

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg (FAU)

Department Chemie- und Bioingenieurwesen (CBI)

Professur für Fluidsystemtechnik (FST)

Praktikumsbericht

Charakterisierung von viskoelastischen Kühlmitteln mittels PIV

01.10.2024-31.03.2025

Verfasserin: Diana Akeneeva
Matrikelnummer: aq48ebaf
Anschrift: Erwin-Rommel-Straße 61, 91058 Erlangen
Semester: Wintersemestr
E-Mail: dii.akeneeva@fau.de

Inhaltsverzeichnis

1.	Relevanz des Themas	3
2.	Einführung	5
3.	Aufgaben und Methodologie	5
4.	Experimentverlauf	7
5.	Ergebnisse des Experiments und deren Analyse	9
5.1	Beschreibung der experimentellen Bedingungen	9
5.2	Einfluss der Geometrie des Kanals	10
5.3	Geschwindigkeit Profile nach der Geometrie	13
5.4	Geschwindigkeit und Wirbel	14
5.5	Wärmeübergangskoeffizienten	18
6.	Schlussfolgerungen	19
	Literaturverzeichnis	20
	Anhang	22

I. Relevanz des Themas

Die Welt geht mit schnellen Schritten auf die elektrische Energieversorgung über. Viele Geräte und Prozesse wechseln auf elektrischen Transport, um die Effizienz zu steigern oder auf erneuerbare Energiequellen umzuschalten. Laut der Internationalen Energieagentur wird ein Anstieg des Stromverbrauchs um 25-30 % bis 2030 erwartet [\[1\]](#).

Das Wachstum der Elektromobilproduktion wird durch strengere Umweltstandards und die Entwicklung erneuerbarer Energiequellen begünstigt. Große Automobilhersteller investieren verstärkt in die Entwicklung von Elektrofahrzeugen, und der Ausbau der Ladeinfrastruktur macht diese für Verbraucher zugänglicher. Im Jahr 2023 stiegen die weltweiten Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen um 35 %, was fast 14 Millionen Fahrzeuge ausmachte, was einen Rekordwert darstellt. 2024 könnten 17 Millionen Verkäufe erreicht werden, was mehr als 20 % der weltweit verkauften Autos ausmachen würde [\[2\]](#).

Beispielsweise könnte in China, dem größten Markt für Elektrofahrzeuge, der Anteil der Elektrofahrzeugverkäufe im Jahr 2024 45 % erreichen, in Europa etwa 25 % und in den USA mehr als 11 % [\[3\]](#). Es wird erwartet, dass bis 2030 fast jedes dritte Fahrzeug in China ein Elektrofahrzeug sein wird, während es in den USA und der EU unter die Top 5 fällt [\[3\]](#).

Gleichzeitig wächst die Automatisierung der Produktion und der Einsatz von Hochleistungsrechnern (High-Performance Computing, HPC) jedes Jahr. Insbesondere wird die Automatisierung in der Elektromobilproduktion aktiv vorangetrieben, einschließlich der Produktion von Komponenten wie elektrischen Batteriesystemen. Ein Beispiel ist das Unternehmen Comau, das automatisierte Produktionslinien für Elektrofahrzeuge entwickelt hat, einschließlich der Montage von Motoren und Wechselrichtern für die Modelle von NIO, bei denen die Produktionsrate in den ersten sechs Monaten des Jahres 2023 um 42,4 % gestiegen ist [\[4\]](#).

Außerdem wird HPC aktiv in Produktionsprozessen zur Modellierung, Analyse und Optimierung eingesetzt, auch für Berechnungen zur Verbesserung der Energieeffizienz und Kühlung komplexer Systeme. Effiziente Kühlungslösungen sind gefragt, da diese Systeme viel Energie verbrauchen.

Für alltägliche Aufgaben wie den Betrieb einer Kaffeemaschine oder eines PCs reicht Luftkühlung aus, aber für hochleistungsfähige Anwendungen wie Elektrofahrzeuge oder Hochleistungsrechenzentren sind komplexere Kühlsysteme erforderlich. Beispielsweise werden Wasserkühlsysteme häufig in HPC-Systemen und der Automobilindustrie eingesetzt, während fortschrittliche Batterien mit Flüssigkeitskühlung immer häufiger in Elektrofahrzeugen verwendet werden, um eine effektive Temperaturregelung zu gewährleisten [\[2\]](#) [\[3\]](#).

Flüssigkeitskühlsysteme, bei denen das Kühlmittel physisch vom Wärmequelle getrennt ist, verwenden Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie Kupfer oder Aluminium oder Wärmeleitrohre. Wasser wird aufgrund seiner niedrigen Viskosität, hohen Siedetemperatur und hohen spezifischen Wärme häufig gewählt, kann jedoch aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit nicht direkt mit elektronischen Geräten in Kontakt kommen.

Elektrofahrzeuge haben oft begrenzten Platz für traditionelle Kühlsysteme, was die effiziente Wärmeverwaltung in kompakten Komponenten erschwert. Die Immersionskühlung, bei der das Kühlmittel direkten Kontakt mit der Wärmequelle hat, hat einen klaren Vorteil durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und den minimalen Bedarf an Zusatzgeräten. Der Hauptvorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass keine Wärmeübertragung durch kalte Platten oder Wärmeleitrohre erforderlich ist, was die Kühlleistung erheblich steigert. Der größte Nachteil ist jedoch die große Bauweise des Systems, was für große Forschungszentren kein Problem darstellt, aber in mobilen Anwendungen hinderlich sein kann.

II. Einführung

Die Immersionskühlung ist eine Methode, bei der das Kühlmittel vollständig in Kontakt mit den elektronischen Komponenten kommt und deren thermische Regulierung sicherstellt. Im Gegensatz zu traditionellen Luft- oder Flüssigkeitskühlsystemen ermöglicht die Immersionskühlung eine gleichmäßigere Temperaturverteilung und eine verbesserte Wärmeübertragung. Diese Methode lässt das Kühlmittel direkt mit der Wärmequelle in Kontakt treten, wodurch der Wärmewiderstand minimiert und die Wärmeableitungseffizienz erhöht wird.

Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von dielektrischen Flüssigkeiten wie dünnflüssigen synthetischen Ölen (z. B. Synfluid PAO 6) zuverlässige elektrische Isolierung und hohe Wärmeabfuhr bietet [\[5\]](#). Das Hinzufügen von Nanopartikeln oder Polymerverbindungen zu diesen Flüssigkeiten verbessert deren Wärmeleitfähigkeit und thermoregulierende Eigenschaften [\[6\]](#) [\[7\]](#).

III. Aufgaben und Methodologie

In dieser Studie wurde eine experimentelle Analyse der Strömungsdynamik von Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität durchgeführt. Die experimentelle Einrichtung ermöglichte die Simulation der realen Arbeitsbedingungen von Akkumodulen. Die erhaltenen Daten helfen dabei, Muster in der Strömungsdynamik der untersuchten Flüssigkeiten zu identifizieren, was die Auswahl des optimalen Kühlmittels für spezifische Bedingungen ermöglicht.

Aufgaben des Experiments:

1. Entwicklung und Erstellung einer experimentellen Einrichtung zur Untersuchung mit der Methode PIV (Particle Image Velocimetry).
2. Durchführung von Experimenten mit Variation der folgenden Parameter:
 - Verschiedene Kühlflüssigkeiten (physikalische Eigenschaften sind in Tabelle 1-2 angegeben).

- Verschiedene Durchflussraten der Kühlflüssigkeit. Die Reynolds-Zahlen für jede Flüssigkeit variieren 600 und 1200.
 - Temperatur der untersuchten Flüssigkeiten. Für alle untersuchten Flüssigkeiten beträgt die Eingangstemperatur des Kanals 40 Grad.
3. Verarbeitung und Analyse der Daten mit Matlab und PIV Lab.

PIV (Particle Image Velocimetry) ist eine Methode, die auf der Aufnahme von Bildern mit einer Hochgeschwindigkeitskamera basiert, die Partikel erfasst, die in den Flüssigkeitsstrom eingebracht wurden. Durch den Vergleich aufeinanderfolgender Bilder, die mit zeitlichem Abstand aufgenommen wurden, lässt sich die Verschiebung der Partikel bestimmen, was wiederum die Geschwindigkeit und Richtung des Stroms berechnet.

Der Messprozess der Strömungsgeschwindigkeit in PIV basiert auf der gegenseitigen Korrelation der Bilder. Das System nimmt zwei aufeinanderfolgende Bilder der Partikel auf und analysiert die Korrelation zwischen diesen, um die Verschiebung der Partikel und den Zeitabstand zwischen den Bildern zu bestimmen. Diese Daten werden verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeit in jedem Zellbereich zu berechnen und dann in Vektorfelder der Geschwindigkeit umzuwandeln. Dies ermöglicht es, Strömungsmerkmale wie Turbulenz, Stabilität und Geschwindigkeit zu analysieren.

IV. Experimentverlauf

Das Experiment beginnt mit dem Einschalten des Schaltschranks.

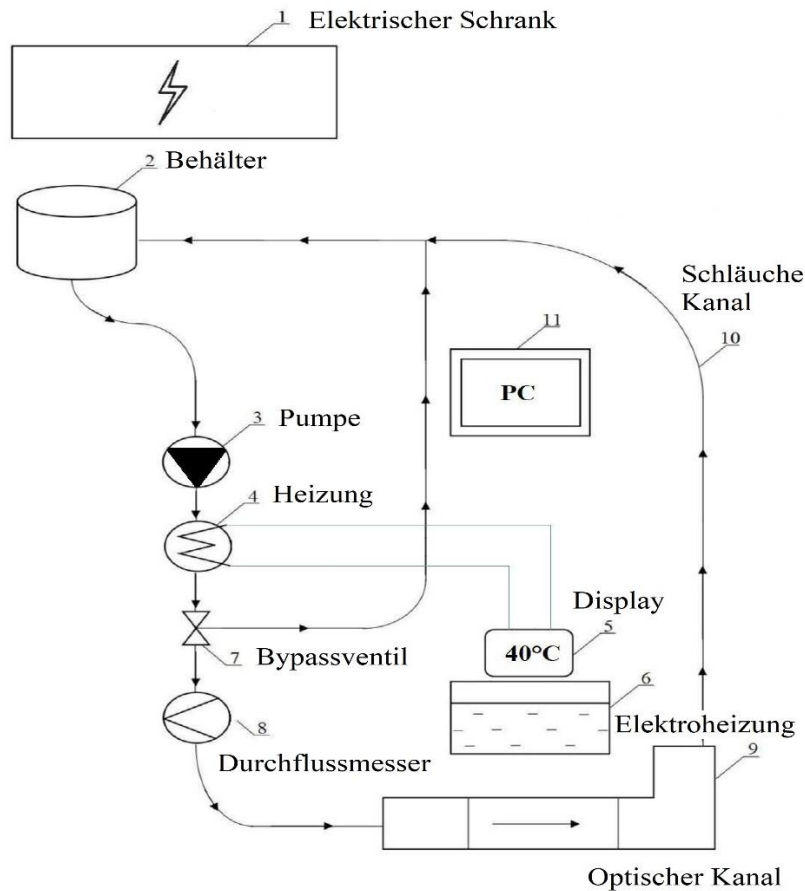


Abbildung 1 Mechanischer Teil der Installation

Dann mischen wir die Partikel mit der untersuchten Kühlflüssigkeit in einem Reagenzglas (siehe Tabelle 1-2). Das Gewicht der Partikel wird schrittweise angepasst, basierend auf dem erhaltenen Bild. In unserem Fall waren es 1,5 Gramm. Die Mischung aus Öl und Partikeln wird dann in Behälter Nr. 2 geladen, der die Hauptmasse der untersuchten Flüssigkeit enthält. Zur Zirkulation der Flüssigkeit wird Pumpe Nr. 3 verwendet. Die Flüssigkeit mit den Partikeln wird durch Pumpe Nr. 3 gepumpt, die sie durch den Wärmetauscher Nr. 4 leitet. Der Wärmetauscher Nr. 4 interagiert mit dem Elektroheizer Nr. 6, der die Wärme vom Elektroheizer auf die Flüssigkeit überträgt, die durch ihn zirkuliert. Der Elektroheizer Nr. 6 erhitzt das Wasser, das dann die notwendige Temperatur der Flüssigkeit aufrechterhält. Die Temperatur am Eingang des Kanals muss für alle

untersuchten Flüssigkeiten 40 Grad betragen. Die Flüssigkeit aus dem Wärmeübertrager Nr. 4 geht durch das Bypass Ventil Nr. 7, das einen Teil des Flusses umleitet, und reguliert den Flüssigkeitsdurchfluss durch den Durchflussmesser Nr. 8. Die Viskosität nicht-newtonscher Flüssigkeiten hängt von der Strömungsgeschwindigkeit ab, und durch Variation des Flüssigkeitsdurchflusses ändern wir die Geschwindigkeit und Viskosität des Flusses. Wir stellen einen bestimmten Flüssigkeitsdurchfluss (l/min) ein, was wiederum die Reynolds-Zahl verändert. Nach dem Durchflussmesser Nr. 8 wird die Flüssigkeit in den optischen Kanal Nr. 9 geleitet, der aus organischem Glas besteht, um optischen Zugang zu gewährleisten. Über dem optischen Kanal Nr. 9 ist eine Powell-Linse installiert (siehe Abbildung 2).

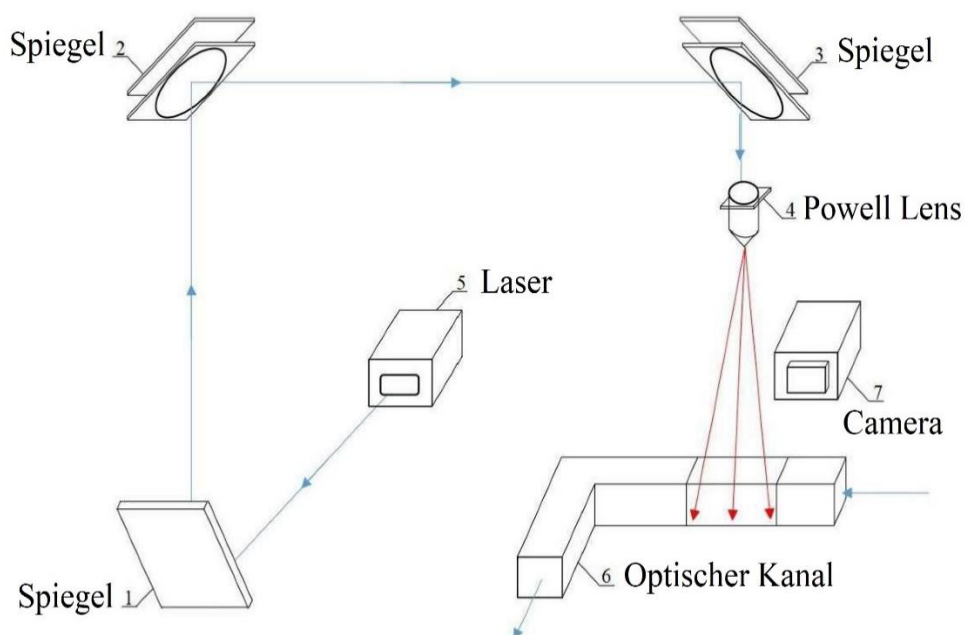


Abbildung 2 Optischer Teil der Installation

Die Powell-Linse wandelt einen runden Laserstrahl in eine flache Form um und sorgt so für eine gleichmäßige Energieverteilung. Powell-Linsen wandeln Licht effizient um und erzeugen gleichmäßige Linien mit guter Energieverteilung, was für genaue Messungen wichtig ist. Powell-Linsen ähneln Prismen mit abgerundeten Dächern und nutzen eine einzigartige asphärische Krümmung, die das Laserlicht effektiv umverteilt. Im Gegensatz zu Zylinderlinsen, die aufgrund

der inhärenten Gaußschen Verteilung des Laserstrahls oft schlecht beleuchtete Linien erzeugen, erzeugen Powell-Linsen gerade Linien mit gleichmäßiger Energieverteilung über ihre gesamte Länge.

V. Ergebnisse des Experiments und deren Analyse

5.1 Beschreibung der experimentellen Bedingungen

Im Rahmen des Experiments wurden Messungen für acht verschiedene Öle durchgeführt (siehe Tabelle 1-2):

- Vier Öle mit hoher Viskosität bei einer Reynolds-Zahl $Re=600$.
- Vier Öle mit niedriger Viskosität bei Reynolds-Zahlen $Re=600$ und $Re=1200$.

Tabelle 1 High viscosity

Fluid	Polymer	Polymer concentration ppm	Viscosity at 40°C (cSt)
OS443192	-	-	19,87
OS443193	f-OCP	6000	20,18
OS445183	PIB 1	1200	19,96
OS443194	PIB 3	300	21,33

Tabelle 2 Low viscosity

Fluid	Polymer	Polymer concentration ppm	Viscosity at 40°C (cSt)
OS446791	-	-	
OS446542	f-OCP	4800	5,03
OS446547	PIB 1	1200	4,93
OS447950	PIB 3	300	

Wir konzentrieren uns auf vier Öle: niedrigviskoses Öl OS446791 ohne Zugabe von Polymer (newtonsche Flüssigkeit), niedrigviskoses Öl mit PIB3 -

OS447950; hochviskoses Öl ohne Polymer OS443192 und hochviskoses Öl mit PIB3 OS443194.

Die Messungen wurden mit der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) zur Analyse der Strömungsdynamik durchgeführt. Alle Bilder wurden mit der PIV Lab verarbeitet, was es ermöglichte, zu erhalten:

- Geschwindigkeitsvektorfeld.
- Geschwindigkeitverteilungen.
- Geschwindigkeitprofile in verschiedenen Querschnitten.
- Wirbelkarten des Strömungsfeldes.

5.2 Einfluss der Geometrie des Kanals

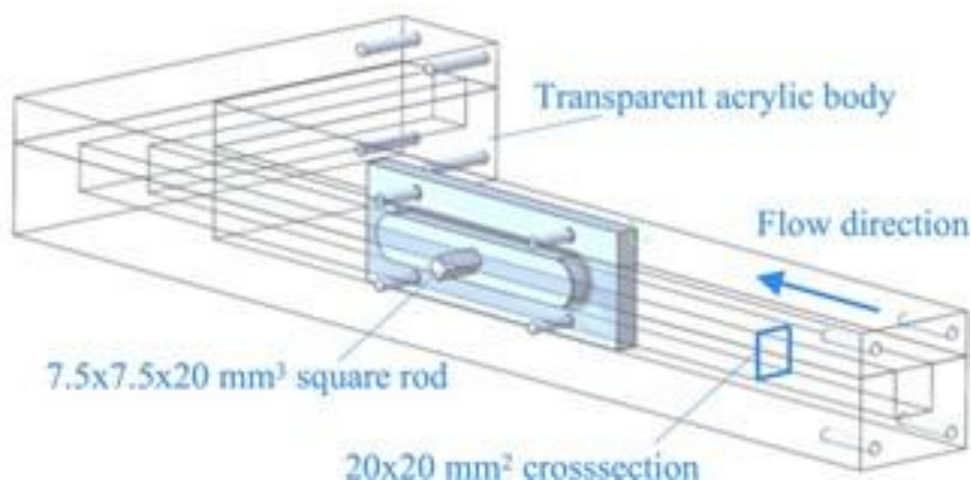


Abbildung 3 Schematische Darstellung eines Kanals mit einer Strömung. Die Flüssigkeit muss um einen Vierkantstab mit den Maßen 7,5 x 7,5 mm² fließen, der in einen 20 x 20 mm² großen Kanal hineinragt.

Innerhalb des Kanals wurde eine Geometrie in Form eines Rautenstücks eingebaut (abb.3). Das Öl umströmte dieser Körper, wodurch die Strömung in zwei Teile aufgespalten wurde — einen oberen und einen unteren Teil (abb. 3).

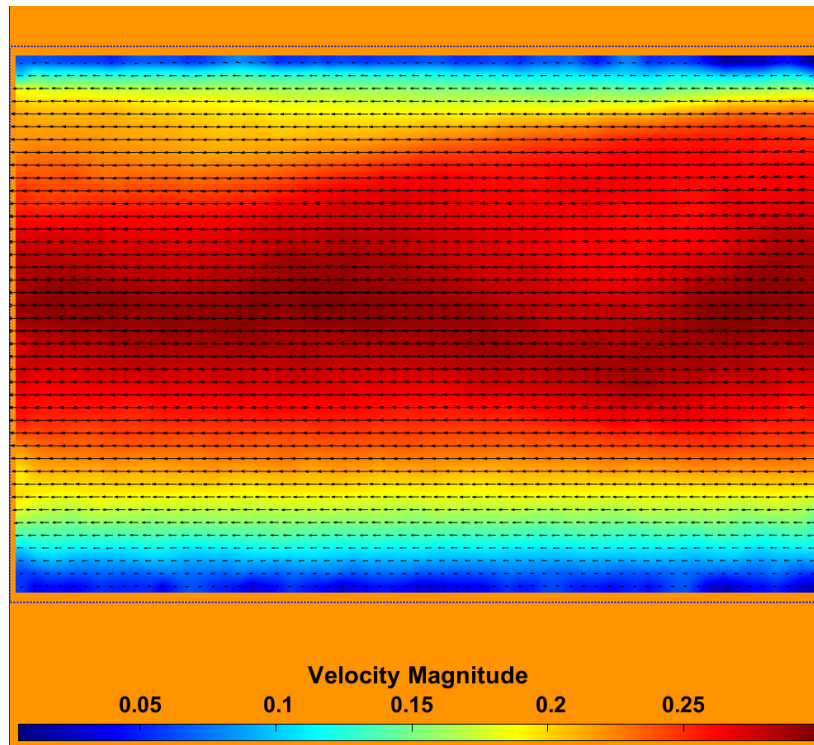


Abbildung 4 Geschwindigkeitsfeld des Flusses vor der Geometrie

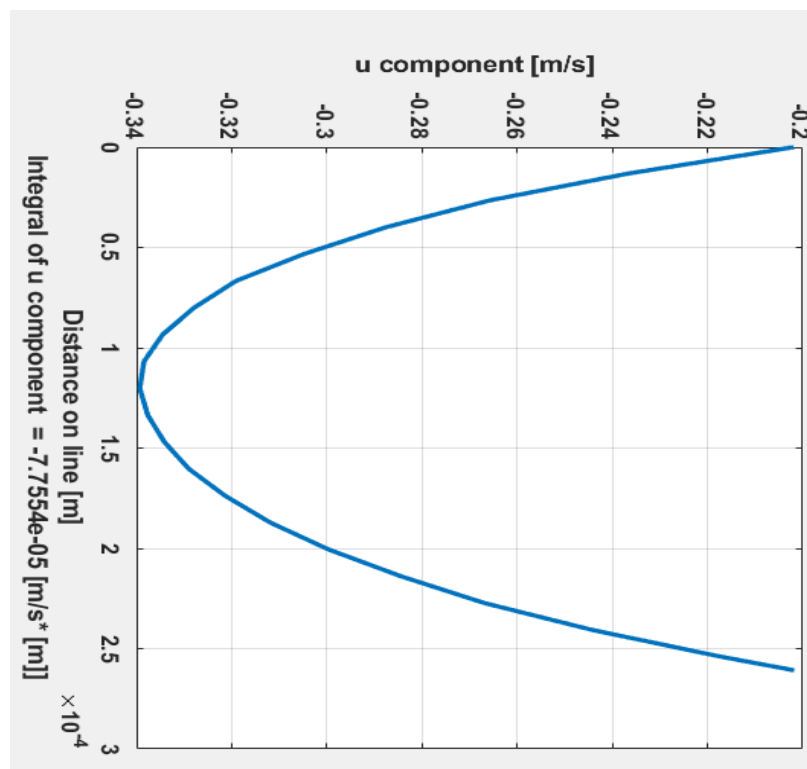


Abbildung 5 Geschwindigkeitprofil vor der Körper

Strömung vor der Geometrie (abb.4): Messungen vor der Geometrie zeigten eine gleichmäßige laminare Strömung. Das Geschwindigkeitsprofil hatte die

Form einer Parabel (abb.5), was einer laminaren Strömung mit gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung entspricht.

Strömung nach der Geometrie: Nach dem Passieren des Öls durch die Rautenform wurden Messungen in drei Abständen von der Geometrie durchgeführt (abb.6) (Die dargestellten Fotos zeigen Ergebnisse, die auf dem Öl OS446791 basieren.):

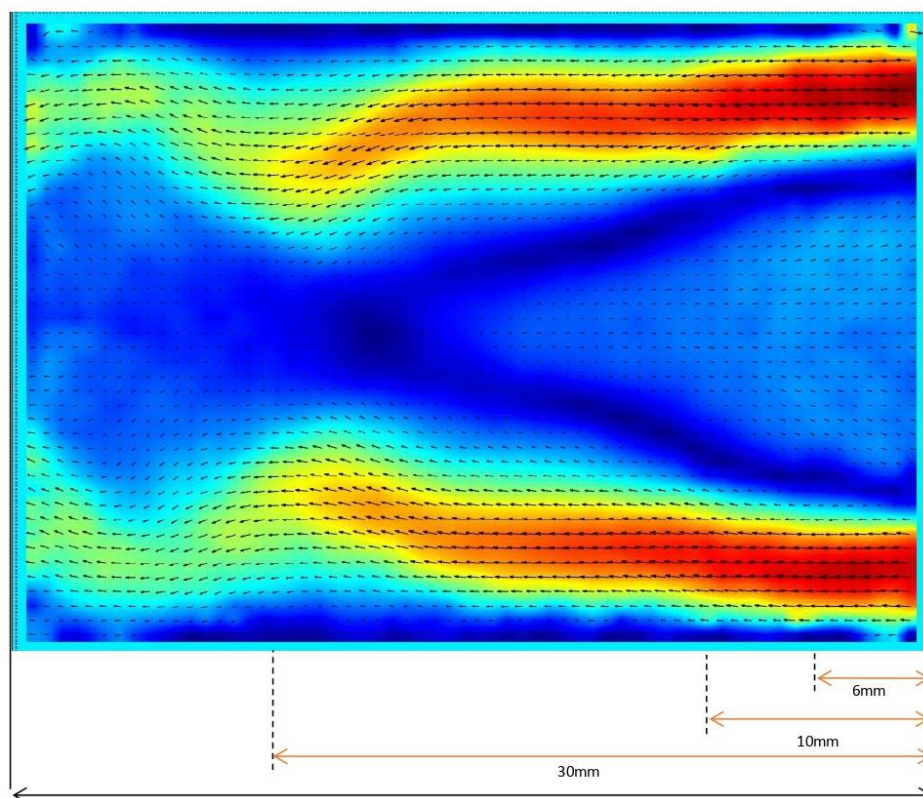


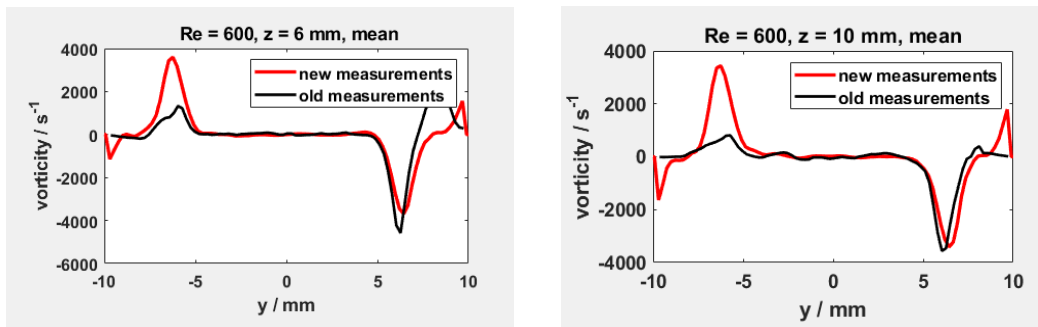
Abbildung 6 Strömung nach der Körper

- $z=6\text{mm}$
- $z=10\text{mm}$
- $z=30\text{mm}$

Die Messergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

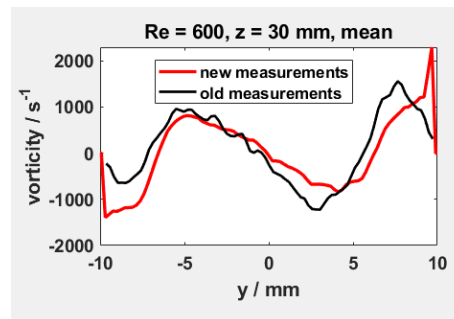
Abbildung 7 zeigt die Vorticity nach der Geometrie bei den Abständen von 6 mm, 10 mm und 30 mm bei einer Reynolds-Zahl von $Re=600$. Auf der Abbildung 7 sind zwei Farben der Vorticity-Linien dargestellt: Rot und Schwarz. Die rote Linie zeigt das neue Wirbelprofil, während die schwarze Linie das

vorherige Wirbelprofil darstellt. Dieser Vergleich veranschaulicht die Unterschiede zwischen den beiden Profilen.



b) In einem Abstand von 6 mm

a) In einem Abstand von 6 mm



c) In einem Abstand von 6 mm

Abbildung 7 Wirbelprofile (Vorticity)

5.3 Geschwindigkeitsprofile nach der Geometrie

Die Analyse der Profile (abb.8) zeigt folgende Muster:

1. Zwei hohe Punkte auf dem Diagramm entsprechen den Zonen mit maximaler Vorticity im oberen und unteren Teil des Kanals.
2. Die Vorticity im oberen und unteren Teil ist symmetrisch zur Achse $y=0$, was auf eine Trennung des Flusses in zwei Teile nach dem Passieren der Geometrie hinweist.
3. Die Strömungsgeschwindigkeit zwischen den beiden Maxima nähert sich null, was auf eine Zirkulationszone und Stagnation in der zentralen Kanalzone hinweist.

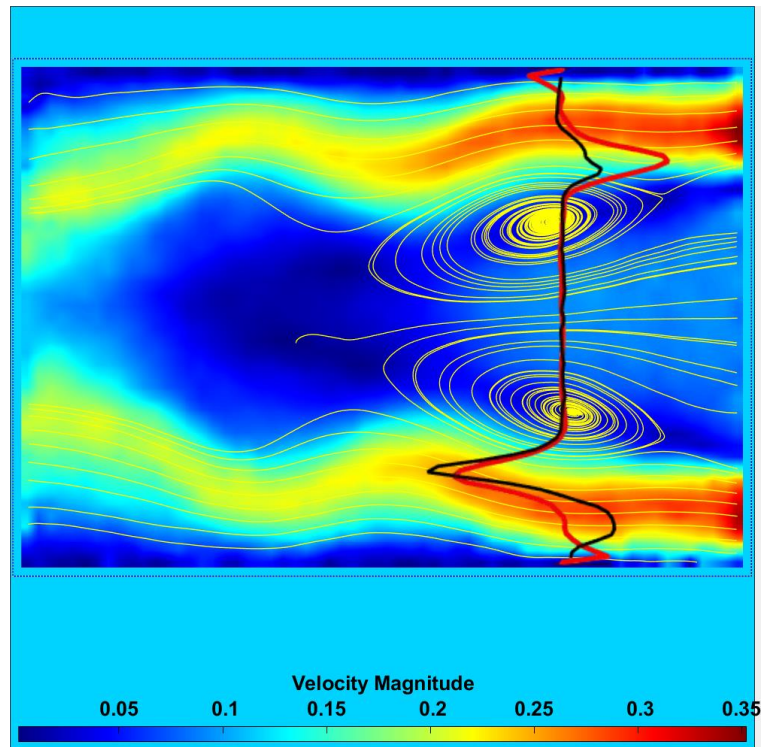


Abbildung 8 Wirbelprofil über das Geschwindigkeitsfeld gelegt

Mit zunehmendem Abstand von der Geometrie nimmt die Intensität der maximalen Geschwindigkeiten ab (abb.7, c), was darauf hindeutet, dass der Fluss nach der Trennung wieder gleichmäßiger wird.

5.4 Geschwindigkeit und Wirbel

Hier sind die Geschwindigkeits- und Vorticity-Felder dargestellt. Der Strömungsfluss umströmt die Geometrie und erzeugt Zonen mit hohen Geschwindigkeiten im oberen und unteren Bereich des Feldes, während sich in der Mitte Stagnationszonen mit niedriger Geschwindigkeit bilden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Geometrie eine Strömungstrennung und die Bildung von Rezirkulationsbereichen verursacht.

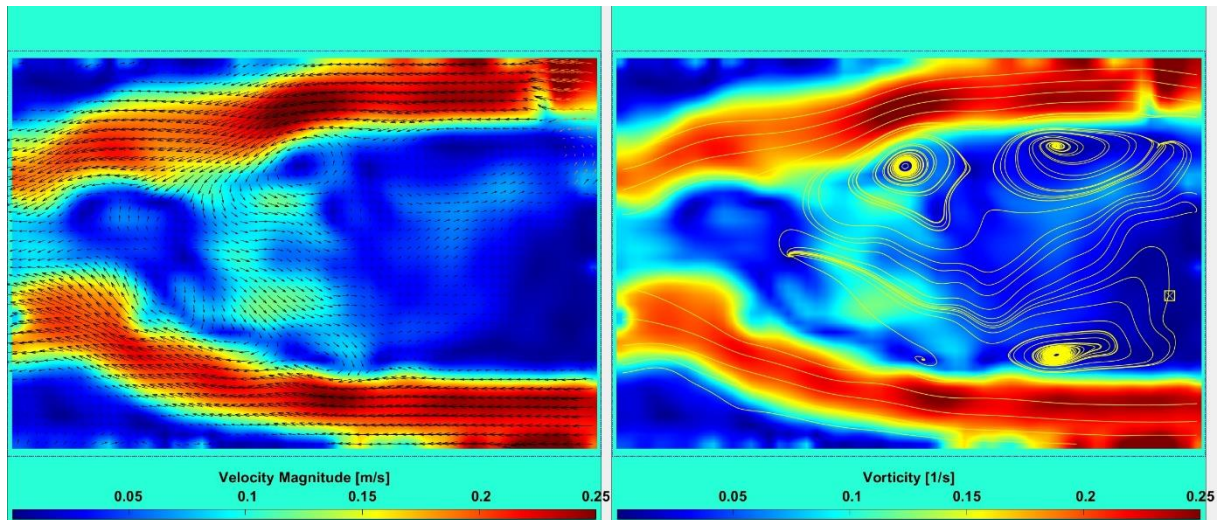


Abbildung 9 a. Low viscosity ohne Zusatz von Polymeren bei $Re=600$

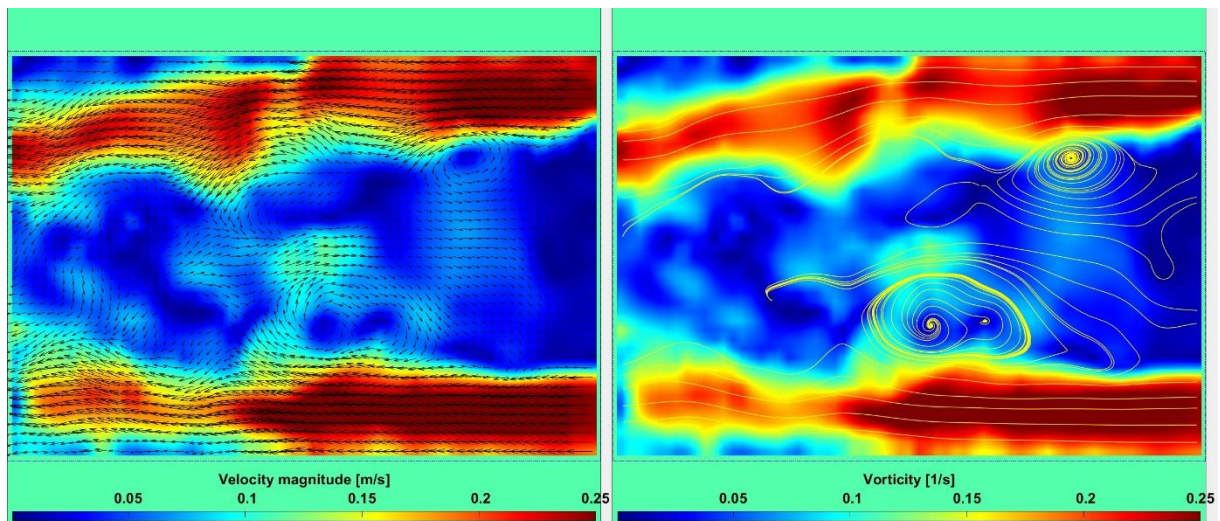


Abbildung 9 b. High viscosity ohne Zusatz von Polymeren bei $Re=600$

In Abbildung 9a ist ein Öl mit niedriger Viskosität ohne Zusatz von Polymeren dargestellt – die Geschwindigkeiten sind hier gleichmäßiger, und die Strömungsstruktur ist weniger ausgeprägt.

In Abbildung 9b ist ein Öl mit hoher Viskosität ohne Zusatz von Polymeren dargestellt – es sind ausgeprägtere Rezirkulationszonen und Inhomogenitäten in der Strömungsstruktur zu beobachten.

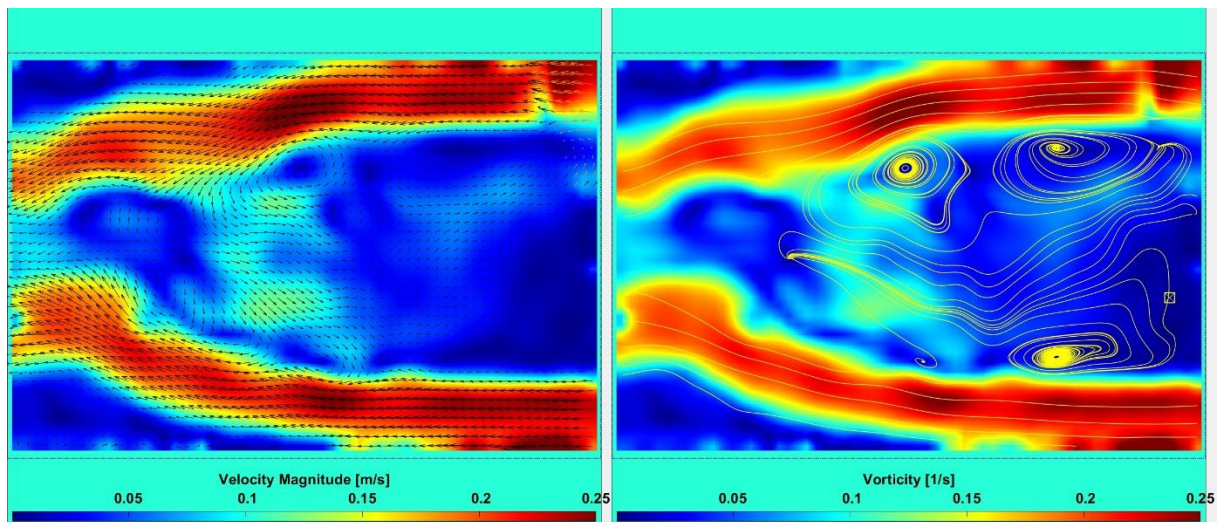


Abbildung 10a. Low viscosity ohne Zusatz von Polymeren bei $Re=600$

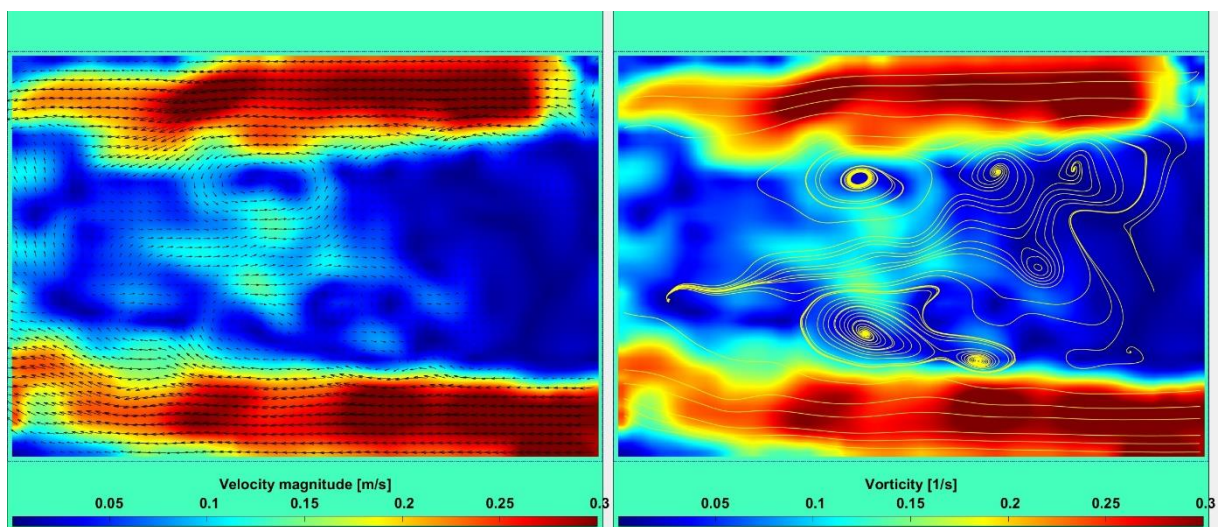


Abbildung 10 b. Low viscosity ohne Zusatz von Polymeren bei $Re=1200$

Bei $Re=600$ (Abb.10, a)— liegt die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von etwa 0.05–0.25 m/s. Bei $Re=1200$ (Abb.10, b)— steigt die Geschwindigkeit an und erreicht bereits bis zu 0.3 m/s.

Bei $Re = 600$ sind die Vorticity-Zonen kleiner und weiter von der Geometrie entfernt. Bei $Re = 1200$ werden die Vorticity-Zonen ausgeprägter und liegen näher an der Geometrie, da bei einer höheren Reynolds-Zahl die Strömung beweglicher wird und sich die Wirbel aktiver ausbilden.

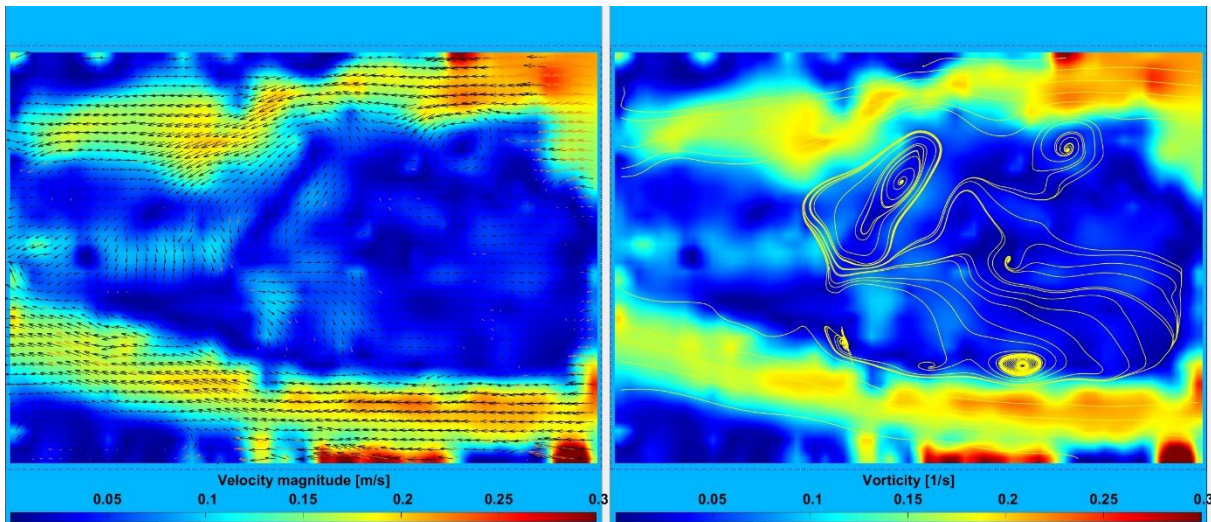


Abbildung 11 Low viscosity mit der Zusatz von PIB3-Polymer bei $Re=600$

In Abbildung 11 ist ein Öl mit niedriger Viskosität und der Zugabe von PIB3-Polymer dargestellt. Im rechten Diagramm (Abb. 11b) ist zu sehen, dass die Vorticity-Bereiche im Bereich hinter dem Körper liegen, wo die Strömung beginnt, sich zu verwirbeln. Besonders auffällig sind die Wirbel im oberen Teil der Strömung. Die Zugabe des Polymers beeinflusst die Strömung, indem sie die Wirbel stärker in die Länge zieht.

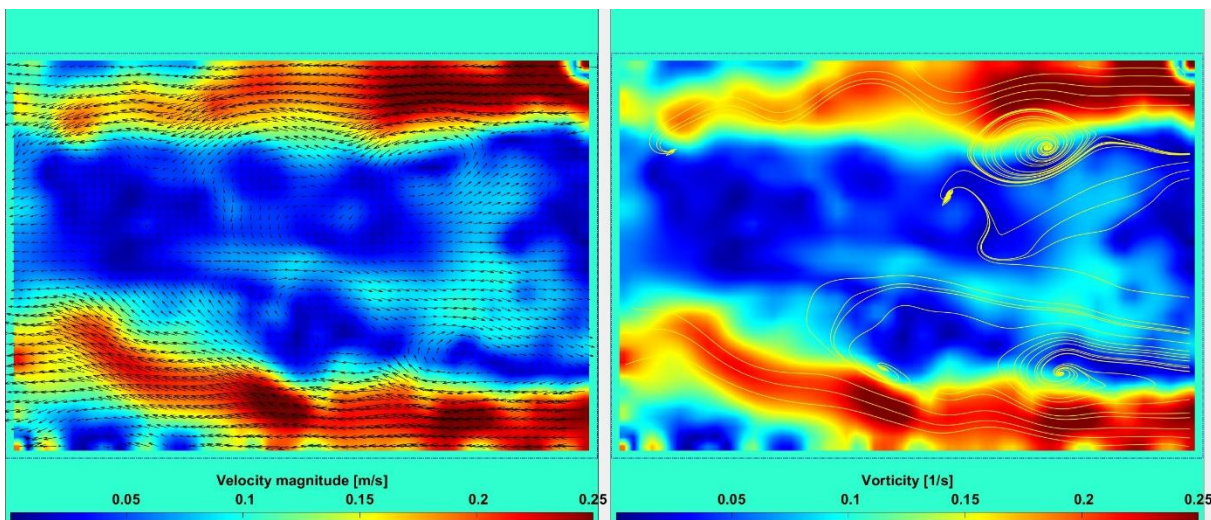


Abbildung 12 High viscosity mit der Zusatz von PIB3-Polymeren bei $Re=600$

In Abbildung 12 ist ein Öl mit hoher Viskosität und der Zugabe von PIB3-Polymer dargestellt. Die Wirbel sind weniger chaotisch ausgeprägt als im Fall von Öl mit niedriger Viskosität. Die Zugabe des Polymers beeinflusst die Strömung,

indem sie die Wirbel stärker in die Länge zieht und ordnet, wodurch der Strömungsfluss stabiler und gleichmäßiger wird.

5.5 Wärmeübergangskoeffizienten

Zur Bewertung der Effizienz des Wärmeübergangs in Abhängigkeit vom verwendeten Öl wurden die Wärmeübergangskoeffizienten k für alle acht Öle bei verschiedenen Reynolds-Zahlen berechnet.

Zur Berechnung der Nusselt-Zahl wurde eine empirische Formel verwendet, die für die Umströmung eines Rohrs gilt. Diese Formel wurde aus dem Buch "Übungsbuch über Wärme- und Stoffübertragung" übernommen [10]. Obwohl es sich in unserem Fall um einen Kanal mit rechteckigem Querschnitt handelt, wurde diese Formel aufgrund ihrer hohen Genauigkeit und Anwendbarkeit unter den gegebenen Bedingungen gewählt.

Die charakteristische Länge wurde im Fall eines Kanals mit rautenförmigem Querschnitt als Diagonale der Raute gewählt (0.01m).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

Abhängigkeit des Wärmeübertragungskoeffizienten vom Muster bei verschiedenen Re-Zahlen

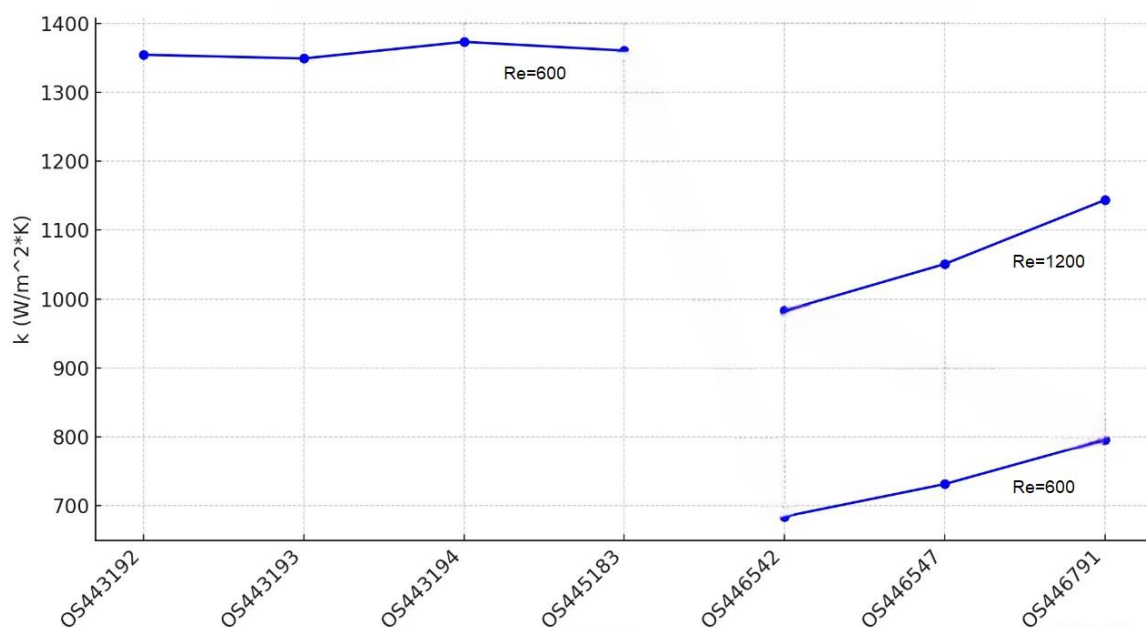


Abbildung 13 Abhängigkeit des Wärmeübertragungskoeffizienten vom Muster bei verschiedenen Re-Zahlen

Datenanalyse:

Für Öle mit hoher Viskosität erwiesen sich die Wärmeübergangskoeffizienten als höher, was auf höhere Prandtl-Zahlen und verbesserte Wärmeübertragungsbedingungen aufgrund der erhöhten Viskosität und Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen ist.

Eine typische Berechnung für ein Öl ist in [Anhang 1](#) angegeben.

Die Streuung der Werte im Bereich von 600 bis 1400 W/(m²·K) ist durchaus realistisch und typisch für Ölströme in Kanälen mit einer ähnlichen Geometrie.

VI. Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Arbeit wurden umfassende Untersuchungen der Hydrodynamik und des Wärmeübergangs des Ölstroms in einem Kanal durchgeführt.

Die Ergebnisse des Experiments bestätigen die hohe Effizienz der PIV-Methode zur Analyse der hydrodynamischen Eigenschaften des Ölstroms bei der Kühlung von Batterieeinheiten.

Die Auswahl des Öls mit optimaler Viskosität und Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine effektive Temperaturregelung und verringert die Wärmebelastung des Systems.

Literaturverzeichnis

1. IEA. (2022). World Energy Outlook 2022. [International Energy Agency](<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>)
2. IEA (International Energy Agency). (2024). "The world's electric car fleet continues to grow strongly, with 2024 sales set to reach 17 million." [IEA Global EV Outlook 2024](<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>)
3. IEA (International Energy Agency). (2024). "Executive Summary – Global EV Outlook 2024." [IEA Global EV Outlook 2024 Executive Summary](<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>)
4. Comau builds 'high-performance' automation system for NIO electric drive production – Robotics & Automation News. [Comau Automation Solution for NIO](<https://roboticsandautomationnews.com/2023/06/29/comau-builds-high-performance-automation-system-for-nio-electric-drive-production/24213>)
5. Chevron Phillips Chemical Company LP. (2019). Synfluid PAO 6 cSt [Datenblatt]. <https://www.cpchem.com/sites/default/files/2020-12/Synfluid%20PAO%206%20cSt.pdf>
6. Roe, C., et al. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. [DOI:10.1016/j.jpowsour.2022.231094](<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094>)
7. Zhang, W., et al. (2021). Der Effekt der Reduzierung des thermischen Kontaktwiderstands auf die Leistung des Batteriethermomanagementsystems. [DOI:10.1002/er.6491](<https://doi.org/10.1002/er.6491>) Experimentelle und theoretische Analyse der Immersionskühlung eines Li-Ionen-Batteriepacks <https://asmedigitalcollection.asme.org/electrochemical/article/21/4/041001/1169756>

8. Design und Test von Immersionskühlsystemen für Lithium-Ionen-Batterien
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117876>
9. Flüssigkeitsimmersionskühlung: Eine nachhaltige Lösung für das Thermomanagement von Batterien
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431121002309>
10. Zatsckow, F.F., Kerimow, R.W., Welitschko, W.I. Übungsbuch über Wärme- und Stoffübertragung. 2. Auflage. Moskau: Energiya, 2005. S. 48-49(https://drive.google.com/file/d/1qyYnwWUuZnKhe7K1jjU7BHKnGqvSZhQF/view?usp=drive_link).

Anhang 1

Lösung der Aufgabe zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten

Eine typische Berechnung für ein Öl ist im Anhang angegeben.

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten k in einem System mit einer Flüssigkeit, die durch einen Kanal mit einer eingebauten Geometrie fließt (in diesem Fall handelt es sich um Öl, das durch einen Kanal mit rechteckigem Querschnitt und eingebauter rautenförmiger Geometrie fließt), wird eine empirische Formel zur Berechnung der Nusselt-Zahl (Nu) verwendet. Diese Formel ermöglicht die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für den Flüssigkeitsstrom durch ein Rohr (oder einen Kanal) mit einigen Modifikationen für andere Geometrien [\[10\]](#).

Die Formel zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten:

$$k = \frac{Nu * \lambda_m}{L} \quad (1)$$

wo:

- k — Wärmeübergangskoeffizient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),
- Nu — Nusselt-Zahl (dimensionslose Größe),
- λ_m — Wärmeleitfähigkeit des Flüssigkeit ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$),
- L — charakteristische Länge, die im Falle eines Kanals mit rautenförmigem Querschnitt als Diagonale der Raute gewählt werden kann.

Was ist die Nusselt-Zahl (Nu)?

Die Nusselt-Zahl (Nu) — das ist eine dimensionslose Größe, die die Effizienz des Wärmeübergangs zwischen der Flüssigkeit und der Oberfläche beschreibt.. Es hängt vom Strömungsregime (laminar, turbulent), der Reynolds-Zahl (Re) und der Prandtl-Zahl (Pr) ab.

Zur Berechnung der Nusselt-Zahl wurde eine empirische Formel verwendet, die für die Umströmung eines Rohrs gilt. Diese Formel wurde aus dem Buch "Übungsbuch über Wärme- und Stoffübertragun"[\[10\]](#). Obwohl es sich in unserem Fall um einen Kanal mit rechteckigem Querschnitt handelt, wurde diese Formel aufgrund ihrer hohen Genauigkeit und Anwendbarkeit unter den gegebenen Bedingungen gewählt:

$$N_u = C * Re^m * Pr^n \quad (2)$$

wo:

- C , m und n — empirische Koeffizienten, die vom Strömungsregime abhängen (für laminarer Fluss bei $Re_d = 40 \dots 10^3$ werden die Werte verwendet $C=0.052$, $m=0.5$, $n=0.37$; für turbulente Strömung bei $Re_d = 10^3 \dots 2 * 10^5$ werden häufig die Werte verwendet: $C=0.026$, $m=0.6$, $n=0.37$),
- Re — die Reynolds-Zahl, die das Strömungsregime der Flüssigkeit charakterisiert,
- Pr — die Prandtl-Zahl, die von der Viskosität und der Wärmekapazität der Flüssigkeit abhängt.

Im Rahmen des Experiments wurde der Flüssigkeitsstrom bei Reynolds-Zahlen von 600 und 1200 untersucht. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde unter Verwendung der entsprechenden Nusselt-Zahl-Werte für $Re=600$ und $Re=1200$ berechnet. Die Werte der Prandtl-Zahl und der Wärmeleitfähigkeit der Öle wurden aus einer Tabelle mit charakteristischen Flüssigkeitsdaten entnommen.

Weiterhin wird die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten auf der Grundlage der Daten des Öls OS443192 bei $Re=600$ und auf der Grundlage der Daten des Öls OS446542 bei $Re=1200$ bereitgestellt.

$$1. \quad N_u = 0.52 * 600^{0.5} * 240.862419^{0.37} = 96.902$$

Und wir setzen in die Formel (1) ein: $k = \frac{N_u * \lambda_m}{L} = \frac{96,902 * 0,1398}{0,01} = 1354,692375 \frac{W}{m^2 * K}$

$$2. \quad N_u = 0.26 * 1200^{0.6} * 70,42497782^{0.37} = 88,337$$

Und wir setzen in die Formel (1) ein: $k = \frac{N_u * \lambda_m}{L} = \frac{88,337 * 0,1113}{0,01} = 983,1870416 \frac{W}{m^2 * K}$

Die Berechnungen für alle anderen Öle sind im [Anhang.2](#) angegeben.