



0 Einleitung

Die Stromerzeugung im Leistungsbereich mehrerer hundert Megawatt durch schwerölbetriebene Großdieselmotorenkraftwerke stellt eine Nischenanwendung dar. Doch konnte sich die MAN Diesel & Turbo vor wenigen Jahren in diesem Geschäftsfeld erfolgreich etablieren und dadurch neben der Erweiterung des Kompetenz- und Produktspektrums auch eine weitere Absatzquelle für Großdieselmotoren (Leistungsklasse >10 MW) erschließen.

Als einer von wenigen Anbietern schlüsselfertiger Großdieselmotorenkraftwerke kommt der MAN Diesel & Turbo neben der Entwicklung und Herstellung von Großdieselmotoren auch der Aufgabenumfang eines Generalunternehmers zu. Zusätzlich zur Komplexität, die die Abwicklung von Projekten dieser Größenordnung, insbesondere in anderen Wirtschafts- und Kulturräumen sowie Regionen ohne oder mit nur eingeschränkter Infrastruktur, mit sich bringt, ist die gesamte Betriebs- und Anlagentechnik eine große technische Herausforderung.

Obgleich in vielen Fällen auf Erkenntnisse aus der maritimen technischen Anwendung zurückgegriffen werden kann und Zulieferunternehmen mit Erfahrungswissen und Entwicklungswissen beitragen, müssen in einigen Fällen eigene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten betrieben werden. Die Zielsetzung ist dabei primär durch die Optimierung und Neugestaltung einzelner anlagentechnischer Apparate das Gesamtprodukt Großdieselmotoren-Kraftwerk effizienter und kostengünstiger zu gestalten.

Systeme zur Nebenstromreinigung des Schmieröls für die schwerölbetriebenen Großdieselmotoren sind derzeit üblicherweise mit sogenannten Tellerseparatoren ausgestattet. Das zugrundeliegende Trennprinzip für die Abscheidung von Kontaminanten aus dem Schmieröl ist der Dichteunterschied. Ein großer Nachteil dieser Reinigungssysteme ist jedoch die Betriebsweise, bei der notwendigerweise unter Hinzugabe von Wasser der Tellerseparator geleert bzw. abgereinigt wird. Der Betrieb dieser Anlagen geht so einher mit der Entstehung von wässrigen Schlämmen. Die Auftrennung dieses Dreiphasen-Systems stellt verfahrenstechnisch eine zusätzliche Herausforderung dar und ist mit hohen Kosten verbunden.

Angestrebt wird daher ein Verfahren für die Schmierölreinigung im Nebenstrom zu entwickeln, welches diesen betriebsbedingten Nachteil – also konkret die Entstehung



wässriger Schlämme – nicht mit sich bringt. Da für den Anwendungsfall in erster Linie Erfahrungswissen und empirische Erkenntnisse aus der Praxis vorliegen, ergibt sich ein Forschungsbedarf, diese Bereiche methodisch mit einer gesicherten Erkenntnisbasis zu unterlegen.

Als notwendigen Vorschrift für die Neuentwicklung einer Systemtechnik muss zum einen also der Anwendungsfall genau beleuchtet werden und die konkreten Anforderungen, insbesondere die Reinigungsleistung, ermittelt werden. Der nächste Schritt ist die Vorauswahl geeigneter Reinigungs- bzw. Trennverfahren. Bei der Entwicklung von verfahrenstechnischen Systemen muss meist, so auch im vorliegenden Fall, eine umfangreiche Vorarbeit für die Auswahl bzw. grundsätzliche Qualifikation stattfinden, um hernach eine vertiefte Untersuchung und konkrete technische Entwicklung vorzunehmen. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojektes aus dem diese Arbeit hervorgeht, wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und diverse Verfahren auch bis zum halbtechnischen Maßstab detailliert entwickelt. Präsentiert wird hier jedoch nur das Reinigungsprinzip, welches sich im Rahmen von Vorversuchen als am aussichtsreichsten erwies; entsprechend vertiefte Untersuchungen konnten für die Filtration mit rückspülbaren Automatikfilterapparaten die vollumfassende Qualifizierung zeigen.

Inhalt dieser Arbeit ist die Erörterung aller relevanten technisch-wissenschaftlichen Fragestellungen für den verfahrenstechnischen Teil des Reinigungssystems sowie die Herleitung der Grundlagen und eine Detaillierung, womit der technische Nachweis und Qualifikation des neuartigen Verfahrens erbracht werden soll.



1 Problemstellung und Aufbau der Arbeit

1.1 Detaillierung Anwendungsfall

Als Großdieselmotorkraftwerk werden im Anwendungsfall Kraftwerke bezeichnet, welche auf Basis mehrerer Großdieselmotoren (Einzelleistung 10-20 MW) Gesamtleistungen bis 1.000 MW erbringen. Die Einsatzfälle dieser Kraftwerksform sind vielfältig, exemplarisch sind *Peak Load* Anwendungen (beispielsweise Ferienregionen mit stark erhöhtem Strombedarf in den Sommermonaten), *Back-Up* Anwendungen (z.B. zur Sicherstellung der ununterbrochenen Energieversorgung bei Windkraftwerksanlagen im Flautenfall) und *Base Load* Anwendungen (z.B. für Industrieanlagen fernab von zentraler Strom-Infrastruktur) zu nennen. Häufig werden die Motoren mit vergleichsweise preisgünstigen Schwerölkraftstoffen betrieben; mit entsprechender Abgasnachbehandlungstechnik ist dies auch in Regionen mit Emissionsauflagen möglich.

Eine allgemeine Anforderung an das Gesamtkraftwerk ist eine autarke Betriebsweise; der Betrieb von Großdieselmotoren in der stationären Kraftwerksanwendung bedingt dabei eine Vielzahl anlagentechnischer Systeme. Beispielfähig können hier Kraftstoffförderungs- und -aufbereitungssysteme, Kühlwassersysteme einschließlich Radiatorenfelder und nicht zuletzt in zunehmendem Maße auch die genannten Abgasnachbehandlungssysteme genannt werden. Meist werden diese Anlagen von spezialisierten Zulieferern beschafft und in Form von Funktionseinheiten als sogenannte „Module“ eingesetzt. Die Module, als „Blackbox“ betrieben, verfügen dabei zum großen Teil über eine eigene Prozessleittechnik und werden teilweise nur hinsichtlich ihres binären Betriebsstatus rudimentär seitens der zentralen Kraftwerkssteuerung überwacht.

Für die Anlagentechnik im Kraftwerk können zwei Kategorien unterschieden werden: Gesamtkraftwerkssysteme und motorspezifische Systeme. Zum Gesamtkraftwerkssystem gehören Anlagen zur Aufbereitung wässriger Schlämme. Anlagen zur Nebenstromreinigung des Schmieröls stellen entsprechend motorbezogene Systeme dar; das bedeutet, dass pro Motor jeweils ein eigenes System vorgesehen ist.



1.2 Stand der Technik und Problemstellung

Die derzeit übliche Ausführungsform eines Schmierölsystems bei schwerölbetriebenen Großdieselmotoren ist in stark vereinfachter Form in Abbildung 1-1 dargestellt. Detailliertere Beschreibungen für Auslegungsgrundsätze und Systemaufbauten liefern insbesondere technische Berichte des Großmotoren-Konvents CIMAC [1] [2] [3].

Als Referenzmotor für den Betrachtungsfall wird die Maschine vom Typ 18V48/60 der MAN Diesel & Turbo SE definiert. Für die stationäre Energieerzeugung im Anwendungsfall stellt dieser Motor mit einer Nennleistung von 18.900 kW eine sehr häufig eingesetzte Variante und eine Maximalanforderung hinsichtlich der Größe dar. Für das Schmierölsystem kann, wie dargestellt, eine Aufteilung in Haupt- und Nebenstrom vorgenommen werden. Aufgabe des Hauptstroms ist die Versorgung des Motors mit Schmieröl in ausreichender Quantität und mit der notwendigen Temperatur. Mittels der Hauptstrompumpe (1) wird dabei im Motorbetrieb kontinuierlich Öl aus dem Systemtank (2) entnommen, mittels eines Wärmetauschers (3) auf die notwendige Temperatur abgekühlt (im vorliegenden Fall etwa 55°C) und mittels eines Automatikfilters (4) von groben Kontaminanten (nominelle Filterfeinheit typischerweise 20-34 µm) befreit, bevor es in den Motor (5) eintritt. Der Automatikfilter reinigt sich durch Rückspülung kontinuierlich ab; das durch Grobschmutzpartikeln angereicherte Rückspülöl wird zurück in den Systemtank gegeben (6). Der Filter agiert also als reine Schutzmaßnahme für den Motor, ein Schmutzaustrag aus dem System findet hier nicht statt.

Für den Dauerbetrieb ohne planmäßigen Ölwechsel ist ein System vonnöten, welches das Öl kontinuierlich in ausreichendem Maß von Kontaminanten befreit und diese aus dem System trägt. Dieser Prozess wird im Nebenstrom ausgeführt. Maßgabe für die Auslegung ist die Anforderung, dass der Systemtankinhalt rechnerisch sechs Mal pro Tag (24 h) durch den Nebenstrom zirkuliert und dort gereinigt wird. Da der Systemtank entsprechend der Motorleistung mit etwa 1 Liter Inhalt pro Kilowatt Motorleistung dimensioniert ist, ergibt sich für den betrachteten Motor ein Systemtankvolumen von ca. 19 m³; der Hauptkreislauf-Volumenstrom beträgt etwa 460 m³/h. Entsprechend der vorher genannten Auslegungsregel wird der Nebenstrom mit einem Volumenstrom von knapp 5 m³/h betrieben.

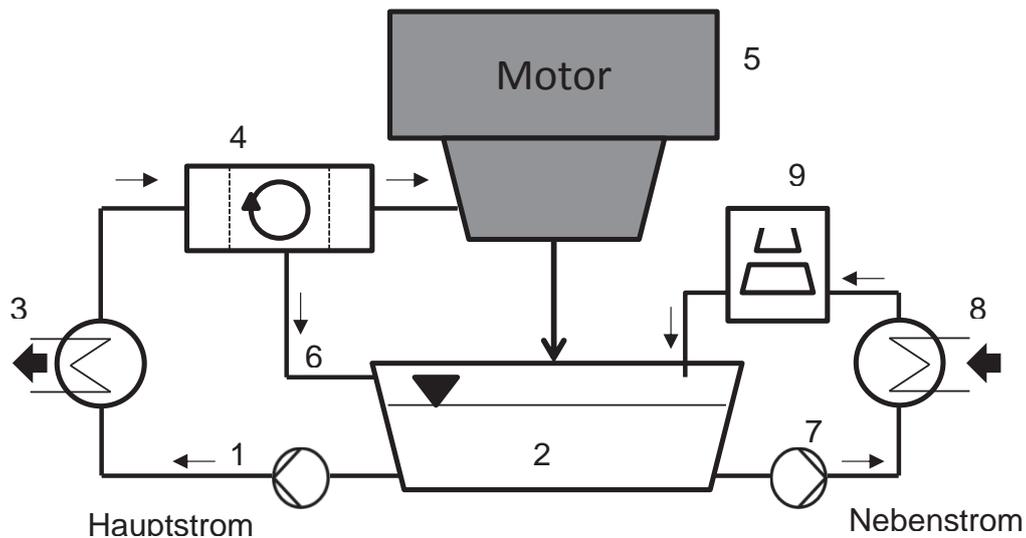


Abbildung 1-1 – Schematische Darstellung des Schmierölsystems eines 4-Takt-Großdieselmotors

Wie bereits erwähnt, wird derzeit üblicherweise ein Tellerseparator für die Reinigungsaufgabe im Nebenstrom verwendet. Aus diesem Grunde ist insbesondere neben der Förderpumpe (7) auch ein Wärmetauscher (8) im Nebenstrom integriert. Das Öl wird dadurch ausgehend von der Systemtanktemperatur von ca. 65°C auf 95°C aufgeheizt, um die Viskosität für die Dichtentrennung möglichst weit herabzusetzen. Um einen zuverlässigen Austrag des Schmutzes aus dem Tellerpaket und der Trommel des Separators (9) sicher zu stellen, wird der Separator typischerweise zeitgesteuert abgereinigt. Der Reinigungsprozess wird dabei gestoppt, die Separatortrommel mit Wasser gefüllt (das Öl wird dabei aus der Trommel gedrängt) und durch kurzzeitiges Absenken der unteren Trommelhälfte wird diese vollständig in einen Schlamm tank entleert. Die Beigabe von Wasser dient dabei zum einen den Ölverlust zu minimieren, zum anderen um eine ausreichende Reinigung von Trommel und Tellerpaket zu gewährleisten. Neben der Wassermenge, die für die Trommelfüllung benötigt wird, wird zusätzlich auch die Öffnung und Schließung der Trommel über eine wasserbetriebene Hydraulik bewerkstelligt [4]. Dieses Wasser wird, da Verunreinigungen nicht auszuschließen sind, ebenso in den Schlamm tank gegeben.

Der entstandene Schlamm, der weitestgehend aus Wasser besteht, muss nun in einer weiteren Verfahrensstufe wieder in seine Einzelbestandteile getrennt werden. Vornehmlich wird dabei versucht, eine Wasserphase so abzutrennen, dass diese hinsichtlich Öl- und Schmutzgehalt soweit abgereichert wurde, um sie



unproblematisch entsorgen zu können. Die notwendige Anlagentechnik zur Auftrennung dieses Dreiphasengemisches ist technisch aufwändig und mit hohen Kosten verbunden. Die Tatsache, dass in Kraftwerken üblicherweise eine größere Anzahl von Motoren installiert ist und die Kraftwerke meist von entsprechender Infrastruktur entfernt sind, verschärft diese Problemstellung für den Anwendungsfall durch die entsprechend skalierte Schlammmenge zusätzlich. Für ein Referenzkraftwerk mit 200 MW Leistung kann mit einer Separatorschlammmenge von mehreren Tonnen pro Tag gerechnet werden.

Abgesehen von der stationären Kraftwerksanwendung kann an dieser Stelle auch noch der maritime Anwendungsfall erwähnt werden; berücksichtigt man die etwa 50.000 schwerölbetriebenen Schiffe [5], welche derzeit auf den Weltmeeren verkehren, wird deutlich, wie groß die tatsächliche Gesamtpopulation der mit Schweröl betriebenen Anlagen (mit den genannten Nachteilen) anzunehmen ist.

Während sich die beschriebene Problematik leicht erschließt und die Bestrebungen nach einer neugestalteten Anlagentechnik naheliegend sind, stellt die Entwicklung einer neuartigen Reinigungssystematik eine große Herausforderung dar. So muss für den Betrieb im Schmierölsystem die passende Gleichgewichtssituation (Kontaminanten Ein- und Austrag) erreicht werden; dabei muss die Wechselwirkung aus dem komplexen Zusammenspiel der äußeren Randbedingungen und Einflussparameter berücksichtigt werden. Allein ein vollständiger Ölwechsel bedeutet bei einem 200 MW-Kraftwerk eine Ölmenge von knapp 200 m³, die entsorgt und neu aufgefüllt werden muss.

Ein neuartiges Reinigungssystem muss gegenüber dem etablierten Stand der Technik Betriebssicherheit und Automatisierungsgrad uneingeschränkt gewährleisten, um die für den Erfolg notwendige Akzeptanz zu erhalten. Dabei müssen alle denkbaren und möglichen Betriebsfälle berücksichtigt werden. Als Problemstellung für diese Arbeit ergibt sich zudem, dass im Vorfeld weder die präzisen Anforderungen an den Reinigungsnebenstrom bekannt waren, noch die Wechselwirkung von Einflussfaktoren und Randbedingungen für Betriebsfälle deterministisch beschrieben werden konnten.



1.3 Zielsetzung, Anspruch und Aufbau dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit und technisch-wissenschaftlicher Beitrag sind also die Qualifikation einer neuentwickelten Systematik für die Schmieröl-Nebenstromreinigung mittels einer alternativen Verfahrenstechnik.

Den ersten Schritt mit Hinblick auf die Fest-Flüssig-Trennaufgabe stellt die genaue Kenntnis des notwendigen Leistungsgrades und insbesondere auch die Möglichkeit der Messung und Bewertung dar. Die zweite zentrale Aufgabenstellung für die Verfahrensentwicklung besteht darin, alle denkbaren und möglichen Betriebsfälle zu berücksichtigen; dies ist trotz eines begrenzt durchführbaren experimentellen Umfangs sicherzustellen. Als Fragestellung ergibt sich daraus, wie dies durch die Anwendung geeigneter Modellierungen und Methoden darstellbar ist.

In Form von vorgelagerten Machbarkeitsstudien wurde die Filtration als grundsätzlich geeignetes Verfahrensprinzip identifiziert. Das Reinigungsverfahren Filtration beinhaltet die Teilprozesse Partikelabscheidung und Filterregeneration bzw. den Austrag der Partikel. Eine Kernanforderung für die genannte Reinigungssystematik ist ein automatisierbarer und prozesssicherer Betrieb. Die Betrachtung beider Teilprozesse und Ableitung der entsprechenden Gesetzmäßigkeiten ist dafür ein zentraler Gegenstand dieser Arbeit. Neben der Erfüllung einer ausreichend hohen Trennleistung eines Filters muss ferner auch dessen Langzeitverhalten betrachtet werden. Gleiches gilt für die Filterregeneration, welche mit technisch-ökonomisch umsetzbaren Maßnahmen in ausreichendem Umfang zuverlässig nachgewiesen werden muss. Da Ultraschall als Mittel zur Unterstützung der Filterregeneration eingesetzt werden soll, gilt es auch diesen Teilprozess hinsichtlich Wirkung und möglicher Schädigungseffekte genauestens zu betrachten.

Zusammengefasst ergeben sich im Wesentlichen für diese Arbeit folgende Thesen bzw. zu klärende Fragestellungen:

1. Ist es möglich, das Schmierölsystem und die aktuelle Nebenstromreinigungstechnik ausreichend genau zu beschreiben, um eine Spezifikation für die Trennaufgabe zu entwickeln?
2. Lässt sich eine Nebenstromreinigungssystematik basierend auf einem Dichtentrennverfahren mittels eines Filtrationsverfahrens ersetzen? Konkret beinhaltet dies folgende Teil-Fragestellungen: Ist ein ausreichender



Kontaminantenausstrag möglich? Und lässt sich ein Filter ausreichend wieder regenerieren?

3. Lässt sich die Bandbreite an möglichen Real-Betriebsszenarien mittels Kennwerten quantitativ beschreiben? Lassen sich diese Kennwerte für die technische Auslegung einer Real-Anlage quantitativ berücksichtigen und mithin dessen Betriebsverhalten prognostizieren?
4. Erlauben es die ermittelten Gesetzmäßigkeiten für das Prozessverhalten bei Filtration und Filterregeneration einen zuverlässigen Betrieb zu detektieren? Lässt sich ein Schadensfall im Betrieb durch die Anwendung umsetzbarer Maßnahmen erkennen?
5. Führt der Einsatz von Ultraschall zu einem mechanischen Schädigungseffekt durch sogenannte Kavitations-Erosion? Wie kann eine Prozessführung gestaltet werden, um dieses Risiko auszuschließen? Finden sich dazu Gesetzmäßigkeiten?
6. Lässt sich durch die Anwendung numerischer Methoden die Entwicklung des Filtersystems vereinfachen oder beschleunigen bzw. woran würden derartige Bestrebungen hauptsächlich scheitern?

Unter Berücksichtigung dieser Fragestellungen ergibt sich der Aufbau der Arbeit wie in Abbildung 1-2 dargestellt. Die erste Frage nach der Herleitung und Definition der Reinigungsaufgabenstellung wird in Kapitel 2 beantwortet. Die Herleitung und Vorqualifikation des offensichtlich alleinig geeigneten Filtermediums und dessen Charakterisierung wird in Kapitel 3 geliefert. Die abschließende Qualifikation und Charakterisierung für den Teilprozess Filtration für das Filtermedium wird in Kapitel 4 beschrieben und beantwortet dabei den entsprechenden Teil der zweiten Fragestellung. In diesem Kernkapitel wird gleichermaßen eine geeignete Modellierung für den Filtrationsprozess und eine abgeleitete Methodik beschrieben, welche als Antwort für die dritte Fragestellung herangezogen werden kann; ebenso ergibt sich daraus auch die Beantwortung der vierten Fragestellung. Als zweites Kernkapitel bezieht sich Kapitel 7 auf die Filterregeneration: mit Hilfe der vorgestellten Ergebnisse lässt sich die zentrale zweite Fragestellung abschließend beantworten, gleichermaßen können in diesem Abschnitt die dritte und vierte Fragestellung auch mit Hinblick auf den Filterregenerationsprozess beantwortet werden. In diesem Abschnitt wird auch die ultraschallüberlagerte Rückspülung



einschließlich ermittelter Gesetzmäßigkeiten beschrieben und hinsichtlich ihrer Wirkmechanismen diskutiert. Der Aspekt möglicher Schädigungseffekte durch Ultraschallkavitation wird gezielt in Kapitel 6 betrachtet und beantwortet mithin die fünfte Fragestellung. Generell wurde ein experimentell empirisches Vorgehen gewählt, wobei sich die Frage nach einer möglicherweise effizienteren Herangehensweise mit Hilfe numerischer Methoden stellt. Die fehlende Kenntnis der real wirkenden Haftkräfte stellt dafür jedoch ein wesentliches Hindernis dar, was in Kapitel 5 beschrieben wird; dadurch wird die sechste Fragestellung beantwortet.

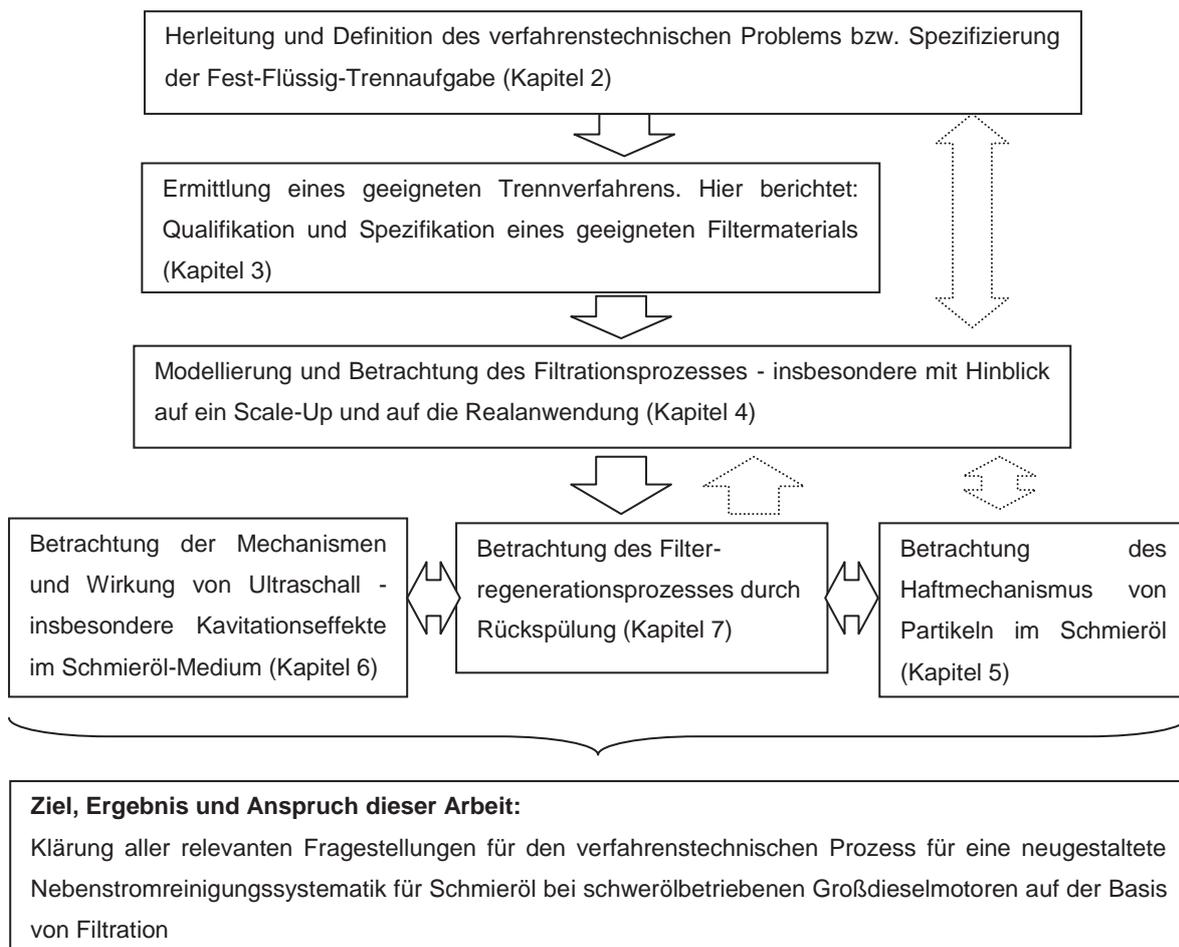


Abbildung 1-2 – Schematischer Aufbau dieser Arbeit

