

Numerische Simulation der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion bei Flugtriebwerken mit hohem Nebenstromverhältnis: Stand der Forschung

Marc C. Keller, Corina Schwitzke, Hans-Jörg Bauer

*Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Karlsruher Institut für Technologie, 76131 Karlsruhe, Deutschland
E-mail: marc.keller@kit.edu
Telefon: +49(0)721/608-43242*

Zusammenfassung

Anforderungen aus der Flugtriebwerkentwicklung erfordern eine noch effizientere Gestaltung des Ölsystems zur Kühlung und Schmierung von schnelllaufenden Untersetzungsgetrieben. Deshalb unternehmen Wissenschaftler weltweit Anstrengungen, um die bei hohen Drehzahlen angewandte Ölstrahlschmierung und -kühlung zu erforschen. Fortschritte bei den CFD Methoden und gestiegene Rechenkapazitäten führen zu einem gesteigerten Einsatz numerischer Methoden zur Untersuchung der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion, wobei hauptsächlich die Volume-of-Fluid und die Smoothed Particle Hydrodynamics Methode eingesetzt werden. In diesem Übersichtsartikel wird der Stand der Forschung in diesem Bereich dargestellt und die Vor- und Nachteile der eingesetzten Methoden skizziert.

Stichworte: Turbinen-Luftstrahl-Triebwerke, Getriebefan, Ölsystem, Ölstrahlschmierung und -kühlung, Zweiphasenströmung, Smoothed Particle Hydrodynamics, Volume-of-Fluid, CFD

Einleitung

Marktprognosen sagen der zivilen Luftfahrt ein starkes Wachstum vorher. Im Vergleich zu 2015 soll sich das Passagierzahlaufkommen bis 2035 von 3,8 auf 7,2 Milliarden nahezu verdoppeln [1]. Dies geht einher mit der Erneuerung und Erweiterung der Flugzeugflotten aller Airlines. So sollen im selben Zeitraum ca. 34.000 neue Flugzeuge ausgeliefert werden, was einem Triebwerksbedarf von etwa 85.000 produzierten Triebwerken entspricht. Unter diesen ökonomischen, ökologischen und politischen Rahmenbedingungen definierte die ACARE¹ die Vision Flightpath 2050, durch welche eine verbindliche Reduzierung der Emissionen durch den Flugverkehr vorgeschrieben wird. Die ambitionierten Ziele sehen bis 2050 eine Reduzierung im Vergleich zum Jahr 2000 der CO₂-Emissionen um 75 %, der NO_x-Emissionen um 90 % und der Lärmemissionen

¹ Advisory Council for Aeronautics Research in Europe

um 65 % vor. Auf Triebwerksherstellern lastet deshalb der Druck durch technologische Neuerung die Emissionen, den Treibstoffverbrauch und die Lärmentwicklung neuer Triebwerke drastisch zu senken.

Aus technologischer Sicht zeichnen sich im Wesentlichen zwei Hauptentwicklungstendenzen ab: Zum einen die Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades η_{th} durch das Erreichen höherer Turbineneintrittstemperaturen und höherer Gesamtdruckverhältnisse und zum anderen die Verbesserung des Vortriebswirkungsgrades η_v durch größere Nebenstromverhältnisse (engl.: bypass ratio (BPR)). Wie in Abb. 1 illustriert, definiert das Nebenstromverhältnis

$$BPR = \frac{\dot{m}_{Nebenstrom}}{\dot{m}_{Primärstrom}} \quad (1)$$

die Relation zwischen dem am Kerntriebwerk vorbei geleiteten Nebenstrom zum am thermodynamischen Prozess teilnehmenden Luftmassenstrom (Primärstrom).

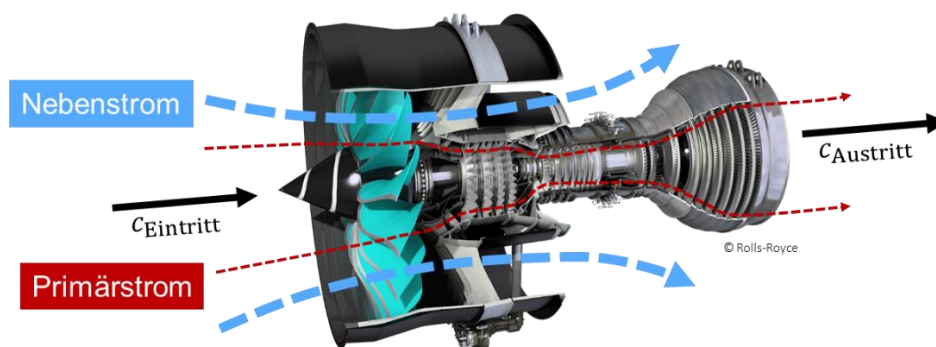


Abb. 1: Triebwerksschnitt mit Illustrierung des Nebenstromverhältnisses.

Eine BPR-Erhöhung wirkt sich positiv auf den Gesamtwirkungsgrad ($\eta = \eta_{th} \times \eta_v$) aus, da die mittlere Austrittsgeschwindigkeit $c_{Austritt}$ verringert und somit die Verlustleistung in Form von Strahlleistung reduziert wird. Aktuelle Triebwerke besitzen ein BPR bis ca. 10. Eine weitere Erhöhung, welche mit einer Durchmesserzunahme der Fanstufe (türkis in Abb. 1) verbunden ist, ist durch die Umfangsgeschwindigkeit der Fanschaufeln limitiert. Treten an den Schaufelspitzen hohe Überschallgeschwindigkeiten auf, nehmen Verluste und Lärmemissionen stark zu. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der sogenannte Getriebefan konzipiert. Durch eine konzeptionelle Änderung, der Integration eines Untersetzungsgetriebes, kann die Drehzahl des Fans und der Niederdruckwelle entkoppelt werden. Dies ermöglicht eine weitere Erhöhung des BPR bis ca. 15 und gleichzeitig den Betrieb des Kerntriebwerks bei optimierten Drehzahlen. Das Konzept ist attraktiv, da es eine Treibstoffeinsparung von bis zu 20-30 % verspricht und gleichzeitig die Lärmemissionen drastisch verringert [2].

Als neue Systemkomponente stellt das Getriebe jedoch neue Herausforderungen an die Entwickler. Insbesondere die Kühlung und Schmierung des Getriebes stellt eine Kernproblematik dar.

Diese erfolgt bei den schnelllaufenden Getrieben durch Ölstrahlen, welche in Zahnradnähe eingebracht werden. Die Interaktion der Ölstrahlen mit den Zahnradoberflächen beeinflusst die Kühlwirkung, die Schmierung und die weitere Ölausbreitung im Getriebe entscheidend. In der Literatur ist diese Wechselwirkung jedoch nur wenig erforscht. Die Anforderungen aus der Luftfahrt haben hier in den letzten Jahren vermehrt Forschungsaktivitäten hervorgerufen. Da die Vorgänge beim Aufprall der Ölstrahlen in sehr kurzen Zeitskalen stattfinden, sind experimentelle Untersuchungen schwierig. „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) bietet hier die Möglichkeit die Vorgänge detailliert zu erfassen, jedoch ist die Berechnung der Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion extrem aufwändig. Erst in den letzten Jahren sind die numerischen Methoden und die verfügbaren Rechenleistungen soweit verbessert worden, dass erste Simulationen in der Forschung durchgeführt wurden. Die wichtigsten Erkenntnisse und eingesetzten Methoden werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit präsentiert.

Öl-Zahnrad-Interaktion (ÖZI)

Die Anordnungsmöglichkeiten der Öldüsen sind in der Abb. 2 schematisch dargestellt. So kann generell zwischen einer Einspritzung vor (into-mesh) und nach (out-of-mesh) dem Zahnradengriff unterschieden werden. Je nach räumlicher Ausrichtung kann zudem unterschieden werden, ob die Ölstrahlen in den Zahnradengriff ($M_{im/oom}$) oder etwas entfernter davon ($R_{im/oom}$) eingedüst werden. Bei allen Anordnungen ist die Ölstrahl-Zahnrad-Interaktion (ÖZI) maßgeblich für den weiteren Strömungsweg des Öls verantwortlich, weshalb intensive Bestrebungen existieren die Strömungsphänomene genauer zu charakterisieren.

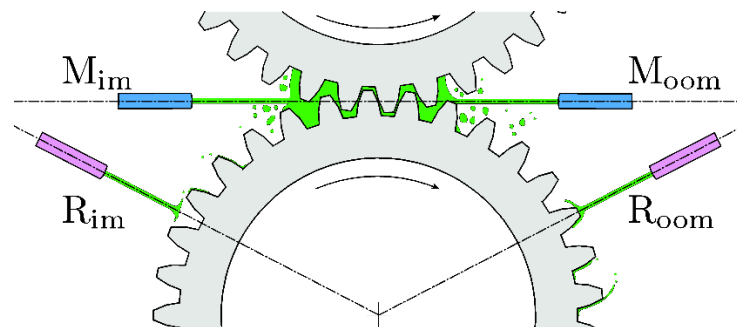


Abb. 2: Varianten der Ölstrahleinspritzung. Links vor dem Zahnradengriff (into-mesh) und rechts nach dem Zahnradengriff (out-of-mesh).

Die für den Entwickler wichtigsten Fragestellungen zur ÖZI können dabei unterteilt werden in

- Verlustentstehung und -anteil durch ÖZI,
- Ölfilmqualität zur Sicherstellung ausreichender Schmierung,
- Kühlwirkung durch Ölstrahleinspritzung und thermisches Verhalten der Zahnräder und
- Verteilung des Öls während und nach dem Aufprall und im Zahnradengriff.

Durch den Erkenntnisgewinn kann das System optimiert werden, d.h. beispielsweise kann durch eine geschickte Anordnung und Ausrichtung der Düsen die Kühlleistung erhöht, das eingesetzte Ölvolumen reduziert und Verluste minimiert werden. Dies wirkt sich direkt positiv auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Zur Analyse der dafür relevanten Strömungsprozesse ist die Erfassung der detaillierten Strömungsstrukturen im Nahbereich der Zahnradoberfläche notwendig. Dies gilt insbesondere für Untersuchungen der Kühlwirkung, da benetzte Flächen, Filmdicken und Ölgeschwindigkeiten sich direkt auf den Wärmeübergangskoeffizienten auf den Zahnflanken auswirken.

Aus numerischer Sicht ist die detaillierte Modellierung der ÖZI herausfordernd. Dies liegt unter anderem an der komplexen Zweiphasenströmung (vgl. Abb. 2), bei der das Öl durch die Interaktion mit dem schnellrotierenden Zahnrad einem hohen Impulsaustausch ausgesetzt ist und es zu starken Deformationen der freien Oberfläche kommt. Zudem ist das Dichteverhältnis der Fluide mit $\rho_{\text{Öl}}/\rho_{\text{Luft}} \geq 900$ hoch und die charakteristischen Längenskalen befinden sich zwischen mehreren mm (Zahnhöhe) und wenigen μm (Filmdicke und Spalt im Zahnradeingriff). Eine besondere Herausforderung ist die Modellierung der Zahnradbewegung, sprich allgemein von deformierenden Rechengebieten. Die in der Literatur verwendeten Modelle um diese Herausforderungen zu bewältigen werden im Weiteren vorgestellt.

Einsatz von CFD zur Simulation der ÖZI

Strömungen können durch die Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichung beschrieben werden. Der Satz partieller Differentialgleichungen wird durch eine Zustandsgleichung geschlossen. Um die im vorigen Abschnitt beschriebenen ÖZI numerisch zu berechnen, werden in der Literatur im Wesentlichen zwei unterschiedliche CFD Ansätze verfolgt. Zum einen wird die gitterbasierte Finite Volumen Methode (FVM) mit dem Volume-of-Fluid (VoF) Ansatz und zum anderen die partikelbasierte Smoothed-Particle-Hydrodynamics (SPH) Methode zur numerischen Lösung der Erhaltungsgleichungen und der Modellierung der Zweiphasenströmung eingesetzt. Die Unterschiede sollen hier kurz erläutert und im Anschluss die durchgeführten Simulationen vorgestellt werden.

Bei der **FVM** wird die Euler'sche Betrachtungsweise der Strömungsmechanik angewandt und im Raum feste Diskretisierungspunkte verwendet, welche das Rechengitter bilden. Durch Bilanzierung an den Gitterzellwänden kann das Strömungsfeld bestimmt werden. Der VoF Ansatz [3] dient zur Modellierung von Mehrphasenströmungen. Wie in Abb. 3 dargestellt, wird jeder Gitterzelle eine Farbfunktion $C \in [0,1]$ zugewiesen und neben den Grundgleichungen zeitlich advectiert. Da die Zellen im Allgemeinen nicht entlang der Phasengrenzfläche ausgerichtet sind, kommt es zu unerwünschten Diffusionseffekten an der Phasengrenzfläche. Die Größe der Diffusion hängt stark von der Gittergröße an der Grenzfläche ab, weshalb oft eine adaptive Netzverfeinerung (AMR) an der Grenzfläche eingesetzt wird, um somit die Genauigkeit der notwendigen Grenzflächenrekonstruktion zu erhöhen. Durch die Knüpfung an das starre Rechengitter, ist die Realisierung von deformierenden Rechengebieten aufwändig, kann aber z. B. durch Glättung oder Neuvernetzung des Netzes in bestimmten Zeitintervallen oder die Kopplung zweier Gebiete durch

ein „sliding interface“ erreicht werden. Eine andere Möglichkeit bietet die Chimera („overset grid“) Methode, bei der die Lösungsvariablen zwischen mehreren überlappenden Netzen interpoliert werden. Die Methodik ist in kommerziellen und quelloffenen Softwarepaketen verfügbar und findet breite Anwendung.

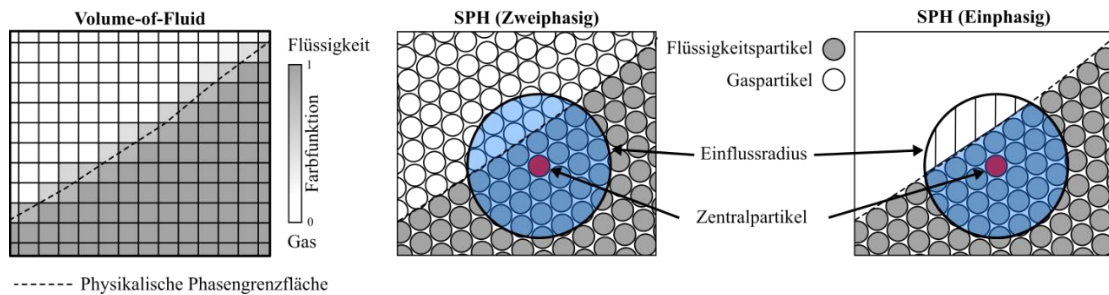


Abb. 3: Veranschaulichung der räumlichen Diskretisierung an einer Phasengrenzfläche für die FVM/FoV Methode (links), die zweiphasige SPH Methode (Mitte) und die einphasige SPH Methode (rechts).

Die **SPH** Methode hat ihre Ursprünge in der Astrophysik und basiert auf einer Lagrange'schen Beschreibung der Strömung [4]. Dabei sind die Stützpunkte (Partikel) im Raum nicht fest, sondern bewegen sich mit der jeweiligen Geschwindigkeit mit der Strömung mit. Zur Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen werden die Strömungsgrößen an einem Partikel durch eine Interpolation über die innerhalb eines Einflussradius befindlichen Nachbarpartikel bestimmt (siehe Abb. 3 (Mitte)), wobei nahe Partikel durch eine glockenförmige Gewichtungsfunktion (Kernel) stärker gewertet werden. Zur Simulation von Strömungen mit freien Oberflächen ist die Methodik attraktiv, da sich die Phasengrenzfläche inhärent durch die Partikelbewegung einstellt und keine Diffusion auftritt. Außerdem können deformierende Rechengebiete durch die beweglichen Partikel effizient realisiert werden. Um Rechenzeit einzusparen, kann eine einphasige SPH Variante (vgl. Abb. 3 (rechts)) eingesetzt werden. Dabei wird die Gasphase vernachlässigt, Oberflächenspannungen können aber weiterhin abgebildet werden.

Numerische Untersuchungen der ÖZI betrachten meist die Interaktion eines einzelnen Ölstrahls mit einem einzelnen rotierenden Zahnrad. Dies ist bedingt durch den geringeren Rechenaufwand für diese Konfiguration, allerdings bietet diese auch eine bessere Trennung der Effekte.

Yazdani und Soteriou [5] untersuchten einen entgegen und einen entlang der Zahnradbewegung ausgerichteten Ölstrahl unter Verwendung der VoF Methodik (ANSYS Fluent®). Das Rechenetz wird dabei nach jedem Zeitschritt entsprechend der Zahnradbewegung durch eine Laplace'sche Glättung angepasst. Der Fall dient den Autoren als Testfall eines entwickelten Modells zur Simulation des thermofluidodynamischen Verhaltens von Getrieben. In Abb. 4a ist zu sehen, dass durch eine einstufige adaptive Netzverfeinerung (unten) deutlich mehr Ölstrukturen aufgelöst werden.

Fondelli et al. [6, 7] verwendeten ebenfalls die VoF Methodik (ANSYS Fluent®) für die Simulation der ÖZI eines einzelnen radial ausgerichteten Ölstrahls und einem Zahnrad. Fokus der Arbeit

ist die Verifizierung der eingesetzten AMR Verfahren anhand der resultierenden Widerstandsmomente. Zudem wird der Einfluss des Anstellwinkels des Ölstrahls auf das Widerstandsmoment für zwei Winkel untersucht. Die Modellierung der Zahnradrotation erfolgt über ein „sliding interface“, bei welchem eine innere rotierende Gitterzone (Annulus) an einer äußeren statischen Zone abgeleitet. Dieses kann eingesetzt werden, da die Grenzfläche über den Simulationsverlauf bestehen bleibt.

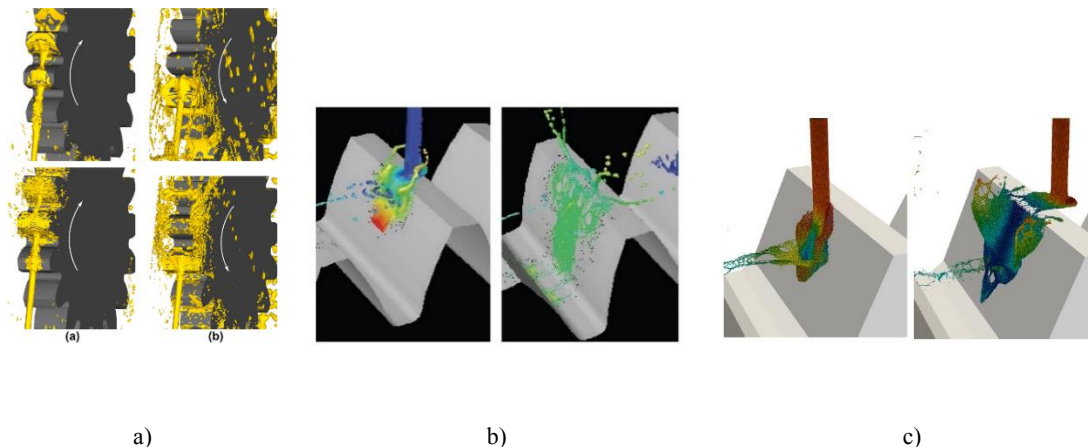


Abb. 4: Auszug der Simulationsergebnisse von a) Yazdani und Soteriou [5] (VoF), b) Fondelli et al. [6] (VoF) und c) Keller et al. [8] (SPH).

Keller et al. [9, 8] verfolgen Untersuchungen mit der SPH Methode. In [9] wird die zweiphasige SPH Variante zur Simulation eines radial auf ein Zahnrad ausgerichteten Ölstrahls eingesetzt. Um den Detaillierungsgrad im interessierenden Bereich (Aufprall) zu erhöhen wird das Rechengebiet durch Verwendung von rotationsperiodischen Randbedingungen zu einem Zahnradsegment reduziert. Die Zahnradbewegung wird direkt den Wandpartikeln aufgeprägt. In einem 2D Vergleich zu äquivalenten VoF Simulationen werden übereinstimmende Strömungsstrukturen und Geschwindigkeiten bei geringerem Rechenaufwand festgestellt. Die einphasige SPH Variante wird in [8] für die Simulation der ÖZI eingeführt. In einem Vergleich zu Ergebnissen der VoF und zweiphasigen SPH Methodik wurde die Anwendbarkeit für den Anwendungsfall gezeigt. Wie in Abb. 4c zu sehen, wird zudem der Aufprallvorgang des Ölstrahls analysiert und charakteristische Phänomene identifiziert. Eine Variation des Ölstrahlwinkels zeigt den Einfluss auf die Ölverteilung auf den Zahnflanken.

Die Simulation der ÖZI unter Berücksichtigung des Zahnradeingriffs ist zum Entstehungszeitpunkt dieses Artikels nicht bekannt. Von den vorgestellten Arbeiten ist nur die Methodik von Yazdani und Soteriou [5] und von Keller et al. [9, 8] prinzipiell anwendbar, da das „sliding interface“ nicht kompatibel mit dem Eingriff ist. Die Verwendung von VoF mit Gitterglättungs- und Neuvernetzungsalgorithmen (ähnlich zu [10]) oder dem Chimera („overset grid“) Ansatz stellt eine Modellierungsmöglichkeit für zukünftige Arbeiten mit gitterbasierten Methoden dar. Da die partikelbasierte SPH Methodik jedoch eine deutlich effizientere Modellierung erlaubt, ist diese sehr attraktiv für den Anwendungsfall und potentiell vielversprechender.

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit zum weiteren Verständnisaufbau der ÖZI wurde durch die Entwicklungstendenzen bei zivilen Turbinen-Luftstrahl-Triebwerken und der Einführung des Getriebefankonzeptes dargelegt. Es wurden die Schwierigkeiten und Zielsetzungen numerischer Arbeiten zur ÖZI skizziert und die eingesetzten Methoden vorgestellt. Die etablierte, gitterbasierte VoF Methode findet bei zwei Forschungsgruppen Verwendung [5, 6, 7], während die Partikelmethode SPH in [9, 8] eingeführt wird. Der Wärmeübergang wird nur in [5] erfasst. Alle Untersuchungen beschränken sich auf die Simulation eines Ölstrahls, der mit einem einzelnen Zahnrad interagiert. Für zukünftige Arbeiten mit Zahnradeingriff stellt die SPH Methode den attraktivsten Ansatz dar. Die VoF Methode kann mit Netzanpassungsalgorithmen oder dem Chimera Ansatz unter vermutlich höherem Rechenaufwand eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] (JADC) Japan Aircraft Development Corporation, „Worldwide Market Forecast 2016 – 2035,“ 05 2017. [Online]. Available: <http://www.jadc.jp/en/data/forecast/> .
- [2] J. Kurzke, „Fundamental Differences Between Conventional and Geared Turbofans,“ in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air*, 2009.
- [3] C. W. Hirt und B. D. Nichols, „Volume of Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries,“ *Journal of Computational Physics*, Bd. 39, pp. 201-205, 1981.
- [4] J. J. Monaghan, „Simulating Free Surface Flows with SPH,“ *Journal of Computational Physics*, Bd. 110, pp. 399-406, 2 1994.
- [5] M. Yazdani und M. C. Soteriou, „A novel approach for modeling the multiscale thermo-fluids of geared systems,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 72, pp. 517-530, 2014.
- [6] T. Fondelli, A. Andreini, R. Da Soghe, B. Facchini und L. Cipolla, „Volume of fluid (VOF) analysis of oil-jet lubrication for high-speed spur gears using an adaptive meshing approach,“ in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2015.
- [7] T. Fondelli, A. Andreini, R. Da Soghe, B. Facchini und L. Cipolla, „Numerical Simulation of Oil Jet Lubrication for High Speed Gears,“ *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015.
- [8] M. C. Keller, S. Braun, L. Wieth, G. Chaussonnet, T. F. Dauch, R. Koch, C. Schwitzke und H.-J. Bauer, „Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation of Oil-jet Gear Interaction,“ in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Accepted)*, 2017.
- [9] M. C. Keller, S. Braun, L. Wieth, G. Chaussonnet, T. Dauch, R. Koch, C. Höfler und H.-J. Bauer, „Numerical Modeling of Oil-Jet Lubrication for Spur Gears using Smoothed Particle Hydrodynamics,“ in *Proceedings of the 11th International SPHERIC Workshop*, 2016.

- [10] M. Yazdani, M. C. Soteriou, F. Sun und Z. Chaudhry, „Prediction of the thermo-fluids of gearbox systems,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 81, pp. 337-346, 2015.