
Antragsworkshop für ein
Schwerpunktprogramm der DFG

Komplexe Interaktion von Fluid und Festkörper in engen Spalten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Protokoll des Workshops vom 6. und 7. Februar 2019
Georg-Christoph-Lichtenberg-Haus, Dieburger Str. 241, 64287 Darmstadt

initiiert von

Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer, TU Dortmund

Dr.-Ing. Stefanie Hanke, Univ. Duisburg-Essen

Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz, TU Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Peter Reinke, HAWK Göttingen

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schweizer, TU Darmstadt

Dr.-Ing. Andreas Zabel, TU Dortmund

Dr. Mag. rer. nat. Florian Zaussinger, BTU Cottbus

gefördert durch die

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Inhaltsverzeichnis

1.....Programm des Workshops	3
2.....Teilnehmerliste	4
3.....Vortrag zur Einleitung und den Arbeitszielen des Workshops (Peter Pelz)	7
3.1. Forschungskontext	7
3.2. Arbeitsziele für den Workshop und Zeitplan	7
4.....Impulsvortrag Fluidenergiemaschinen (Peter Pelz).....	8
4.1. Ökonomische und ökologische Bedeutung der Fluidenergiemaschine	8
4.2. Nicht beherrschte Herausforderungen	8
4.3. Das Maschinenelement Spalt als Weak-Link der Fluidenergiemaschine.....	9
4.4. Forschungsbeispiele	9
5.....Impulsvortrag Tribologie (Stefanie Hanke).....	10
5.1. Grundlagen der Tribologie	10
5.2. Verschleißmechanismen	10
5.3. Forschungsbeispiele	10
6.....Impulsvortrag Fertigungstechnik (Andreas Zabel)	12
6.1. Oberflächenbestimmende Fertigungstechniken.....	12
7.....Diskussionsergebnisse	13
7.1. Beteiligte Wissenschaftler	13
7.2. Forschung im SPP	14
7.3. Lücken in Erkenntnis, Methoden und Technologien.....	15
8.....Demonstratorsysteme.....	16
8.1. Hardware-in-the-Loop-Demonstrator: gelagerter Rotor im durchströmten Spalt	16
8.2. Einfacher Rotor im optisch durchlässigen Hohlzylinder mit engem Dichtspalt	17
8.3. Dichtspalt am translatorisch bewegten Kolben.....	18
9.....Impressionen des Workshops.....	19
10....Anhang	24

1. Programm des Workshops

Der Einladungsflyer des Workshops ist im Anhang zu finden.

Mittwoch, 6. Februar

ab 13:00	Begrüßungskaffee
14:00	Eröffnung und Impulsvortrag Fluidenergiemaschinen - Peter Pelz
15:00	Impulsvortrag Tribologie - Stefanie Hanke
15:30	Impulsvortrag Fertigungstechnik - Andreas Zabel
16:00	Forscherallianzen - Networking und Finden von Antragspartnern mithilfe von mitgebrachten Forschungspostern
19:00	Abendessen

Donnerstag, 7. Februar

9:00	Eröffnung
9:15	Ideenmarkt - gemeinsames Entwickeln von interdisziplinären Ideen und Konzepten für eine SPP-Einrichtung
13:00	Resümee und Verabschiedung

2. Teilnehmerliste

Titel	Name	Vorname	Universität	Institut	E-Mail
M.Sc.	Angerhausen	Julian	RWTH Aachen University	Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme	julian.angerhausen@ifas.rwth-aachen.de
Prof.	Bartel	Dirk	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg	Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie	dirk.bartel@ovgu.de
M.Sc.	Bäuerle	Simon	Universität Kassel	Institut für Mechanik, Fachgebiet Technische Dynamik	baeuerle@uni-kassel.de
Dr.	Becker	Dina	Universität Stuttgart	Institut für Werkzeugmaschinen	dina.becker@ifw.uni-stuttgart.de
Prof.	Böhle	Martin	TU Kaiserslautern	Strömungsmechanik, Akustik & Strömungsmaschinen	martin.boehle@mv.uni-kl.de
Prof.	Brümmer	Andreas	TU Dortmund	Fachgebiet Fluidtechnik	andreas.bruemmer@tu-dortmund.de
Dr.	Daniel	Christian	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg	Institut für Mechanik	christian.daniel@ovgu.de
Dr.	Edelmann	Jan	Fraunhofer	Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik	jan.edelmann@iwu.fraunhofer.de
Dr.	Engler	Tom	TU Darmstadt	Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, MPA-IfW	engler@mpa-ifw.tu-darmstadt.de
Dipl.-Ing.	Feldmeth	Simon	Universität Stuttgart	Institut für Maschinenelemente	simon.feldmeth@ima.uni-stuttgart.de
M.Sc.	Fischer	Felix	RWTH Aachen University	Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme	felix.fischer@ifas.rwth-aachen.de
M.Sc.	Flegler	Felix	TU Darmstadt	Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen	flegler@ptu.tu-darmstadt.de
M.Sc.	Froitzheim	Andreas	BTU Cottbus	Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre	andreas.froitzheim@b-tu.de
PD Dr.	Hackert-Oschätzchen	Matthias	TU Chemnitz	Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse	matthias.hackert@mb.tu-chemnitz.de
Dr.	Hanke	Stefanie	Universität Duisburg-Essen	Werkstofftechnik	stefanie.hanke@uni-due.de
Prof.	Hetzler	Hartmut	Universität Kassel	Institut für Mechanik, Fachgebiet Technische Dynamik	hetzler@uni-kassel.de
Jun.-Prof.	Hussong	Jeanette	Ruhr-Universität Bochum	Institut für Thermo- und Fluidodynamik	jeanette.hussong@rub.de
Dr.	Ivantysyn	Roman	TU Dresden	Institut für Mechatronischen Maschinenbau	roman.ivantysyn@tu-dresden.de
Prof.	Kaiser	Sebastian	Universität Duisburg-Essen	Institut für Verbrennung und Gasdynamik	sebastian.kaiser@uni-due.de
Dr.	Kirsch	Benjamin	TU Kaiserslautern	Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation	benjamin.kirsch@mv.uni-kl.de
M.Sc.	Klink	Artur	TU Darmstadt	Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, MPA-IfW	klink@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

Titel	Name	Vorname	Universität	Institut	E-Mail
M.Sc.	Klose	Jan	Karlsruher Institut für Technologie	Institut für Produktionstechnik	Jan.Klose@kit.edu
Dr.	Koch	Rainer	Karlsruher Institut für Technologie	Institut für Thermische Strömungsmaschinen	rainer.koch@kit.edu
Dr.	Kriegseis	Jochen	Karlsruher Institut für Technologie	Institute of Fluid Mechanics	kriegseis@kit.edu
Prof.	Kruggel-Emden	Harald	TU Berlin	Fachgebiet Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitung	kruggel-emden@tu-berlin.de
Dr.	Lambie	Benjamin	TU Darmstadt	Center of Smart Interfaces	lambie@tfi.tu-darmstadt.de
Prof.	Liebich	Robert	TU Berlin	Fachgebiet Konstruktion und Produktzuverlässigkeit	robert.liebich@tu-berlin.de
Dr.	Linsler	Dominic	Fraunhofer IWM	Mikrotribologie Centrum μ TC	dominic.linsler@iwm.fraunhofer.de
M.Sc.	Liu	Hui	RWTH Aachen	Werkzeugmaschinenlabor	H.Liu@wzl.rwth-aachen.de
Dr.	Ludwig	Gerhard	TU Darmstadt	Institut für Fluidsystemtechnik	gerhard.ludwig@fst.tu-darmstadt.de
Dipl.-Ing.	Maier	Walther	Universität Stuttgart	Institut für Werkzeugmaschinen	walther.maier@ifw.uni-stuttgart.de
M.Sc.	Meurer	Markus	RWTH Aachen	Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren - Werkzeugmaschinenlabor	M.Meurer@wzl.rwth-aachen.de
Prof.	Molter	Jürgen	Hochschule Mannheim	Kompetenzzentrum Tribologie	j.molter@hs-mannheim.de
Prof.	Moseler	Michael	Universität Freiburg/Fraunhoferinstitut für Werkstoffmechanik	Physikalisches Institut/Geschäftsfeld Tribologie	michael.moseler@iwm.fraunhofer.de
M.Sc.	Müller	Lutz	TU Dresden	Institut für Mechatronischen Maschinenbau	lutz.mueller@tu-dresden.de
M.Sc.	Neu	Marcel	TU Darmstadt	Instituts für Produktentwicklung und Maschinenelemente	neu@pmd.tu-darmstadt.de
Dipl.-Ing.	Nikolov	Alexander	TU Dortmund	Fachgebiet Fluidtechnik	alexander.nikolov@tu-dortmund.de
Prof.	Oberlack	Martin	TU Darmstadt	Fachgebiet Strömungsdynamik	office@fdy.tu-darmstadt.de
Prof.	Pelz	Peter	TU Darmstadt	Institut für Fluidsystemtechnik	peter.pelz@fst.tu-darmstadt.de
M.Sc.	Pronobis	Tomasz	TU Berlin	Fachgebiet Konstruktion und Produktzuverlässigkeit	tomasz.pronobis@tu-berlin.de
Prof.	Reinke	Peter	HAWK Göttingen	Lehrgebiet Fluidtechnik	peter.reinke@hawk.de
Dipl.-Ing.	Reitz	Rüdiger	TU Darmstadt	Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, MPA-IfW	reitz@mpa-ifw.tu-darmstadt.de
Prof.	Rienäcker	Adrian	Universität Kassel	Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, Professur Maschinenelemente und Tribologie	sekretariat@uni-kassel.de
M.Sc.	Robrecht	Robin	TU Darmstadt	Institut für Fluidsystemtechnik	robin.robrecht@fst.tu-darmstadt.de

Titel	Name	Vorname	Universität	Institut	E-Mail
Dipl.-Ing.	Schmidt	Torsten	Fraunhofer IWU	Machine Tools and Forming Technology	torsten.schmidt@iwu.fraunhofer.de
Prof.	Schmitz	Katharina	RWTH Aachen	Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme	katharina.schmitz@ifas.rwth-aachen.de
Dr.	Schneider	Johannes	Karlsruher Institut für Technologie	Institut für Angewandte Materialien	johannes.schneider@kit.edu
Prof.	Schweizer	Bernhard	TU Darmstadt	Institut für Angewandte Dynamik	schweizer@ad.tu-darmstadt.de
Prof.	Seemann	Wolfgang	Karlsruher Institut für Technologie	Teilinstitut Dynamik/Mechatronik	wolfgang.seemann@kit.edu
M.Sc.	Shorbagy	Ahmed	TU Dresden	Institut für Mechatronischen Maschinenbau	ahmed.el_shorbagy@tu-dresden.de
Dipl.-Ing.	Stangier	Dominic	TU Dortmund	Lehrstuhl für Werkstofftechnologie	dominic.stangier@udo.edu
Dr.	Stehle	Thomas	Universität Stuttgart	Institut für Werkzeugmaschinen	thomas.stehle@ifw.uni-stuttgart.de
M.Sc.	Taubert	Paul	TU Darmstadt	Institut für Fluidsystemtechnik	paul.taubert@fst.tu-darmstadt.de
M.Sc.	Thiel	Gerd	Hochschule Mannheim	Kompetenzzentrum Tribologie	g.thiel@hs-mannheim.de
Dipl.-Ing.	Thielen	Stefan	TU Kaiserslautern	Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik	stefan.thielen@mv.uni-kl.de
Prof.	Tillmann	Wolfgang	TU Dortmund	Lehrstuhl für Werkstofftechnologie	wolfgang.tillmann@udo.edu
M.Sc.	Torner	Benjamin	Universität Rostock	Lehrstuhl für Strömungsmaschinen	benjamin.torner2@uni-rostock.de
Prof.	Wang	Yongqi	TU Darmstadt	Fachgebiet Strömungsdynamik	wang@fdy.tu-darmstadt.de
M.Sc.	Wittek	Matthäus	Hochschule Mannheim	Kompetenzzentrum Tribologie	m.wittek@hs-mannheim.de
Jun.-Prof.	Woschke	Elmar	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg	Institut für Mechanik	elmar.woschke@ovgu.de
Prof.	Wurm	Frank-Hendrik	Universität Rostock	Lehrstuhl für Strömungsmaschinen	hendrik.wurm@uni-rostock.de
PD Dr.	Zabel	Andreas	TU Dortmund	Institut für Spanende Fertigung	zabel@isf.de
Dr.	Zaussinger	Florian	BTU Cottbus	Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre	florian.zaussinger@b-tu.de

3. Vortrag zur Einleitung und den Arbeitszielen des Workshops (Peter Pelz)

Herr Prof. Pelz begrüßt stellvertretend für die sieben Initiatoren und als Gastgeber. Er bedankt sich bei der DFG für die finanzielle Unterstützung.

3.1. Forschungskontext

Der Workshop hat zum Ziel, einen SPP-Antrag nach dem Bottom-up-Prinzip zu gestalten. Das Forschungsthema und der Forschungskontext sind vorgegeben:

Komplexe Interaktion von Fluid und Festkörper in engen Spalten von Fluidenergiemaschinen verstehen und gestalten.

Eine erfolgreiche Bearbeitung des Themas erfordert Forschung an den Grenzen der Disziplinen: D.h. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die in unterschiedlichen DFG-Fachkollegien (DFG 401, 402, 404, 405, 406) beheimatet sind, müssen kooperieren.

Die Aktualität des Themas und das Interesse dafür zeigt die erstaunlich rege Resonanz: An den beiden Tagen des Workshops, dem 6. und 7. Februar, sind im Lichtenberghaus der TU Darmstadt 63 (!) Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus 38 Fachgebieten vertreten.

3.2. Arbeitsziele für den Workshop und Zeitplan

Die Arbeitsziele für den Workshop sind

- (i) Forschungslücken aufzuzeigen,
- (ii) interdisziplinäre Projektskizzen zu erarbeiten, mit denen diese Forschungslücken geschlossen werden können und
- (iii) Vorschläge zu gemeinschaftlichen Demonstratoren zu erarbeiten.

Zeitplan zur Einrichtung des Schwerpunktprogramms:

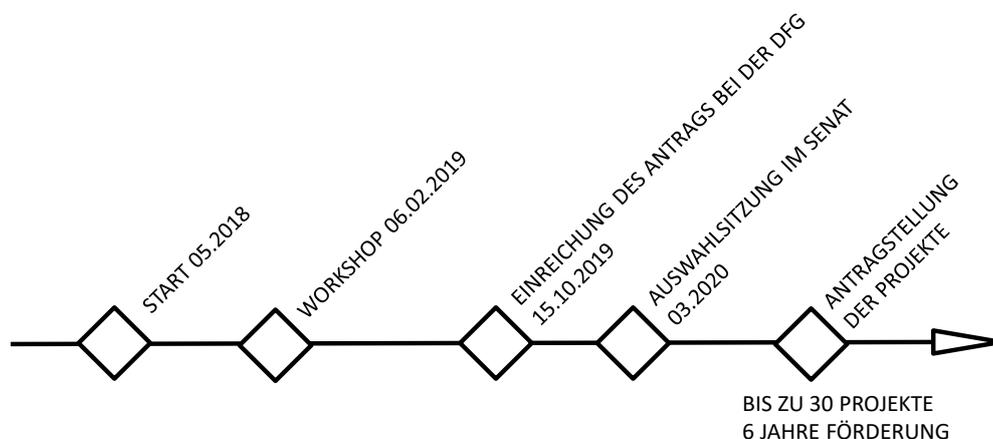


Bild 1: Zeitplan für den weiteren Antragsprozess.

4. Impulsvortrag Fluidenergiemaschinen (Peter Pelz)

Die Folien zum Impulsvortrag von Herrn Pelz sind im Anhang zu finden.

4.1. Ökonomische und ökologische Bedeutung der Fluidenergiemaschine

Fluidenergiemaschinen sind die Möglichmacher der modernen Welt: Energie- und Wasserversorgung, chemische Produktion, Halbleiterfertigung sowie Antriebssysteme sind ohne Fluidenergiemaschinen nicht denkbar. Die energetische und ökonomische Bedeutung wird durch zwei Zahlen deutlich: Erstens, jedes dritte Windrad und jedes dritte Kraftwerk wird allein benötigt, um Fluidarbeitsmaschinen anzutreiben. Zweitens, jeder zehnte Exporteuro in Deutschland wird mit einer Fluidenergiemaschine verdient.

4.2. Nicht beherrschte Herausforderungen

Die Zukunft der Fluidenergiemaschine, sei es ein Verdichter, eine Vakuumpumpe, eine Verdrängermaschine oder eine Turbine, birgt drei Herausforderungen. Diesen dreien kann mit dem derzeitigen Erkenntnisstand in Methoden und Technologien nicht ausreichend begegnet werden:

- (i) *Transienter Teillast-Betrieb:* Durch Flexibilisierung von Produktion und Volatilität von Wind und Sonne arbeiten Maschinen heute intermittierend; variable Drehzahl sowie Teillastbetrieb sind der Normalfall und nicht mehr die Ausnahme. Die Maschinenelemente wie durchströmte Lager- oder Dichtspalte befinden sich häufig nicht im Gleichgewichtszustand; Intervalle der Festkörperreibung, Mischreibung und hydrodynamischer Betrieb wechseln sich permanent ab.
- (ii) *Gesteigerte Leistungsdichte:* In den letzten Jahrzehnten wurde die Antriebsleistung von Kesselspeisepumpen von 2 auf 50 MW und der Förderdruck von 200 bar auf 400 bar gesteigert. Die damit einhergehende Leistungsdichte von Kraftwerkspumpen wird in erster Linie durch Drehzahlsteigerung auf 6000 rpm erreicht. Mit zunehmender Drehzahl sinkt bekanntlich sowohl Sommerfeld- als auch Kavitationszahl. Die sinkende Sommerfeldzahl führt zu verringerter Lagersteifigkeit, die geringere Kavitationszahl zu Mehrphasenbetrieb von Lager und Dichtung. Beides sind Effekte, die die Beherrschung von Rotordynamik entscheidend erschweren und in ihrer gekoppelten Auswirkung auf die Verfügbarkeit nicht ausreichend verstanden sind.
- (iii) *Individualisierung und Stückzahl Eins:* Um im globalen Markt zu bestehen, werden Maschinen aus Deutschland häufig individuell auf Kundenwünsche angepasst. Bei Stückzahl Eins ist die Beherrschung der Maschinenschwachstellen essentiell. Auslegungssicherheit setzt minimale Modellunsicherheit voraus. Diese ist heute nicht gegeben.

4.3. Das Maschinenelement Spalt als Weak-Link der Fluidenergiemaschine

- (i) *Maschinenversagen* nimmt häufig im Spalt von Lager oder Dichtung seinen Anfang: hier akkumulieren sich Schäden durch Festkörperreibung, Überhitzung und Kavitation.
- (ii) *Maschineninstabilität* hat im Spalt ihre Ursache: Fluid-Whirl und Fluid-Whip im Spalt machen den Rotor instabil; beide Effekte sind bei Mehrphasenströmung infolge Ausgasen oder Kavitation nicht verstanden.
- (iii) *Maschinenfunktion* ist durch den Spalt bestimmt: Bei Vakuumpumpen ist der Spalt das funktionsbestimmende Element; bei Dichtungen und Lagern ist er sowohl effizienz- als auch funktionsbestimmend.

Die Funktion von durchströmten Spalten ist es, Last zu tragen, Leckage zu vermeiden, Reibung zu reduzieren und Kühlung zu gewährleisten. Ein enger Spalt reduziert die Leckage und steigert die Traglast, erhöht aber die Reibung und umgekehrt. Die heute anzutreffenden technologischen Lösungen sind daher bestenfalls Pareto-optimal – und zwar im Spannungsfeld zwischen Funktion, Aufwand und Verfügbarkeit.

Widersprüche in den Zielen aufzulösen gelingt nur mit kreativer Systemsynthese, dem eigentlichen Kern der Ingenieurwissenschaften. Die Systemsynthese hat zur Aufgabe, die komplexe Interaktion von Fluid und Festkörper im engen Spalt so zu gestalten, dass die Pareto-Linie verschoben wird. Dies gelingt nur durch neue Technologien; ein schönes Beispiel hierfür ist das Folienlager. Bei diesem ist die Nachgiebigkeit des Mediums mit der Nachgiebigkeit der elastischen Strukturelemente, der Folie, in Reihe geschaltet. Damit erhöht das System die Rotorstabilität im transienten Betrieb.

4.4. Forschungsbeispiele

In der Kavitationsforschung wird die Keimbildung an strukturierten Oberflächen untersucht. Bei Spaltströmungen wird an einer Methode gearbeitet, die hydrodynamische Schmierung und Bulk-Flow-Ansätze vereint und die zuverlässige Vorhersage von dynamischen Kräften der Fluid-Struktur-Interaktion ermöglicht. Die Arbeiten zum Wandgleiten finden derzeit auf der kontinuumsmechanischen Skala sowie der Systemskala statt und sollen bessere Vorhersagen zum Verhalten von relevanten Tribosystemen ermöglichen.

5. Impulsvortrag Tribologie (Stefanie Hanke)

Die Folien zum Impulsvortrag von Frau Hanke sind im Anhang zu finden.

5.1. Grundlagen der Tribologie

Tribologie erforscht Reibung und Verschleiß, Schmierung und Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Festkörpern und zwischen Festkörpern und Fluiden. In der Tribologie werden immer Systeme betrachtet, so wird als Beispiel die Systemgröße Reibungskoeffizient genannt. Ein Tribosystem wird von Grund- und Gegenkörper bzw. Fluid, von Schmierstoff und Umgebungsmedium und vom Beanspruchungskollektiv bestimmt. Reibungs- und Verschleißprozesse sind die Folge und können in ihrer Ausprägung und Art für verschiedene Systeme stark variieren.

5.2. Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismen sind diejenigen Mechanismen, die oberflächige Veränderungen und Materialabtrag von Grund- und/oder Gegenkörper verursachen. Diese Mechanismen können mechanisch oder chemisch dominiert, von plastischer Verformung der Oberfläche oder von der zyklischen Akkumulation kleiner elastischer Dehnungen bestimmt sein. Verschleißmechanismen können in die vier elementaren Gruppen

- tribochemische Reaktionen,
- Oberflächenzerrüttung,
- Abrasion und
- Adhäsion

eingeteilt werden. Die typischen Verschleißraten der Mechanismen steigen in der Reihenfolge der Aufzählung an. Ein Verständnis der auftretenden Verschleißmechanismen erlaubt die gezielte Optimierung eines tribologischen Systems, indem z.B. Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe an die Belastung angepasst werden.

5.3. Forschungsbeispiele

Es werden zwei Beispiele aus der Forschung des ITM der Univ. Duisburg-Essen vorgestellt, in denen Verschleißversuche an Werkstoffen jeweils in zwei verschiedenen mikrostrukturellen Zuständen durchgeführt wurden.

Untersuchungen zum Gleitverschleiß an gehärtetem Stahlguss und einer thermomechanisch behandelten Variante des gleichen Werkstoffes wurden vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass eine feinere, homogene, martensitische Mikrostruktur hoher Härte im thermomechanisch behandelten Zustand unter Gleitverschleiß keine Vorteile bringt. Stattdessen erhöhte sich bei hohen Kontaktdrücken sogar die Verschleißrate. Dies wurde dadurch verursacht, dass bei geringeren Kontaktdrücken tribochemische Reaktionen dominieren, die in beiden Werkstoffzuständen gleichermaßen auftreten. Bei hohem Druck treten jedoch vermehrt Ermüdungsrisse und Delaminationen auf (Verschleißmechanismus Oberflächenzerrüttung). Hier ist eine hohe Härte von Nachteil, da sie mit einer Verringerung der Duktilität und Bruchzähigkeit einhergeht und somit Rissinitiierung und Risswachstum begünstigt bzw. beschleunigt werden.

Als weiteres Beispiel wird Kavitationserosion an einer Chromlegierung, ebenfalls im Guss- und im thermomechanisch behandelten Zustand, vorgestellt. Kavitation als Schädigungsmechanismus wird an

einem generischen Experiment untersucht. Ein Ultraschallschwinger erzeugt Kavitation über einer polierten Materialprobe. Durch Untersuchung und Wiegen der Proben in definierten Intervallen können die auftretenden Schädigungsmechanismen und die Erosionsrate identifiziert werden. Der Gusszustand weist hierbei eine fast dreimal so hohe Verschleißrate auf, wie der thermomechanisch behandelte Zustand. Dies wird durch die feinere, homogenere Mikrostruktur des behandelten Werkstoffes verursacht. Da in der zweiphasigen Mikrostruktur die weichere Phase bevorzugt abgetragen wird, führt eine reduzierte Korngröße zu einer Verlangsamung des Materialabtrags, weil die Volumina der versagenden Phasenbereiche kleiner sind. Unter dem bei Kavitation auftretenden Lastkollektiv bringt eine Feinung der Mikrostruktur also einen deutlichen Vorteil.

Es wird abschließend festgestellt, dass abhängig vom jeweiligen Tribosystem und dem Lastkollektiv neben der Mikrostruktur auch weitere Einflüsse entscheidend für das Verschleißverhalten sein können. Als Beispiele sind chemische Prozesse wie Schmierstoffalterung oder Diffusionsprozesse genannt, aber auch die fertigungsbedingte Oberflächentopographie und dadurch bedingte Kontaktsituation. Letztere bestimmt insbesondere in Festkörperkontakten über die Höhe der Reibleistung, die lokal in die Oberflächen eingebracht wird und für die auftretenden Verschleißmechanismen und -raten entscheidend sein kann. Die Modellierung von Verschleißmechanismen basiert bis heute größtenteils auf rein empirischen Methoden, bis heute fehlen physikalisches Verständnis und Modelle.



Bild 2: Impulsvortrag Tribologie von Frau Dr. Hanke.

6. Impulsvortrag Fertigungstechnik (Andreas Zabel)

Die Folien zum Impulsvortrag von Herrn Zabel sind im Anhang zu finden.

6.1. Oberflächenbestimmende Fertigungstechniken

Der Vortrag stellt verschiedene Fertigungstechniken zur gezielten Erzeugung und Optimierung von Oberflächen für verschiedene Anwendungen dar. Dabei stehen die Methoden der Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide im Fokus, da sie in der Regel als finale Prozessschritte zur Erzeugung der Oberflächen genutzt werden. Trotzdem werden auch das Hochvorschubfräsen, das Mikrofräsen und das elektrochemische sowie lasergestützte Abtragen dargestellt.

Beginnend mit der Oberflächenfunktionalisierung, ein neu aufkommendes Forschungsgebiet, durch die Fertigungsverfahren Hochvorschub- und Mikrofräsen, NC-Formschleifen und PECM (elektrochemisches Abtragen) stellt der Vortrag die gezielte Erzeugung bestimmter Funktionseigenschaften von Oberflächen für verschiedene technische Anwendungen (z. B. für die Umformtechnik) dar. Es folgen mit dem Nassstrahlspanen und dem Innenrundschäl Schleifen Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. In Bezug auf das Letztere sind vor allem die umfangreichen Simulationsmöglichkeiten hervorzuheben, die eine Vorhersage von Prozessergebnissen (also der hergestellten Oberflächen) und damit eine simulationsgestützte Planung der Bearbeitungsschritte für die Erzeugung bestimmter Oberflächentopographien erlauben.

Oberflächenfunktionalisierung

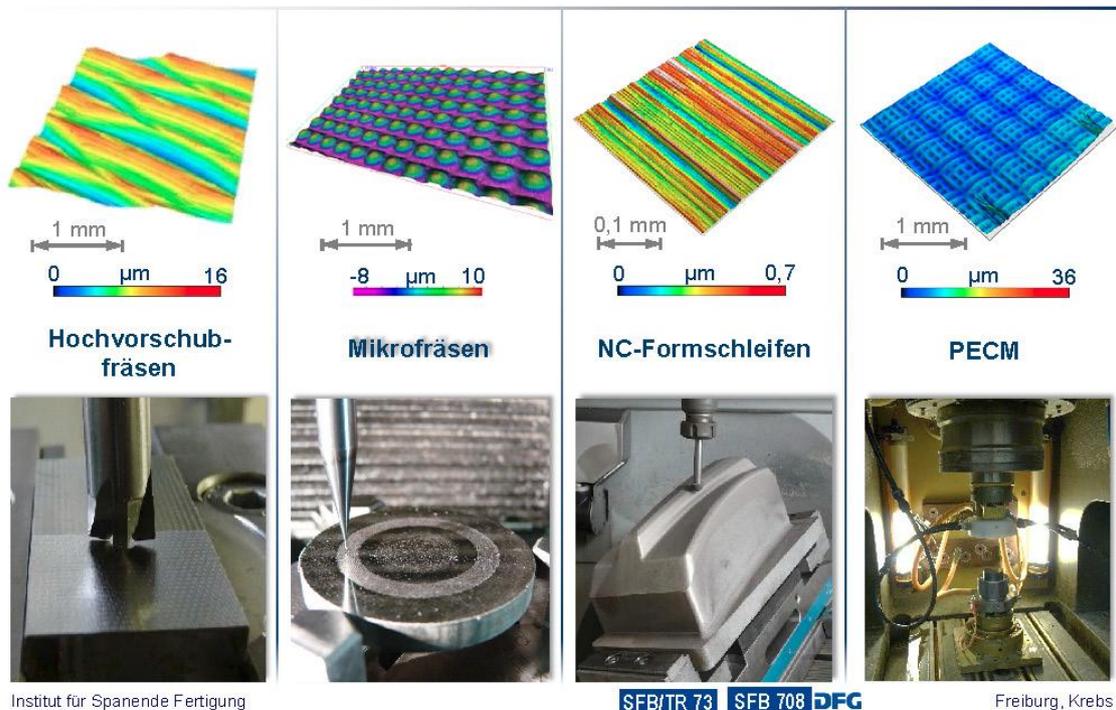


Bild 3: Fertigungsverfahren zur Oberflächenfunktionalisierung.

Wiederum für Anwendungen aus der Umformtechnik stehen dann die Verfahren des Festklopfens und die Feinbearbeitung von beschichteten Bauteilen im Mittelpunkt der Darstellungen.

Abschließend werden die Potenziale von Feinstbearbeitungsprozessen, wie dem Microfinishen zur Herstellung von mikroskopischen Oberflächenstrukturen erläutert. Hierbei geht es vor allem um die gezielte Erzeugung von Oberflächentopographien. An dieser Stelle ergibt sich auch die zurzeit engste Verbindung zum geplanten SPP, denn diese Verfahren wurden zumindest prototypisch bereits für die Fertigung bzw. Optimierung von Schraubenrotoren eingesetzt. Der Vortrag endet mit einer kurzen Darstellung der Möglichkeiten, welche die Laserbearbeitung bietet.

7. Diskussionsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst, die sich aus Einzelgesprächen, den interdisziplinären Projektideen und der Plenumsdiskussion ergeben haben. Enge Spalte sind das schwächste Maschinenelement – der Weak-Link – von Fluidenergiemaschinen. Die komplexe Interaktion von Fertigung, Material, Fluid sowie Rotor sind nicht verstanden. Dies betrifft insbesondere den transienten Betrieb unter komplexer Interaktion. Gerade heute ist das Thema von Interesse, da die Anforderungen an Fluidenergiemaschinen wesentlich wachsen.

7.1. Beteiligte Wissenschaftler

Aus der Zusammensetzung der Teilnehmer ergeben sich fünf Fachgruppen für das SPP. Die vertretenen Gruppen sind in Bild 4 dargestellt: (A) Fluidenergiemaschinen und Strömungsmechanik, DFG Fachkollegium 404; (B) Konstruktion und Mechanik/Tribologie 402; (C) Fertigungs- und Werkstofftechnik/Tribologie, 401, 405; (D) Struktur- und Rotordynamik, 402. Jedes Projekt im SPP soll aus einem Antragsteller aus Bereich A und mindestens einem Antragsteller aus einem anderen Bereich zusammengesetzt sein. Kolleginnen und Kollegen aus der Gemisch-Thermodynamik sowie der Oberflächen- und Polymerchemie waren noch nicht eingeladen, jedoch werden auch Beiträge aus diesem Bereich im SPP als positiv gewertet. Das Forschungsgebiet Verbrennungskraftmaschinen soll ausgeklammert werden. Es sollen tragende und dichtende Spalte im Fokus der Projekte stehen, Spalte zwischen Schaufel (mit Auftrieb/Zirkulation) und Gehäuse sollen jedoch nicht betrachtet werden.

Beispielhaft kann auf die Forschungsfrage „Wie können relevante Effekte im Spalt beim Hochlauf/im transienten Betrieb verlässlich wiedergegeben werden?“ ein interdisziplinäres Projekt aus dem Bereich A. Fluidenergiemaschinen/Strömungsmechanik, B. Mechanik/Tribologie und D. Rotordynamik eine Antwort liefern.

komplexe Interaktion von Fluid und Festkörper in engen Spalten

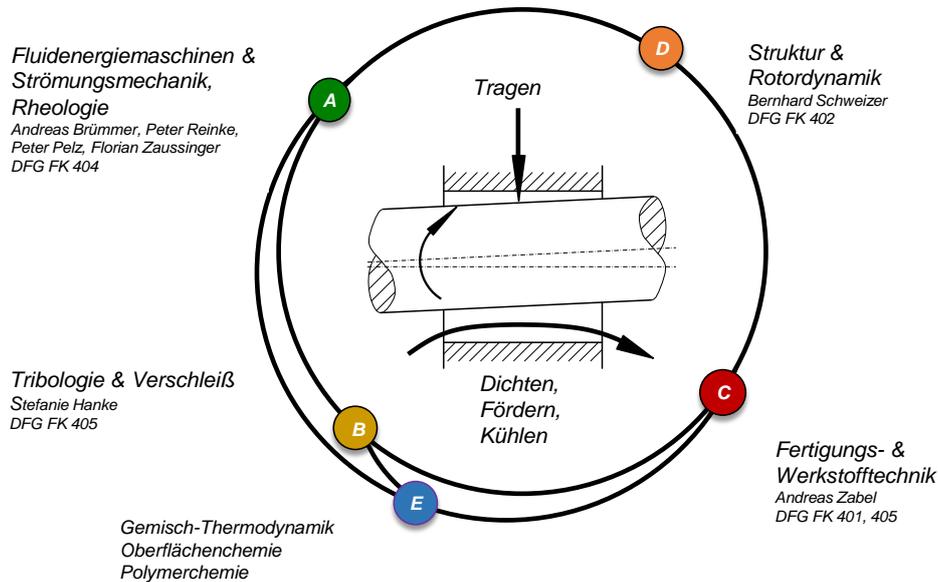


Bild 4: Beteiligte Fachkollegien.

7.2. Forschung im SPP

Ist der Spalt im Systemkontext Strömung, Festkörper, Tribologie, Rotordynamik verstanden, dann ist ein wesentlicher Teil der Maschine verstanden. Erst das Verständnis – die Analyse – öffnet die Tür zur Entwicklung neuer Technologien und zum Systemdesign – der Synthese.

Bei der Analyse gilt es, methodische Lücken zu schließen, indem alle Skalen abgedeckt werden. Diese reichen von der molekularen Ebene, über Mesoskalen wie „bubbly flow“, bis zur dynamisch oder funktional abstrahierten, d.h. generischen gesamten Maschine. Bei den Methoden gilt es, zeiteffiziente Berechnungsmethoden zu entwickeln, indem aggregierte, also Mesoskalenmodelle, mit Messdaten und höherauflösenden Modellen evaluiert und weiterentwickelt werden. Bild 5 zeigt exemplarisch zwei Herausforderungen im SPP.

Ein bekanntes und weit verbreitet angewendetes Mesoskalenmodell ist die Reynoldssche Differentialgleichung. Das Verfahren ist so effizient, dass Strömungs- und Rotordynamik gekoppelt gerechnet werden können. Leider sind die gemachten Vernachlässigungen in der Schmierfilmtheorie bei Dichtungen und Spalten in modernen Fluidenergiemaschinen häufig nicht zuverlässig. „Alle Modelle sind falsch, manche sind nützlich“, so George Box. So sind heutige Verfahren häufig nicht nur falsch in der Anwendung, sondern sogar gefährlich, wenn auf der Basis der Modelle die Maschinensicherheit unzuverlässig vorhergesagt wird.

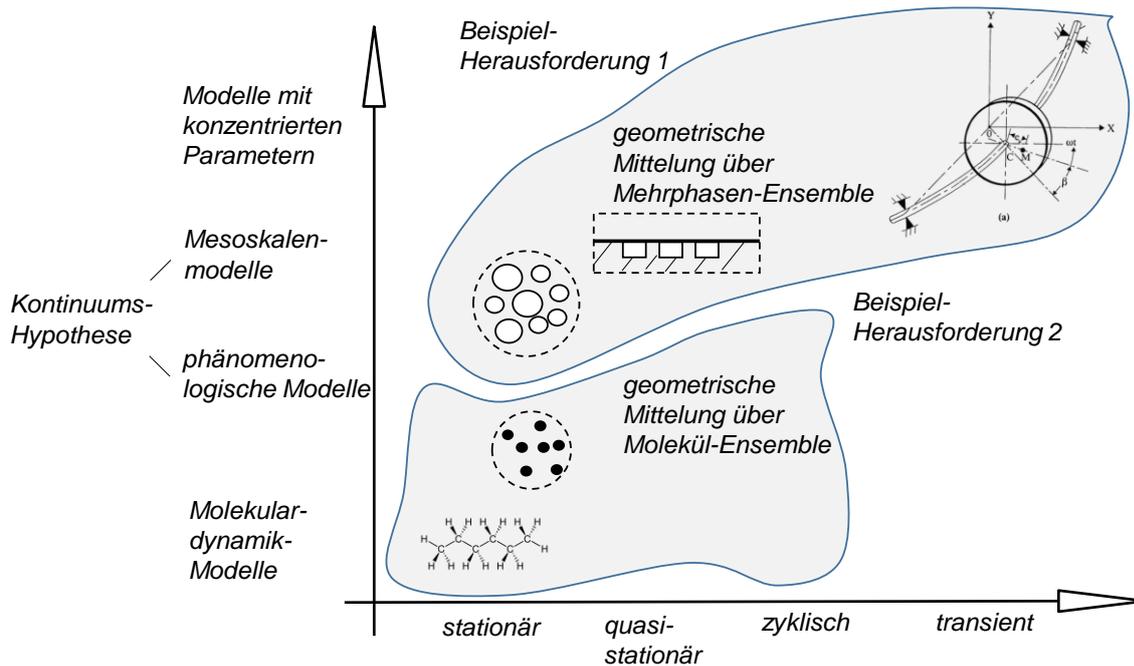


Bild 5: Einordnungsschema für Modelle.

7.3. Lücken in Erkenntnis, Methoden und Technologien

Nach dem Stand der Wissenschaft und Kenntnis ergeben sich folgende Lücken, die als unvollständige, offene Frageliste zu verstehen sind:

1. Wie lässt sich die Interaktion von Fertigungsmethode, Oberflächentopologie, Oberflächenchemie, Keimbildung verstehen und nutzen, um Kavitation und Rotorstabilität positiv zu beeinflussen?
2. Wie lässt sich die Spaltenge nutzen, um effiziente Berechnungsmodelle abzuleiten, die die wesentlichen physikalischen Effekte der Strömungsmechanik und Rotordynamik berücksichtigen?
3. Wie lässt sich die Abhängigkeit von Fertigungsmethode, Material und Struktur nutzen, um die Strukturnachgiebigkeit so zu gestalten, dass die Robustheit gegenüber Fertigungsunsicherheit erhöht wird und die Systemdynamik positiv beeinflusst wird?
4. Wie lässt sich Wandgleiten und dessen Auswirkung in realen technischen Systemen skalenübergreifend von der atomistischen Skala über die Skala des Kontinuums bis zur Maschinenskala beschreiben?
5. Wie lässt sich die reale Spaltströmung über einen Hardware-in-the-Loop-Ansatz (HiL) mit einer modellierten Maschine verbinden, um Validierungen auf Systemebene durchführen zu können?
6. ...

8. Demonstratorsysteme

An Demonstratoren sollen sich interdisziplinäre Forschungsprojekte innerhalb des SPP thematisch orientieren und die Anwendung von neuen Methoden und Technologien kann aufgezeigt werden. Obwohl die Motivation aus dem Bereich der Fluidenergiemaschinen stammt, soll im SPP lediglich der Spalt selbst detailliert untersucht werden, die zugehörige Maschine soll nur abstrakt dargestellt werden. Folgende Konzepte stellen einen integrierenden Faktor für die verschiedenen involvierten Fachbereiche dar. Die folgenden Konzepte fassen zusammen, was von Teilnehmern während des Workshops erarbeitet, präsentiert und diskutiert wurde.

8.1. Hardware-in-the-Loop-Demonstrator: gelagerter Rotor im durchströmten Spalt

HiL-Versuche stellen eine Symbiose aus Experiment und Modell dar. Dadurch wird eine flexible Versuchsumgebung für Forschungsvorhaben im SPP geschaffen. Der HiL-Demonstrator bildet den durchströmten Spalt (tragend oder dichtend) als Hardware im Detail ab, das Software-Modell abstrahiert die Maschine. Stellgrößen der Hardware sind Druckdifferenz oder Volumenstrom über den Spalt, Vordrall der Strömung und Bewegung/Drehzahl des Rotors. Diese Größen stellen den simulierten Betriebszustand der Maschine dar. Messgrößen sind resultierende Kräfte und Momente auf den Rotor, welche wiederum als Eingangsgrößen in das Modell eingespeist werden.

Der Demonstrator dient sowohl zur Analyse, als auch zur Synthese. Dadurch ergeben sich die folgenden Möglichkeiten:

- (i) Es können tragende und dichtende, radial und axial durchströmte Spalte realisiert werden.
- (ii) Es können starre oder flexible Rotoren untersucht werden.
- (iii) Es können verschiedene Medien (Öl, Wasser, Luft) zum Einsatz kommen.
- (iv) Es können kritische Betriebszustände oder Ausfälle simuliert werden.

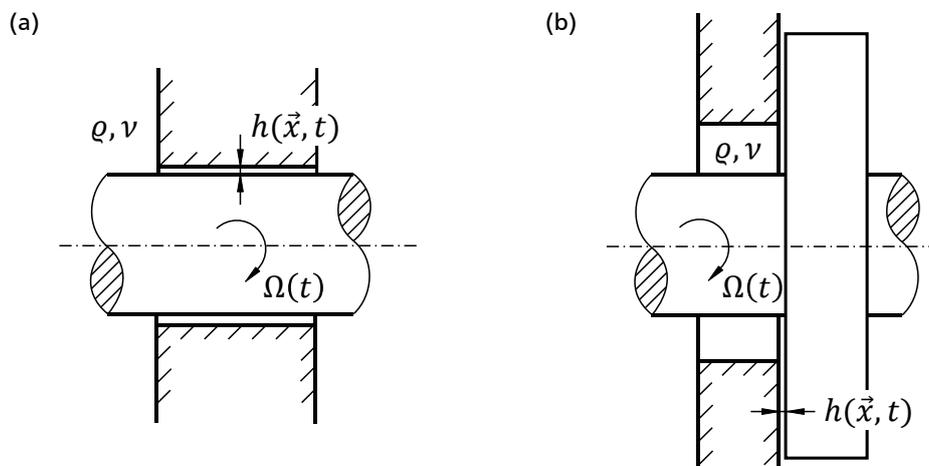


Bild 6: Skizze des durchströmten Spaltes, der die Hardware des HiL-Demonstrators darstellt; a) Radialspalt, b) Axialspalt.

Am HiL-Demonstrator können durch das Aufprägen und Messen von Schwingungen und Kräften, z.B. über Magnetlager, rotordynamische Untersuchungen gemacht werden; es können Maschinenelemente wie Folienlager oder Gleitringdichtungen untersucht werden; es können Effekte wie Kavitation oder Mischreibung untersucht werden; es wird Zugang zu werkstofftechnischen und tribologischen Untersuchungen geboten. Alle Prozesse können stationär oder instationär gestaltet werden.

8.2. Einfacher Rotor im optisch durchlässigen Hohlzylinder mit engem Dichtspalt

Ein generischer Dichtspalt kann mit einem balkenförmigen Rotor in einem Hohlzylinder realisiert werden. Durch eine optisch durchlässige Ausführung der äußeren Berandung wird Zugang für Lasermessverfahren geboten, wodurch die Strömung im Spalt lokal genau vermessen werden kann. Hiermit können kleinskalige Effekte untersucht und fein-granulare Modelle entwickelt werden. Eine Einbindung in ein HiL-System ist auch hier möglich.

- (i) Vakuumierung ist möglich. Es können Skalen von Molekularströmungen bis zum Kontinuum untersucht werden.
- (ii) Ein- oder Mehrphasige Strömungen können untersucht werden. Alle Untersuchungen können quasi-stationär oder transient durchgeführt werden.
- (iii) Es können intelligente Oberflächenstrukturen an den Spaltberandungen aufgebracht und untersucht werden.

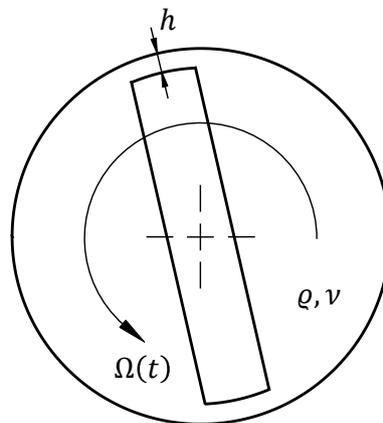


Bild 7: Generischer Dichtspalt zwischen balkenförmigem Rotor und Gehäuse.

8.3. Dichtspalt am translatorisch bewegten Kolben

Enge dichtende Spalte unterliegen häufig translatorischen Bewegungen, welche wechselnd periodisch oder vollständig transient sind. Nicht-metallische Werkstoffe werden verwendet, deren Materialverhalten muss berücksichtigt werden. Der instationär durchströmte Spalt ist so eng, dass Mischreibung oder Festkörperreibung häufig auftritt. Effekte wie Wandgleiten können untersucht werden. Das System kann analog zu Kapitel 8.1 als HiL-Prüfstand ausgelegt werden.

- (i) Es können tribologische Systeme mit unterschiedlichen Reibmaterialien und Schmiermedien untersucht werden.
- (ii) Es können rheologische Untersuchungen durchgeführt werden.
- (iii) Intelligente Oberflächenstrukturen können aufgebracht und untersucht werden.

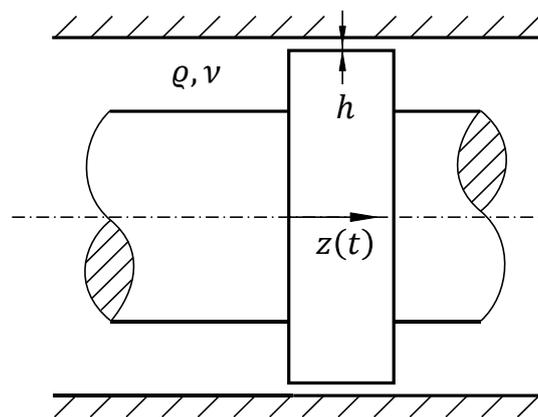


Bild 8: Spalt am translatorisch bewegten Kolben.

9. Impressionen des Workshops

Die Forschungsposter der Teilnehmer sind im Anhang zu finden.

Die folgenden Bilder illustrieren das Geschehen und die Arbeit an den beiden Workshop-Tagen.



Bild 9: Zusammentreffen am ersten Tag vor den drei Impulsvorträgen.

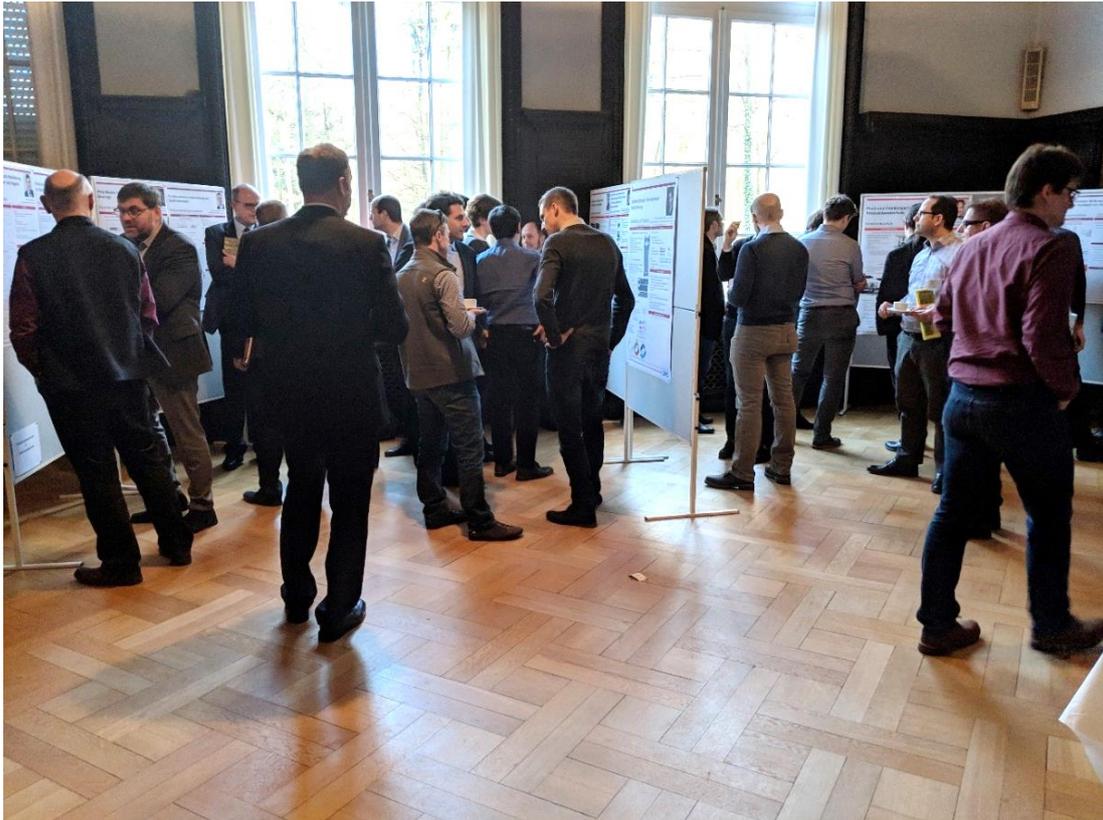


Bild 10: Teilnehmer diskutieren am ersten Tag interdisziplinäre Forschungslücken und Projektideen.



Bild 11: Teilnehmer diskutieren am ersten Tag interdisziplinäre Forschungslücken und Projektideen.



Bild 12: Teilnehmer diskutieren am ersten Tag interdisziplinäre Forschungslücken und Projektideen.



Bild 13: Teilnehmer diskutieren am ersten Tag interdisziplinäre Forschungslücken und Projektideen.



Bild 14: Teilnehmer diskutieren am ersten Tag interdisziplinäre Forschungslücken und Projektideen.



Bild 15: Teilnehmer diskutieren am ersten Tag interdisziplinäre Forschungslücken und Projektideen.



Bild 16: Plenumsdiskussion am zweiten Tag zur Ausrichtung des SPPs und Vorstellung von Demonstratorkonzepten.



Bild 17: Plenumsdiskussion am zweiten Tag zur Ausrichtung des SPPs und Vorstellung von Demonstratorkonzepten.

10. Anhang

- Einladungsflyer zum Workshop
- Präsentationsfolien der drei Impulsvorträge
- Forschungsposter der Teilnehmer