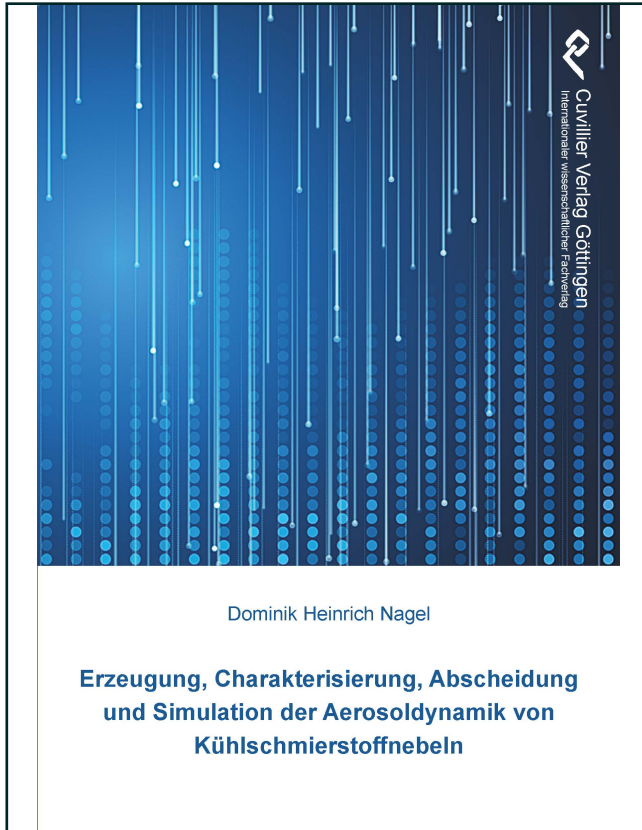




Dominik Heinrich Nagel (Autor)  
**Erzeugung, Charakterisierung, Abscheidung und  
Simulation der Aerosoldynamik von  
Kühlschmierstoffnebeln**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8580>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Kühlschmierstoffnebel, auch Önebel genannt, treten z. B. in Prozessen der Metall verarbeitenden Industrie auf, wenn Kühlschmierstoffe mechanischen (Flieh- bzw. Trägheitskräfte, Scherkräfte) oder thermischen Beanspruchungen (Verdampfung, Verdunstung) ausgesetzt werden. Weltweit sind Millionen von Menschen kühl-schmierstoffbelasteter Atmosphäre am Arbeitsplatz ausgesetzt. KSS-Nebel gelten als gesundheitsgefährdend [1-17] und sind eine Emissionsquelle für kohlenwasserstoffhaltige Verbindungen. Sie können sich auch in der Werkshalle niederschlagen und z.B. durch Rutschgefahr die Arbeitssicherheit gefährden, sind mit einem hohen Reinigungsaufwand verbunden, können eine Brandgefahr darstellen und erfordern zusätzliche Wartungs- und Energieaufwendungen.

Kühlschmierstoffnebel sind feinste Tropfen in Luft, die auch dampfförmige Komponenten enthält, so dass von einer Dampfphase und einer Tropfenphase des Kühlschmierstoffs (KSS) gesprochen werden kann. An Wänden und auf Filterfasern kann sich eine zusätzliche flüssige Phase des Kühlschmierstoffs befinden. Der Stoffaustausch zwischen den Phasen kann sowohl die Charakterisierung als auch die Abscheidung von KSS-Nebeln erheblich erschweren.

Zur Abscheidung von Kühlschmierstoffnebeln werden überwiegend mechanische und elektrische Feinstpartikelfilter eingesetzt, mit denen sich häufig keine zufriedenstellenden Schadstoffabscheidegrade erzielen lassen. Die Dampfphase passiert den Filter weitgehend ungehindert, was besonders im Fall der Reinlufrückführung zur Belastung der Hallenluft führen kann. Häufig übersteigt im Reingas von Kühlschmierstoffabscheidern die dampfförmige Emission die partikuläre bei weitem. Eine deutliche Reduzierung des Schadstoffaustrags ist dadurch nur durch Verringerung der Dampfemission möglich.

Daher ist ein Gesamtverständnis des Systems notwendig, um herauszufinden, mit welchen Maßnahmen die Entstehung des Dampfes verringert werden kann und wie es möglich ist, Dampf abzuscheiden. Dieses Gesamtverständnis soll in der vorliegenden Arbeit durch Simulation, Experimente zur Aerosolerzeugung, Abscheidung sowie den Einsatz und die Analyse von Messtechnik sowohl für die Tropfen- als auch für die Dampfphase erreicht werden. Die Messung der Dampfphase ist besonders schwierig, da die Tropfen vorher in einem Vorfilter abgetrennt werden müssen. Das kann zu Tropfenverdunstung und Feinstpartikeldurchtritt im Vorfilter führen.

Für die Verbesserung der Tropfenabscheidung ist die Kenntnis des Fraktionsabscheidegradverlaufs wichtig. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie der Fraktionsabscheidegradverlauf bestimmt werden kann und welchen Einflüssen die Messung unterliegt, insbesondere durch Tropfenverdunstung.

Für die Filterprüfung ist eine Referenz-Ölnebelquelle notwendig, mit der ein zeitlich konstantes Aerosol erzeugt werden kann. Ebenso müssen geeignete Prüfvöle ausgewählt werden.

Ein neues Verfahren wurde entwickelt und untersucht, bei dem eine Absorptionsstufe in einen herkömmlichen filternden Abscheider für Kühlschmierstoffnebel integriert wird, um die Dampfemission zu verringern.

Es wurde ein Begriffssystem entwickelt, mit dem Aerosole in technischen Prozessen bezüglich ihrer Empfindlichkeit gegenüber Verdunstungs- und Kondensationsprozessen unterschieden werden können. Für Aerosole, deren Zustand so weit vom thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Tropfen- und Dampfphase entfernt ist, dass Verdunstungs- oder Kondensationsprozesse berücksichtigt werden müssen, wird der Begriff Nichtgleichgewichtsaerosole verwendet.

Kühlschmierstoffe decken ein breites Spektrum von leicht bis sehr schwer flüchtigen Komponenten ab. Sie sind daher eine gute Modellsubstanz für Aerosole mit flüchtigen Komponenten. Die Erkenntnisse für Kühlschmierstoffnebel sind auf viele andere Stoffsysteme übertragbar.

## 2 Hintergrund

Kühlschmierstoffnebel sind Gegenstand vielfältiger Forschungsarbeiten, die sich aber aufgrund der Vielschichtigkeit des Themas meist auf wenige Aspekte konzentrieren. Das Nebeneinander von Fragestellungen aus der mechanischen Verfahrenstechnik, der technischen Thermodynamik, der Messtechnik, der Arbeitsmedizin, der Tribologie uvm. bewirkt gerade in der anwendungsorientierten industriellen Forschung eine Konzentration auf die Partikelabscheidung mit eher pauschaler oder gänzlich fehlender Berücksichtigung thermodynamischer Zusammenhänge. Die Zusammenarbeit von Universitäten, Forschungsinstitutionen und Industrie ist daher auf dem Gebiet der Kühlschmierstoffnebel besonders wichtig, um theoretisches und praktisches Wissen zu vernetzen. Die Hauptthemen der Ölnebeforschung sind: Abscheidung, Messtechnik, Verhalten, Entstehung, Erfassung, Toxizität / Gesundheitsaspekte. Hinzu kommt die Zusammensetzung des Kühlschmierstoffs, die eine Aufteilung in nichtwassermischbare und wassergemischte Kühlschmierstoffe bewirkt. Weitere Themen sind die Filterprüfung, emissionsrechtliche Betrachtungen sowie die gezielte Erzeugung von Ölnebeln bei der Minimalmengenschmierung und zu Forschungszwecken. Bei der Minimalmengenschmierung stehen tribologische Aspekte im Vordergrund.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) eine Versuchsanlage zur Erzeugung, Charakterisierung und Abscheidung von nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffnebeln aufgebaut und kontinuierlich weiterentwickelt. Es wurde das Simulationsprogramm AerSolve (Aerosol Solver) entwickelt, mit dem das

Aerosolverhalten in Rohrleitungen, Abscheidern, Mess- und Probenahmesystemen berechnet werden kann. AerSolve wurde sowohl zur Simulation der Versuchsanlage des ITTK eingesetzt als auch zur Simulation eines Entwicklungsprüfstandes des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). Die meisten Simulationen des Entwicklungsprüfstandes des IFA sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, sondern in die Veröffentlichungen [18] und [19] eingeflossen. Nur die Modellierung der Kühlschmierstoffzusammensetzung von drei ausgewählten Prüfolen in Kapitel 4.5 und die Simulation des Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichts in Kapitel 4.6 stammen aus der Simulation des Entwicklungsprüfstandes des IFA.

Im Folgenden wird Hintergrundwissen zu Kühlschmierstoffnebeln zusammen mit Beispielen anderer Forschungsarbeiten und Ansatzpunkten der vorliegenden Arbeit themenbezogen kurz erläutert:

#### Gesundheits- und Umweltaspekte:

Kühlschmierstoffnebel sind sowohl für den Arbeitsschutz relevant [1-17], als auch als Emission von Kohlenwasserstoffen. Kühlschmierstoffe können Haut-, Atemwegs- und Lungenschädigungen hervorrufen und stehen im Verdacht, krebserregend zu sein [1-17].

#### Technische Regeln und Gesetze:

Durch die Verabschiedung der Gefahrstoffverordnung 2005 ist der vorherige MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) für Kühlschmierstoffnebel entfallen. Kühlschmierstoffnebel zählen zu den Gemischen, bei denen eine gesundheitliche Beeinträchtigung auch bei sehr niedrigen Konzentrationen nicht auszuschließen ist. In der Gefahrstoffverordnung von 2005 werden Grenzwerte wieder wie in den 1970er Jahren nur arbeitsmedizinisch-toxikologisch begründet, das Konzept der Technischen Richtkonzentrationen (TRK) wird aufgegeben zugunsten einer verstärkt grenzwertfreien Beurteilungsmöglichkeit [17]. Das Konzept der Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) tritt an die Stelle der bisherigen MAK-Werte. In Deutschland galt von März 1996 bis Januar 2005 ein Luftgrenzwert (MAK) von  $10 \text{ mg/m}^3$  für wassermischbare und nicht-wassermischbare Kühlschmierstoffe mit einem Flammpunkt größer  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , die zur Bearbeitung von Metallen nach DIN 51385 eingesetzt wurden. Der Luftgrenzwert galt für die Summe aus Dampf und Tropfen. In der DGUV-Regel 109-003 - Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen [20] ist ein Wert angegeben, der dem bisherigen MAK-Wert entspricht. In den USA liegt das Permissible Exposure Limit (PEL) für Ölnebel bei  $5 \text{ mg Tropfen pro m}^3 \text{ Luft}$  als 8 Stunden-Mittelwert und bei  $10 \text{ mg/m}^3$  für kurzzeitige Expositionen. Vom National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) wurde allerdings ein Wert von maximal  $0,5 \text{ mg/m}^3$  empfohlen [21, 22, 16]. In Österreich sind in der Grenzwertverordnung 2011 (GKV 2011) MAK-Werte für Kühlschmierstoffe festgelegt:  $5 \text{ mg/m}^3$  für Mineralölnebel (unlegierter Kühlschmierstoff),

1 mg/m<sup>3</sup> für Kühlschmierstoffnebel (legierter Kühlschmierstoff) und 20 mg/m<sup>3</sup> für die Summe aus Tropfenmasse und Dampf. Die Mengenangabe bezieht sich auf die einatembare Fraktion des Nebels. Die Anlagenbetreiber sind gesetzlich verpflichtet, die Grenzwerte so weit wie möglich zu unterschreiten. In der Schweiz gilt ein MAK-Wert von 1 mg/m<sup>3</sup> für die Tropfenphase und 10 mg/m<sup>3</sup> für die Summe aus Tropfen- und Dampfphase der Kühlschmierstoffe incl. Additive [23].

Die deutsche Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft 2002 (TA Luft) enthält einen Emissionsgrenzwert für Organische Stoffe als Gesamtkohlenstoff, der den Massenstrom auf 0,5 kg/h oder die Massenkonzentration auf 50 mg/m<sup>3</sup> limitiert. Kühlschmierstoffe zählen zu den komplexen kohlenwasserstoffhaltigen Gemischen. Vom Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) wird ein Internetportal zum Thema Kühlschmierstoffe betrieben [24], das die gesetzlichen Bestimmungen uvm. zusammenfasst.

#### Entstehung/Erzeugung:

Kühlschmierstoffnebel können durch Verdunstung von Öl an heißen Oberflächen und anschließende Kondensation in der Umgebungsluft entstehen. Sie können auch durch Zerstäubung aufgrund von Flieh- oder Scherkräften gebildet werden, z.B. durch rotierende Teile oder das Auftreffen eines Flüssigkeitsstrahls auf einer Oberfläche [22, 25-38]. Auch das Abkühlen öldampfbeladener Luft und das Mischen öldampfbeladener Gasströme unterschiedlicher Temperatur kann zu Ölnebelbildung führen. Ölnebel entstehen z.B. beim Bohren, Drehen, Fräsen, Schleifen. Eine typische Anwendung für KSS-Abscheider sind Bearbeitungszentren für die CNC-Bearbeitung. In der Luft sind in der Regel ausreichend Kondensationskeime vorhanden, um heterogene Keimbildung zu ermöglichen. Unter welchen Bedingungen homogene Keimbildung möglich ist, wäre ein interessantes Forschungsthema. Bei der Ölnebelschmierung wird durch ein- oder zweiphasige Druckzerstäubung gezielt ein Nebel erzeugt und auf die Schmierfläche geleitet. Minimalmengenschmierung [39-42] kann ein Synonym für Ölnebelschmierung sein, es kann aber auch durch Kanäle in Werkzeugen flüssiger Kühlschmierstoff an die Bearbeitungsstelle geleitet werden, so dass ohne gezielte Nebelerzeugung geschmiert wird. Der Einsatz von Nanofluiden in der Minimalmengenschmierung wurde von Shen [43] untersucht. Huang et al. [44] beschreiben eine Kombination aus Elektrospray-Verfahren und Minimalmengenschmierung. Ein Vergleich von Trockenbearbeitung, Minimalmengenschmierung und Überflutungsschmierung wurde von Sreejith untersucht [45]. Bei der Trockenbearbeitung können metallische Aerosole mit Partikelgrößen im Mikro- und Nanometerbereich entstehen [46, 47]. Durch den Zusatz von langkettigen Molekülen (Antinebelzusätze) kann versucht werden, die Nebelbildung durch Zerstäubung von Kühlschmierstoff zu verringern. Mit der Zeit kann es aber vorkommen, dass die Moleküle aufgespalten werden [48]. Die Neubildung von Tropfen aus abgeschiedener Flüssigkeit in Filtern, das sog. re-entrainment, wurde z.B. von Wurster et al. untersucht [49-51].

Ölnebelgeneratoren für Forschungszwecke arbeiten z.B. mit Zweistoffdüsen [52] oder mit Laskin-Düsen. In der Regel strömt der nicht vernebelte Anteil des Kühlschmierstoffs in ein Vorratsgefäß zurück. Dadurch gerät mit der Zeit das gesamte Flüssigkeitsvolumen in Kontakt mit der Vernebelungsluft, so dass Leichtersieder vermehrt verdunsten und abgereichert werden können. Es fehlte zu Beginn der vorliegenden Arbeit eine geeignete Ölnebelquelle auf der Basis von Zerstäubung, die eine Abreicherung von Leichtersiedern im verwendeten Kühlschmierstoff vermeidet. Diese zu entwickeln war Gegenstand der Forschungsarbeiten.

Von der Forschungsgruppe Höflinger wurde eine beheizbare, mit Kühlschmierstoff beaufschlagte Rotoreinheit als Aerosolgenerator eingesetzt [38]. Von der Forschungsgruppe Paur wurde ein Verdunstungsteller zur Ölnebelzeugung entwickelt [53].

Kühlschmierstoffdampf entsteht an allen Kontaktflächen von Kühlschmierstoff und Luft, d.h. auch auf Spänen, Wänden, Ölwannen, etc. Eine Minimierung der Dampfemission lässt sich u. a. durch eine Verringerung der Kontaktfläche erreichen. Dabei kann ein guter Spantransport und die Abdeckung bzw. Einhausung aller mit Kühlschmierstoff in Kontakt stehender Bereiche hilfreich sein. Auch eine Kühlung des eingesetzten Kühlschmierstoffs kann die Dampfemission reduzieren.

Verhalten:

Durch Verdunstungs- und Kondensationsprozesse sowie Koagulation, Deposition und Keimbildung kann sich die Ölfraucht sowohl zwischen den Phasen als auch zwischen verschiedenen Tropfengrößenklassen verschieben. Dies kann sowohl die Charakterisierung als auch die Abscheidung von Kühlschmierstoffnebeln erheblich erschweren. Die unterschiedlichen Dampfdrücke verschiedener Komponenten verkomplizieren die Situation zusätzlich. Es können drei Phasen vorhanden sein: Tropfenphase, Dampfphase, Flüssigphase z.B. an Wänden oder Filterfasern.

Modellierung:

Modelliert werden die Entstehung, die Erfassung, das Verhalten, die Abscheidung und der Einfluss von Messsystemen auf die Ölnebel. Modelle zur Entstehung von KSS-Neblen existieren z.B. von Bell et al. [26], Yue [32], Chen et al. [28, 29] und Atmadi, Stephenson, Liang [27]. Arbeiten von Raynor, Cooper, Leith [54] u.a. berücksichtigen die genaue Tropfenzusammensetzung bei der Modellierung des Verhaltens der Ölnebel. Der Einfluss der Tropfenverdunstung auf die Messung von Abscheidungsgraden wurde von ihnen allerdings noch nicht berechnet. Die Berechnung des Verdunstungseinflusses auf die Abscheidung und die Messtechnik ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Zur Verbesserung der Erfassung der Kühlschmierstoffaerosole wird Strömungssimulation eingesetzt, z.B. [55]. Ansätze in der Literatur zur Modellierung des Flüssig-

keitsverhaltens in Faserfiltern werden am Ende von Abschnitt 4.4.4 beschrieben, weitere Arbeiten zur Simulation in den untenstehenden Abschnitten dieses Kapitels.

#### Charakterisierung/Messtechnik:

Zu unterscheiden sind Expositionsmessungen, Emissionsmessungen und die Bestimmung von Abscheideleistungen. Expositionsmessungen werden in der Regel mit personenbezogenen tragbaren Probenahmegeräten, sogenannten „personal samp- lern“ durchgeführt [6, 56-64] und sollen die Belastung eines Arbeiters an einem durchschnittlichen Werktag messen. Da die Konzentration des Kühlschmierstoffne- bels starken Schwankungen unterliegt, kann ein erheblicher Teil der abgeschiedenen Tropfenmasse verdunsten [65]. Elektrofilter zeigen eine geringere Verdunstungsrate, da der Luftstrom besser von den abgeschiedenen Partikeln getrennt wird als bei Faser- oder Membranfiltern [66, 61]. Eine reine Bestimmung der Tropfenmasse reicht daher nicht aus, es sollte auch die gasförmige Konzentration gemessen werden. Virtu- elle Impaktoren zur Expositionsmessung wurden z.B. von Kim und Raynor [67] un- tersucht.

Zur Bestimmung der Abscheideleistung und der Emission von Kühlschmierstoffab- scheidern wird nahezu die gesamte Bandbreite der Aerosolmesstechnik eingesetzt. Ideale Probenahmebedingungen sind: isobare, isotherme, isokinetische Probenahme an einer repräsentativen Probenahmestelle mit einer möglichst kurzen, geraden, elektrisch leitfähigen geerdeten Probenahmeleitung, die keine inneren Querschnitts- veränderungen hat. Die Verschiebung der Stofffracht durch Verdunstung und Trop- fenabscheidung in Absaug-, Verdünnungs- und Messsystemen kann einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben.

Die Verdunstung von Öl von beladenen Filtern wurde sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht [65, 66, 68-76]. Der Großteil der Arbeiten untersucht das Durchströmen der beladenen Filter mit nebelfreier Luft. Forschungsarbeiten zur Ver- dunstung während der Filtration wurden von Cooper [75, 76] durchgeführt.

Um den dampfförmigen Anteil des Kühlschmierstoffs zu messen, muss die Tropfen- phase vorher mit einem Vorfilter abgetrennt werden. Die Verdunstung von Öl auf dem Vorfilter und an Wänden der Probenahmeleitung, aber auch der Feinstpartikel- durchtritt erhöhen den Messwert der Dampfkonzentration. Eine Untersuchung dieses Phänomens ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Mit dem Isokinetischen Probenahmesystem (IPS) [77-79], das am Institut für Arbeits- schutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) eingesetzt wird, kann sowohl die partikuläre als auch die dampfförmige Emission von nichtwassermischba- ren Kühlschmierstoffen ermittelt werden. Die Nebeltröpfchen werden dabei mit einem Glasfaserfilter aufgefangen, der Kühlschmierstoffdampf wird auf XAD-2 Adsorberharz absorbiert. Sowohl die abgeschiedenen Tröpfchen als auch der absorbierte Kühl- schmierstoff werden jeweils mit Tetrachlorethen eluiert und infrarotspektroskopisch quantifiziert. Dadurch wird sowohl ein Summenmesswert für die Tropfenphase als

auch ein Summenmesswert für die Dampfphase ermittelt. Der Messwert ist eine zeitliche Integration über die Probenahmedauer.

Um Tropfengrößenverteilungen zu bestimmen, gibt es Messverfahren für Einzelpartikel und Messverfahren für das Partikelkollektiv. Mit Messverfahren für Einzelpartikel kann der Fraktionsabscheidegradverlauf berechnet werden, indem das Messergebnis jeder Größenklasse im Roh- und Reingas verglichen wird. Bei Messverfahren für Einzelpartikel ist die Anzahlkonzentration nach oben begrenzt, da sich sonst zwei oder mehrere Partikel gleichzeitig im Messvolumen befinden (Koinzidenz). Bei höher konzentrierten Aerosolen ist eine Verdünnung notwendig. In Verdünnungsstrecken kann Tropfenverdunstung stattfinden. Mit Differentiellen Mobilitätsanalysatoren (DMA) können auch Einzeltropfen im Nanometerbereich gemessen werden. Die Tropfen werden elektrisch aufgeladen und in einem elektrischen Feld abgelenkt. Dabei strömen sie durch Spülluft, wo sowohl Tropfenverdunstung als auch unter speziellen Bedingungen Kondensation stattfinden kann.

Messungen des Partikelkollektivs setzen Annahmen bezüglich der Form der Partikelgrößenverteilung voraus. Bei bi- oder multimodalen Verteilungen oder bei Anwesenheit verschiedener Partikelsorten kann es daher zu Fehlern kommen. Eine Berechnung von größenabhängigen Abscheidegraden ist durch Messverfahren am Partikelkollektiv schwierig, da die Annahmen zur Form der Größenverteilung in manchen Bereichen negative oder falsche Abscheidegrade ergeben können. Eine Ausnahme sind Kaskadenimpaktoren, bei denen durch den Vergleich der einzelnen Stufen größenabhängige Abscheidegrade berechnet werden können. Der Druckverlust und die Überströmung der abgeschiedenen Tropfen in Impaktoren fördern allerdings die Verdunstung.

#### Abscheidung:

Die Erfassung von KSS-Nebeln wird entweder durch Einhausung bzw. Kapselung von Maschinen oder durch Absaugvorrichtungen in der Nähe der Bearbeitungsstelle erreicht.

Zur Abscheidung von Kühlschmierstoffnebeln werden hauptsächlich elektrostatische oder mechanische Feinstpartikelfilter eingesetzt. Prallplatten, Zyklone und Zentrifugalabscheider haben bei kleinen Tropfengrößen in der Regel deutlich niedrigere Abscheidegrade als leistungsfähige Filter. Prallplatten und Zyklone werden zum Teil als Vorabscheider eingesetzt. Bei speziellen Anwendungsfällen, wie z.B. brennbaren Stäuben, werden auch Nassabscheider eingesetzt. Abscheider mit Filtermedien sind meist mehrstufig ausgeführt, z.B. mit einem Metallgestrick als Vorabscheider und Faserfiltern, u. U. ein zusätzlicher Feinstpartikelfilter als Endstufe [80]. Dabei können sowohl dünne Filtermedien als auch Gestricke von beispielsweise 10 cm Dicke verwendet werden. Mechanismen der mechanischen Partikelabscheidung sind vor allem Trägheit, Diffusion und Sperreffekt.



Bei Zentralanlagen zur Kühlschmierstoffnebelabscheidung wird von jeder Erfassungsstelle eine Rohrleitung zum Abscheider benötigt. Die abgesaugte Luft wird in der Regel gereinigt und ins Freie geleitet. Der Aufwand für die Verrohrung und der hohe Luftwechsel stehen dem Vorteil einer vollständigen Entfernung der kühl-schmierstoffbelasteten Luft aus der Arbeitsatmosphäre gegenüber. Bei manchen Einzelanlagen wird mit Reinluftrückführung gearbeitet, d.h. die gereinigte Luft wird wieder nach oben in die Werkhalle abgegeben. Nicht abgeschiedene Feinstpartikel und die Dampfemission können so die Arbeitsatmosphäre belasten, falls keine vollständige Schichtlüftung erreicht werden kann.

Bei den üblicherweise zur Klassifizierung von Filtern verwendeten Normen (DIN EN ISO 16890 [81] (Vorgängernorm DIN EN 779 [82]), DIN EN ISO 29463 [83] (Vorgängernorm DIN EN 1822 [84]), ANSI/ASHRAE 52.2 [85]) ist keine Drainage vorgesehen. Die Abscheidegradmessung erfolgt zwar zum Teil mit einem flüssigen Prüfaerosol, dabei muss aber keine sehr hohe Aerosolmassenkonzentration erzeugt werden. Dadurch wird bei manchen gut speicherfähigen Filtermedien kein stationärer Zustand in Bezug auf die gespeicherte Flüssigkeitsmenge im Filter erreicht. Das Benetzungs-, Koaleszenz- und Drainageverhalten der abgeschiedenen Tropfen auf den Filterfasern kann einen maßgeblichen Einfluss auf die Abscheideleistung und den Druckverlust haben. Sowohl der Abscheidegradverlauf als auch die Dampfemission durch Verdunstung können stark von der Flüssigkeitsverteilung im Filter abhängen. Die Abscheideleistung kann durch die Beladung der Filterfasern mit Flüssigkeit tropfengrößenabhängig sowohl sinken als auch steigen [86], der Druckverlust steigt. Dieser Einfluss ist durch die Filterprüfung nach den oben genannten Normen nicht vollständig messbar. Zusätzlich zu der Bestimmung der genormten Filterklassen sind bei der Entwicklung von Kühlschmierstoffabscheidern Experimente unter praxisnahen Bedingungen mit praxistauglichen Kühlschmierstoffen notwendig. Generell werden bei der Entwicklung von Abscheidern für flüssige Aerosole häufig Flüssigkeiten vernebelt, die auch bei der praktischen Anwendung eingesetzt werden. Die Frage, ob die Messung tropfengrößenabhängiger Abscheidegrade von Tropfenverdunstung beeinflusst werden kann, ist von zentraler Bedeutung für die Filterentwicklung.

#### Verwandte Themengebiete:

Bei der Kurbelgehäuseentlüftung können Önebel auftreten, die bei Fahrzeugen eine Beeinträchtigung des Verbrennungsprozesses sowie erhöhte Emissionen und eine Verschmutzung von Bauteilen bewirken können. Der sogenannte Blow-by-Gasstrom kann in Fahrzeugen durch Partikelfilter, Zyklone, Impaktoren oder einen Tellerseparator gereinigt werden [87]. In Schiffen werden Önebeldetektoren verwendet, um Explosionsgefahren erkennen zu können [88- 90]. In schadhafte Gleitlagern können durch erhöhte Wärmeentwicklung Önebel entstehen. Bei Erdölbohrungen kann bei der Aufbereitung der Bohrlüssigkeit Öldampf und Önebel entstehen [91]. Die Erfassung und Abscheidung von Schweißrauch [92] sowie die Dämpfe und Aerosole in

der Kautschukindustrie [93] zeigen Parallelen zur Ölnebelproblematik. In Kompressoren können Ölnebel entstehen, die bei der Druckluftfiltration durch koaleszierende Filter entfernt werden [94, 95]. In der Abluft von Küchen werden Ölnebelabscheider eingesetzt. Das Verhalten von Bioaerosolen, die bei Atmung, Sprechen, Singen, Husten und Niesen erzeugt werden, zeigt Parallelen zu den wassergemischten Kühlschmierstoffen, da dort ebenfalls eine wässrige Phase und darin enthaltene schwerer flüchtige Stoffe und Partikel enthalten sein können, wie z.B. Viren.

Bisher fehlte ein Klassifikationssystem, mit dem Aerosole in technischen Prozessen bezüglich ihrer Flüchtigkeit eingeteilt und unterschieden werden können. Ein neues Konzept für ein solches Klassifikationssystem wird in Kapitel 6.3 beschrieben.

## **3 Aufbau und experimentelle Ergebnisse der Versuchsanlage des ITTK**

Am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Versuchsanlage zur Erzeugung, Charakterisierung und Abscheidung von Kühlschmierstoffnebeln aufgebaut.

### **3.1 Beschreibung der Versuchsanlage des ITTK**

#### **3.1.1 Aerosolerzeugung**

Es wurde eine rein thermische und eine rein mechanische Methode der Ölnebelzeugung verwendet:

##### **3.1.1.1 Verdunstungsteller: thermische Aerosolerzeugung**

Öl wird auf eine heiße Platte getropft. Der Öldampf vermischt sich mit der Umgebungsluft und wird ca. 15 cm über der Platte von der Öffnung des Rohrleitungssystems angesaugt. Am Rand der Platte befindet sich ein konzentrischer Ablauf mit einer Öffnung, durch die der nicht verdampfte Anteil des Öls abfließt. Zur Erzeugung besonders hoher Nebelkonzentrationen wurde ein größerer Verdunstungsteller eingesetzt, als der standardmäßig verwendete.

Das Prinzip der verwendeten Verdunstungsteller war von der Abteilung Aerosol- und Partikeltechnologie am Institut für Technische Chemie (ITC) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelt worden [53]. Das dort verwendete Konstruktionsprinzip wurde um einen Ablauf für die nicht verdunstete Flüssigkeit erweitert.

### 3.1.1.2 Aerosolgenerator: mechanische Aerosolerzeugung

Der Aerosolgenerator beruht auf dem Prinzip eines Minimalmengenschmiersystems, das am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfingsttal-Berghausen, entwickelt wurde [52]. Das Öl wird mit Druckluft in einer Zweistoffdüse zerstäubt. Es können bis zu drei Zweistoffdüsen gleichzeitig eingesetzt werden. Die Düsen sind wechselbar und die Düsengrößen werden entsprechend der benötigten Nebelmenge ausgewählt. Hiermit kann ein annähernd konstanter Nebel erzeugt werden, dessen volumetrisch gemittelter Durchmesser bei ungefähr 700 nm liegt. Die Partikelanzahlkonzentration ist durch die Regelung des Vordrucks der Druckluft von ca.  $10^4$  bis  $10^6$  Partikel/cm<sup>3</sup> einstellbar.

Der mit dem Verdunstungssteller erzeugte Nebel enthält nahezu keine Schwerststoffe, es verdunstet hauptsächlich die leicht und mittel siedenden Komponenten. Der Aerosolgenerator erzeugt dagegen Nebel, in denen alle Komponenten enthalten sind. Die entstandenen Tropfen sind nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung.

Als Dosiereinrichtung bei der Ölnebelzeugung mit dem Aerosolgenerator wurde die in Abb. 3.1.1 dargestellte Konstruktion entwickelt:

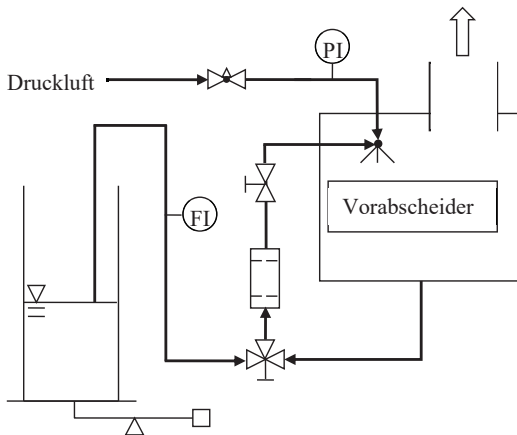


Abb. 3.1.1: Aerosolgenerator mit Dosiereinrichtung

Die Menge an Öl, die als Aerosol die Dosiereinrichtung verlässt, wird vom Aerosolgenerator aus dem Vorratsgefäß angesaugt. Das nicht vernebelte Öl wird in die Ansaugleitung zurückgeführt und dadurch erneut verdunstet. In der Ansaugleitung befindet sich ein Partikelfilter, um eine Verstopfung der Düse zu vermeiden. Mit einem Rotameter wird der Volumenstrom gemessen, der dem Vorratsgefäß entnommen wird. Eine Waage dient der Bestimmung der insgesamt vernebelten Ölmenge, aus der