 3 ein ähnlicher Effekt festgestellt worden. Hier sind die Werkzeugstandzeiten teilweise sogar geringer geworden beim Einsatz von sehr hohen KSS-Konzentrationen.

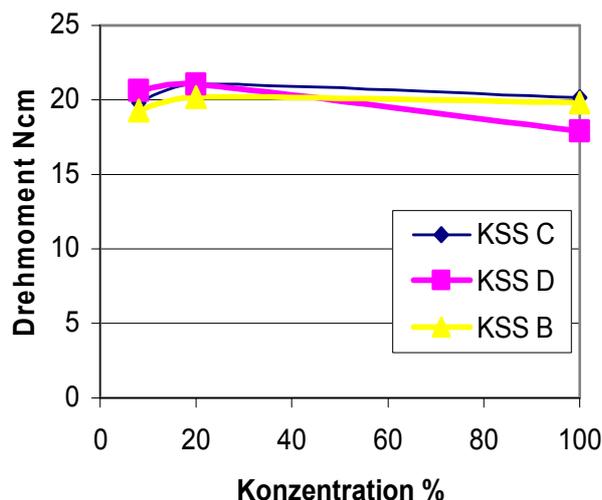


Bild 13: Gewindeschnitt in 16 Mn Cr5

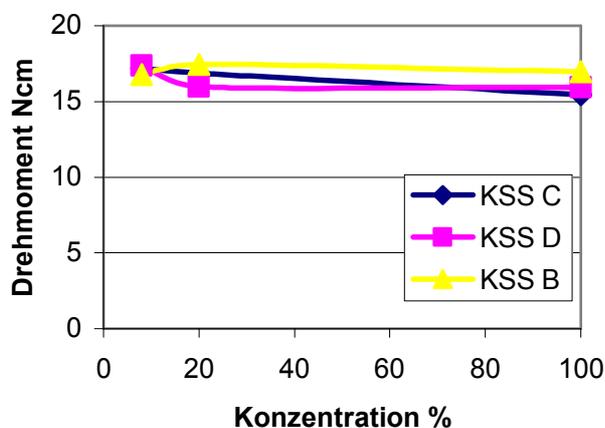


Bild 14: Gewindeschnitt in GGG 60

Insgesamt erscheint der Microtap-Prüfstand ein gewisses Potential zu besitzen praxisrelevante Daten für die Bewertung von wassergemischtem KSS zu generieren. Der Gewindeformprozess scheint etwas besser differenzierende Daten zu liefern als die Gewindeschneidoperation.

4.1.2 Reichert-Reibverschleiß

Dieses Verfahren wird seit vielen Jahren standardmäßig zur Bewertung von wassermischbaren und nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffen verwendet. Trotzdem ist sicherlich niemand der zu diesem Zweck mit der Reichert-Maschine arbeitet ganz glücklich mit der Aussagekraft der Ergebnisse. Der Reichert-Test ist bekannt dafür gut auf aktive EP-Additive zu reagieren, dagegen ist er weniger empfindlich auf die bei der Al-Bearbeitung wichtigen adsorptiven Wirkstoffe. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der einfachen Durchführung und der Verfügbarkeit von Prüfkörpern aus unterschiedlichen Materialien.

Standardmäßig werden Stahlrollen für die Reichertprüfung eingesetzt. Prüfkörper aus GGG 60 sind nicht käuflich erhältlich. Auf die Anfertigung von GGG 60-

Rollen wurde aus Kostengründen verzichtet. Im Handel erhältlich sind allerdings Prüfkörper aus Al Mg Si_{0,5}. Bei der Verwendung der Al-Prüfkörper muss das Belastungsgewicht von 1,5 auf ca. 0,5 kg reduziert werden, da es sonst zu einer zu starken Ausbildung der Verschleißelipse kommt (Bild 15).



Bild 15: Verschleißmarken auf Al Mg Si_{0,5}-Prüfkörpern

Die Untersuchungen wurden unabhängig voneinander in zwei verschiedenen Labors durchgeführt. Der Ablauf der Prüfung war in beiden Labors bis auf einen Punkt identisch. Im Uniqema-Labor wurde unadditiviertes Mineralöl zur Reinigung bzw. zum „Einlauf“ des Schleifrings benutzt, im Oemeta-Labor wurde mit dest. Wasser gearbeitet. Tabelle 5 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der durchgeführten Messreihen. Die Daten wurden wieder in der Art einer Rangliste aufgearbeitet.

KSS	Al Mg Si _{0,5}			Stahl		
	Unq.	Oem	Ges	Unq	Oem	Ges
A	4	3	3,5	4	4	4,0
B	3	4	3,5	2	3	2,5
C	1	3	2,5	2	2	2,0
D	1	1	1,0	1	1	1,7

Unq.: Durchführung Uniqema-Labor
Oem: Durchführung Oemeta-Labor

Tabelle 5: Relativer Vergleich (Ranking) Reichert-Messwerte

Die Vergleichbarkeit ist als mäßig zu bezeichnen. Eventuell hängen die Unterschiede mit den unterschiedlichen Einlaufmedien zusammen. Die in der Tabelle enthaltenen Werte beziehen sich auf eine Anwendungskonzentration von 8 %.

Mittelt man die in beiden Labors erhaltenen Rankingwerte und vergleicht sie mit den aus der Praxis bekannten Daten sieht es mit der Übertragbarkeit der Reichertwerte gar nicht so schlecht aus (Tabelle 6).

KSS		A	B	C	D
Al-Leg.	TP 1	3,5	3,5	2,5	1,0
	Praxis	4,0	3,0	1,5	(1,0)
Stahl	TP 1	4,0	2,5	2,0	1,7
	Praxis	4,0	3	1,5	(1,0)
Gesamt	TP 1	3,5	3,0	2,3	1,4
	Praxis	3,7	2,7	1,6	(1,0)
Übereinstimmung		(+)	(+)	+	+

(+) Gesamtübereinstimmung gut, Abweichungen bei den einzelnen Werkstoffen

Tabelle 6: Vergleich Ranking Reichertergebnisse / Praxisdaten

Weitere interessante Ergebnisse brachten Untersuchungen über die Konzentrationsabhängigkeit der Reichertdaten. Während bei den Stahlprüfkörpern mit zunehmender Konzentration bei allen Kühlschmierstoffen eine Verschleißreduzierung erkennbar war (Bild 16) überraschten die entsprechenden Daten für die Prüfkörper aus Al-Legierung (Bild 17).

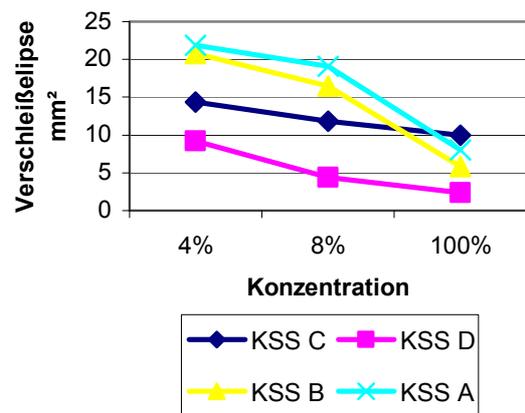


Bild 16: Reichertverschleiß Stahlrollen in Abhängigkeit der KSS-Konzentration

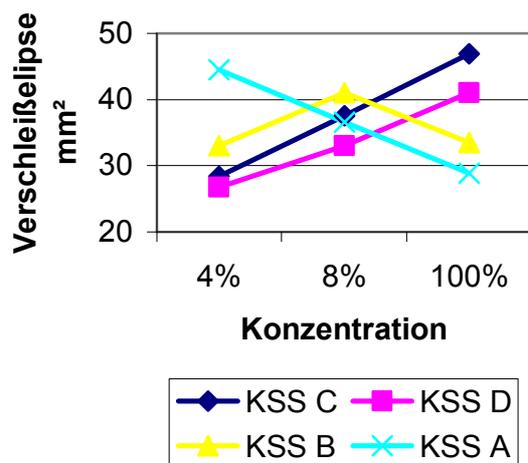


Bild 17: Reichertverschleiß Al Mg Si0,5- Rollen in Abhängigkeit der KSS-Konzentration

Bei allen mit einer größeren Menge an AW-Wirkstoffen ausgestatteten Produkten steigt der Verschleiß mit steigender Konzentration an, während bei dem einzigen „unadditivierten“ Produkt der Verlauf dem bei den Stahlrollen entspricht. Der KSS B, mit einem mittleren Gehalt an AW-Additiven, liegt dann in unverdünnter Form wieder auf einem niedrigeren Niveau. Dieser Effekt tritt sowohl bei den Oemeta- als auch bei den Uniqema-Messreihen auf.

Erklärbar ist dieses Phänomen über den Kühleffekt des wassergemischten KSS. Dieser definiert sich zum einen über die Wasserkonzentration in der Flüssigkeit und zum anderen über die Verfügbarkeit des Wassers an der Metalloberfläche, um einen schnellen Wärmetransport zu gewährleisten. Produkt C u. D enthalten eine so hohe Menge an AW-Wirkstoffen, dass ab einer bestimmten Produktkonzentration durchaus von einem verzögerten Wärmetransport ausgegangen werden kann. Im Konzentrat schließlich liegt bei Produkt C u. D im Gegensatz zu Produkt A u. B kein Wasser mehr vor. Vor allem relativ „weiche“ Al-Knetlegierungen, wie z.B. Al Mg Si0,5 sind in der Zerspanung sehr empfindlich gegenüber mangelnder Kühlung.

Das der „Überhitzungseffekt“ bei den Microtap-Untersuchungen erst bei höheren Konzentrationen auftritt (s. Bild 11) ist sicherlich mit einer unterschiedlichen Bilanz im Verhältnis Wärmeerzeugung durch Reibung – Wärmeabfuhr durch Werkzeug, Werkstück (große Bohrplatte bei Microtap) und KSS zu erklären. Das eine Oberflächenbelegung von Al-Legierungen bei dem hoch AW-ausgerüsteten KSS C schon bei relativ geringen Konzentrationen stattfindet zeigt Bild 18. Oberhalb einer Aktivierungskonzentration von ca. 2 % ist praktisch keine Verbesserung des Verschleißschutzes mehr möglich. Das deckt sich mit den Praxiserfahrungen beim Einsatz dieses Produktes: Hohe Leistung in der Zerspanung von Al-Legierungen bei relativ geringer Konzentration.

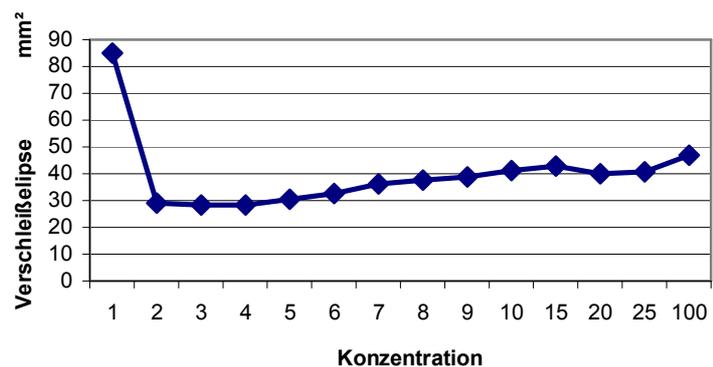


Bild 18: Reichertverschleiß Al Mg Si0,5- Rollen - Aktivierungskonzentration KSS C

Wie schon in der Microtap-Versuchsreihe wurde auch mittels der Reichert-Maschine der Einfluss der Viskosität des KSS-Konzentrates auf die Messdaten ermittelt. Das Ergebnis konnte wiederholt werden. Es ist keine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Konzentratviskosität feststellbar.

4.1.3 Falex Stift / V-Block

Die Falex Stift und V-Block-Prüfung wurde mit der Reibpaarungen Stahl (Stift SAE 3135) / Stahl (Block Al SI 1137) und Stahl (Stift s.o.) / Al-Leg. (Block Al Mg Si0,5) durchgeführt. Prüfkörper aus GGG 60 sind im Markt nicht verfügbar, eine Sonderanfertigung wäre zum Zweck des Methodenscreenings zu aufwendig gewesen.

Bei den Stahl-Prüfkörpern war relevanter Verschleiß bei allen geprüften Kühlschmierstoffen (KSS B, C, D) nicht feststellbar.

Bei der Prüfung von V-Blocks aus Al-Legierung mit 2 % iger Emulsion konnte hinsichtlich Verschleiß und Reibzahl differenziert werden. Die Rangfolge beim Verschleiß war: 1. KSS D, 2. KSS C, 3. KSS B.

Bei der Reibzahl sah es folgendermaßen aus:

1. KSS C, 2. KSS D, 3. KSS B

Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen betrachtet man die Produktzusammensetzung und die Praxiserfahrung mit den jeweiligen Kühlschmierstoffen.

Die EP-Prüfung (kontinuierliche Lasterhöhung) konnte nicht durchgeführt werden, da die Prüfkörper vor Erreichen der Fresslast auseinander brachen.

Obwohl die ermittelten Ergebnisse die Leistungsfähigkeit der geprüften Produkte einigermaßen gut wiedergaben, wurden klar dass die Falex Stift / V-Block-Prüfung weniger gut für die Prüfung von wassergemischten Kühlschmierstoffen geeignet ist als andere Verfahren die mit gleichem oder geringerem Aufwand durchgeführt werden können.

4.1.4 Vier-Kugel-Apparat (VKA), EP-Eigenschaften

Die Bestimmung der EP-Eigenschaften lässt sich mit dem VKA nur mit den nicht verdünnten Konzentraten durchführen. Dadurch ist der Test an sich schon limitiert in seiner Aussagekraft für wassergemischte KSS. Nichtsdestotrotz wurde er als überall bekanntes Standardprüfverfahren in die Studie integriert.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig die bekannte Selektivität des Testes für EP-Additive auf. Für Fresslast und Verschleiß ist das Ranking deckungsgleich:

1. KSS D, 2. KSS B, 3. KSS C.

Die Ergebnisse sind für die Bewertung von KSS-Formulierungen zu eindimensional und relativ wenig praxisrelevant. Der VKA gibt keine Informationen die nicht mit anderen, grundsätzlich besser geeigneten Verfahren, ebenfalls ermittelt werden können.

4.1.5 Hochfrequenz-Oszillationsprüfstand (HFRR)

Der HFRR-Prüfstand zeigt recht gut die Filmbildungseigenschaften der Kühlschmierstoffe auf. Betrachtet man das untenstehende Bild 19 wird folgendes Ranking hinsichtlich des Reibwertes deutlich:

1. KSS C, 2. KSS D, 3. KSS B, 5. KSS A u. A'.

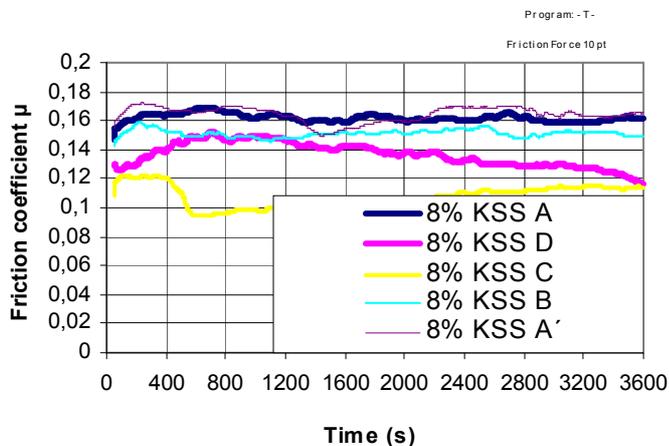


Bild 19: HFRR-Lauf mit KSS-Emulsionen, 8 %-Konzentration

Wenn man anstatt der Emulsionen Konzentrate vermisst, kann man bei der Veränderung der Reibwerte entlang der Zeitachse wieder sehr deutlich zwischen den hoch AW-additivierten Esterprodukten, den EP-freien (Bild 20) und den EP-haltigen Mineralölprodukten unterscheiden. Die Schmierung ist bei den Esterprodukten sofort da, bei dem EP-haltigen Mineralölprodukt muss das EP-Additiv "anspringen", dann erfolgt eine schnelle Reduzierung des Reibwertes. Beim EP-freien Mineralölprodukt ist eine kontinuierliche

Verringerung des Reibwertes zu erkennen. Das könnte mit der zunehmenden Aktivierung von freien Fettsäuren zusammenhängen. In der Endphase des Laufes wird die Kurvenbesprechung sehr schwierig (> 3300 s), hier ist noch Klärungsbedarf gegeben.

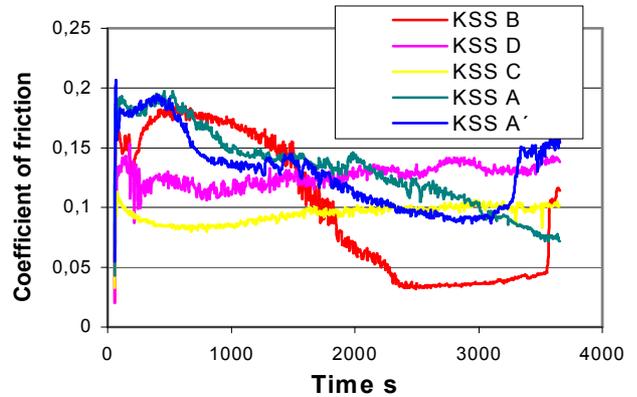


Bild 20: HFRR-Lauf mit KSS-Konzentrat

4.1.6 Mini-Traction-Machine (MTM)

Bei der Prüfung mit der Mini-Traction-Machine ist zunächst die Stribeck-Kurve der Konzentrate aufgenommen worden (Bild 21). Der Verlauf ist erwartungsgemäß, d.h. bei niedrigeren Reibgeschwindigkeiten zeigen die Esterprodukte deutlich niedrigere Reibzahlen. Bei höheren Geschwindigkeiten im hydrodynamischen Bereich, sind zwischen den einzelnen Produkten keine wesentliche Unterschiede auszumachen.

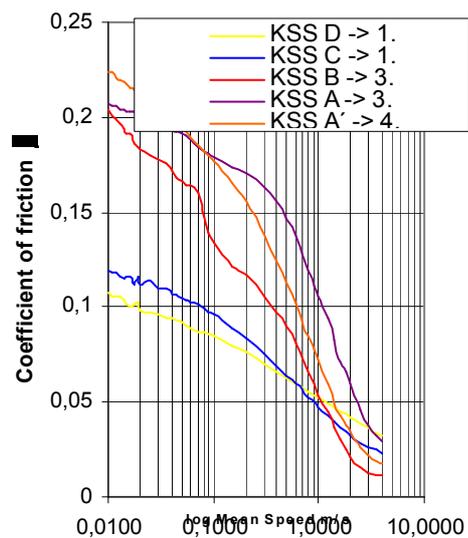


Bild 21: MTM-Stribeckkurven von KSS-Konzentrat Ganz anders bei den Emulsionen. Während bei einer KSS-Konzentration von 8 % eine klare Differenzierung nicht möglich ist (Bild 22), scheint sich das Ranking

der Konzentrationsuntersuchung bei 4 %igen Emulsionen umzukehren (Bild 23).

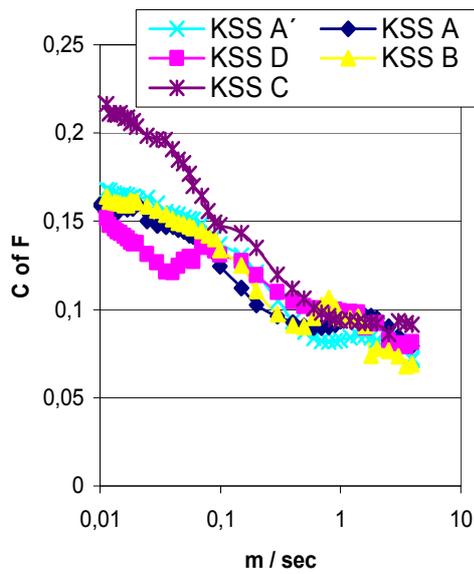


Bild 22: MTM-Stribeckkurven von KSS-Emulsionen 8 %

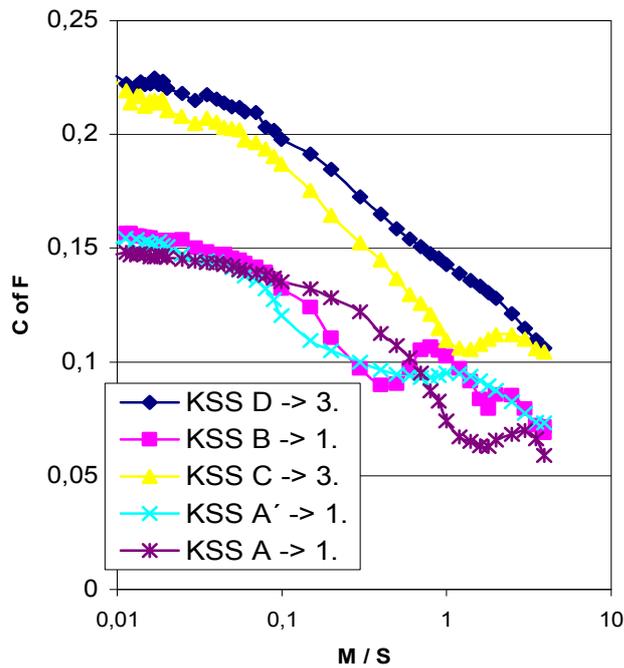


Bild 23: MTM-Stribeckkurven von KSS-Emulsionen 4 %

Die Ergebnisse der 4 %igen Emulsionen widersprechen eindeutig den Praxiserfahrungen und den Werten der HFRR-Untersuchung.

Bevor die MTM als ein hilfreiches Werkzeug für die Leistungsbewertung von KSS gelten kann, müssen die

Ursachen für diese widersprüchlichen Ergebnisse geklärt werden. Einen theoretischen Erklärungsansatz gibt es z.Zt. nicht. Eventuell werden zu diesem Thema weitergehende Untersuchungen durchgeführt.

4.1.7 EHD Ultra-Dünnsfilm-Prüfstart (Optical Rig)

Leider ist eine direkte Messung der Emulsionen nicht möglich, da die gemessene Filmstärke im Bereich der Nachweisgrenze liegt und bei derart geringen Filmstärken mit Inhomogenitäten im Film (Ölstropfen, Calciumseifen u.a.), korrekte, wiederholbare Messungen nicht möglich sind (Bild 24).

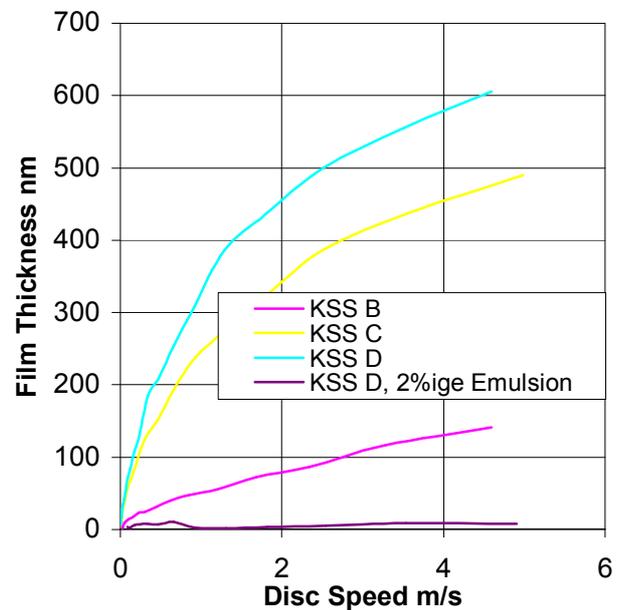


Bild 24: Optical Rig - Filmstärkenvergleich Emulsion/Konzentrat

Die Untersuchung von Konzentraten mit dem Dünnsfilm-Prüfstand bestätigt die bisher dargestellten Ergebnisse mit einer direkten Aussage über die Filmbildung der verschiedenen Produkte.

Auch bei dieser Untersuchung sind die Esterprodukte den Mineralölprodukten überlegen (Bild 25).

Natürlich muss man die Übertragbarkeit von Messergebnissen, die mit Konzentraten ermittelt wurden, auf Praxisanwendungen mit wassergemischten Produkten grundsätzlich in Frage stellen. Allerdings spricht der Abgleich mit Praxiserfahrungen durchaus für eine gewisse Übertragbarkeit. Bei Anwendungen, wo aufgrund der Prozess- und Materialeigenschaften im wesentlichen gute Filmbildung bzw. "AW-Eigenschaften" im Vordergrund stehen, z.B. von Al-Legierungen - sind hoch esterhaltige Produkte die am besten geeigneten KSS-Formulierungen.

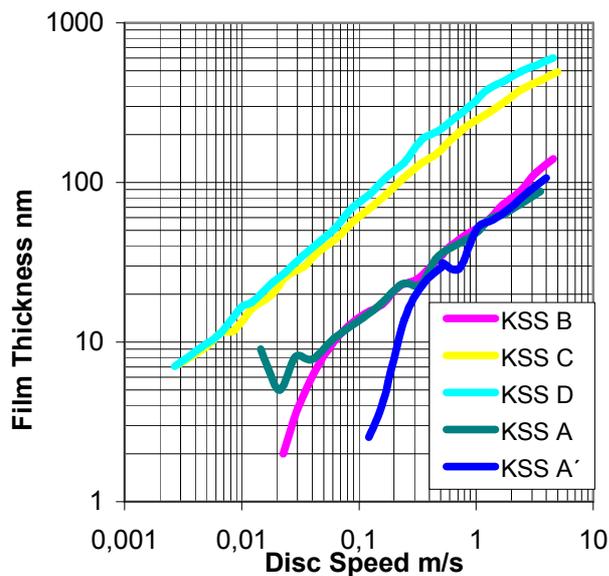


Bild 25: Optical Rig - Filmstärkenvergleich verschiedene Konzentrate

4.2 Teilprojekt 2

Die Ergebnisse der Zerspanungsversuche auf einen Hermle BAZ lassen sich in Form einer Rangfolgen-Auswertung wie folgt darstellen (Tabelle):

KSS/ Konz.	16MnCr5 Standweg	GGG 60 Standweg	AlSi18 Standweg	Ge- samt
KSS B,4%	6	5	4	5,0
KSS B,8%	5	6	/	5,5
KSS C,4%	4	2	4	3,3
KSS C,8%	3	1	2	2,0
KSS C,20%	2	3	/	2,5
KSS D,4%	1	4	3	2,7
KSS D,8%	4	4	/	4,0

Tabelle 7: Rangfolge der KSS-Formulierungen in den Zerspanungsversuchen

Dabei wurden im wesentlichen der erzielte Werkzeugstandweg zur Bewertung herangezogen. Die Vorschubkraft, die Oberflächenartigkeit und die mikroskopische Untersuchung der Späne ergaben keine zur Differenzierung der Produkte sehr gut geeigneten Daten.

Die Ergebnisse der Zerspanungsversuche weichen teilweise recht deutlich von dem ab, was nach den Daten der Triboteste und auch den Praxiserfahrungen für die marktgängigen Produkte zu erwarten wäre. Um diese Unklarheiten aufzulösen, wurde eine ergänzende Messreihe definiert, bei der der bisher nicht geprüfte KSS A einbezogen wird. Außerdem wird zusätzlich eine Einrichtung zur Messung des Drehmomentes am Werkstück bzw. an der Aufnahme installiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lagen bei Niederschrift des Berichtes noch nicht vor.

4.3 Teilprojekt 3

Die größte Schwierigkeit bei Teilprojekt 3 war es, die Prozesse so einzustellen, dass die Leistung des KSS überhaupt einen relevanten Einfluss auf die Werkzeugwechselintervalle ausüben konnte. So wird häufig ein Werkzeugwechsel vorgenommen, weil eine fest definierte Einsatzzeit überschritten worden ist oder weil ständig unfallartige Werkzeugdefekte auftreten.

Unter solchen Bedingungen ist es natürlich nicht möglich das Standzeitverlängerungspotential von Kühlschmierstoffen zu ermitteln.

Im Teilprojekt 3 konnten durch den Einsatz eines Diplomanten und der aktiven Mitarbeit aller Beteiligten Abteilungen wie z.B. Werkzeugmanagement, Prozess-

technik, Fertigungsplanung und Werkstofftechnik entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden. Die Ergebnisse sahen wie folgt aus.

	Al Cu3	Si9 16 Cr5	Mn 60	GGG 60	Ges.
KSS C 4 %	3	2	/		2,5
KSS C 8 %	3	3	/		3,0
KSS C 10 %	/	/		3	3,0
KSS C 20 %	/	/		2	2,0
KSS D 4 %	1	1	/		1,0
KSS D 10 %	/	/		1	1,0

Tabelle 8: Ranking der Werkzeugstandzeiten mit verschiedenen KSS bei realen Bearbeitungsprozessen. Dabei konnten Werkzeugstandzeitverlängerungen von bis zu 100 % gegenüber der Serienfertigung realisiert werden. Das Einsparungspotential, bezogen auf Werkzeug- und KSS-Kosten, lag dabei bei max. 30 %. Die im Teilprojekt 3 ermittelten Ergebnisse ergeben eine gute Grundlage zur Bewertung der Daten aus den anderen beiden Teilprojekten. Wünschenswert wäre es gewesen, alle 4 KSS-Typen im Praxiseinsatz zu bewerten. Es ist geplant das Teilprojekt 3 in diesem Sinn mit industriellen Partnern weiterzuführen, um die Datenlage weiter zu verbessern. Für den Anwender besteht dabei die Möglichkeit, dass für seine Prozesse wirtschaftlichste Produkt zu ermitteln.

5. Interpretation der Ergebnisse - Ausblick

Die bis dato ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die geschickte Kombination verschiedener tribologischer Laborprüfungen durchaus eine relativ gute Leistungsbeschreibung von wassergemischten KSS ermöglicht. Eine abschließende Bewertung ist an dieser Stelle allerdings noch nicht möglich. Ein Zwischenergebnis kann aber festgehalten werden.

Ein gutes Bild bezüglich der Schmiereigenschaften eines Kühlschmierstoffes ergibt sich bei einer mehrstufigen Laborprüfung nach dem Schema:

1. Reichert (ggf. plus Prüfungen zur Filmbildung bzw. Reibzahl HFRR und/oder Optical Rig)
2. Microtap (Gewindeformen)

Dabei sollte nach Möglichkeit das im realen Prozess eingesetzte Material als Prüfkörper verwendet werden oder aber mindestens zwischen Stahl bzw. Al-Legierung unterschieden werden.

Die Prüfung verschiedener Anwendungskonzentrationen kann wichtige zusätzliche Informationen liefern.

Gewisse Probleme bestehen zur Zeit noch bei der Definition bzw. der Durchführung eines einfachen, modellhaften Maschinenversuchs. Hier sind noch weitergehende Untersuchungen notwendig, um offene Fragen zu beantworten und die Prüfbedingungen zu optimieren. Ebenso ist die Datenlage hinsichtlich der realen Potentiale zur Werkzeugstandzeitverlängerung noch zu verbessern.

Es bleibt zu hoffen, dass der eine oder andere KSS-Anwender bereit ist zukünftig an diesem Projekt mitzuarbeiten, damit entsprechende technische und wirtschaftliche Daten ermittelt werden können.

Auch in Zukunft wird die Leistungsbewertung von wassergemischten Kühlschmierstoffen eine Aufgabe sein, die nicht durch ein einzelnes, standardisiertes Prüfverfahren zu bewältigen ist. Allerdings sollte es möglich sein, die noch sehr große Lücke zwischen der Aussage der einfachen schnellen Laborprüfung und dem Ergebnis des aufwendigen Feldversuches ein ganzes Stück weiter zu schließen.

Danksagung

Mein Dank gilt den Institutionen und Personen, die an diesem Projekt mitgearbeitet haben:

Herrn Dr. Ing. Walter und Herrn Garbrecht vom IWT in Bremen,

Mr. John Eastwood und Mr. Lee Thompson von Uniqa ma, England sowie

Herrn Prof. Dr. Weseslindtner, Herrn Sauprigl und Herrn Vlaschitz von der TU-Wien

Literatur, Referenzen

- [1] Walter, André: Bildung von Sorptions- und Reaktionsschichten durch KSS-Additive bei der Zerspanung. Mineralöltechnik, 6 (2003), Beratungsgesellschaft für Mineralöl-Anwendungstechnik, Hamburg
- [2] Hübner, Heck: Kann die Zerspanungsleistung von nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffen mit Hilfe von Kurztest abgeschätzt werden?, Internationales Kolloquium Tribologie, TAE, Ostfildern
- [3] N.N.: Comparing Metal Removal Fluids using the Tapping Torque Test Machine, ASTM D 5619-00, ASTM International, West-Conshohocken, PA, USA
- [4] Rohbein, Emmer: Optimierung von Minimalmengenschmierstoffen für die Gewindefertigung in Aluminiumgusslegierungen, Tribologie und Schmierungstechnik, Technischer Bericht Nr. 21-05, ISSN 0342-4288 1525

- [5] Grebe; Feinle: Anwendungsgebiete, Vorteile und Grenzen der tribologischen Modellprüfung. 14. Internationales Kolloquium Tribologie, TAE, Ostfildern 13.-15.01.04