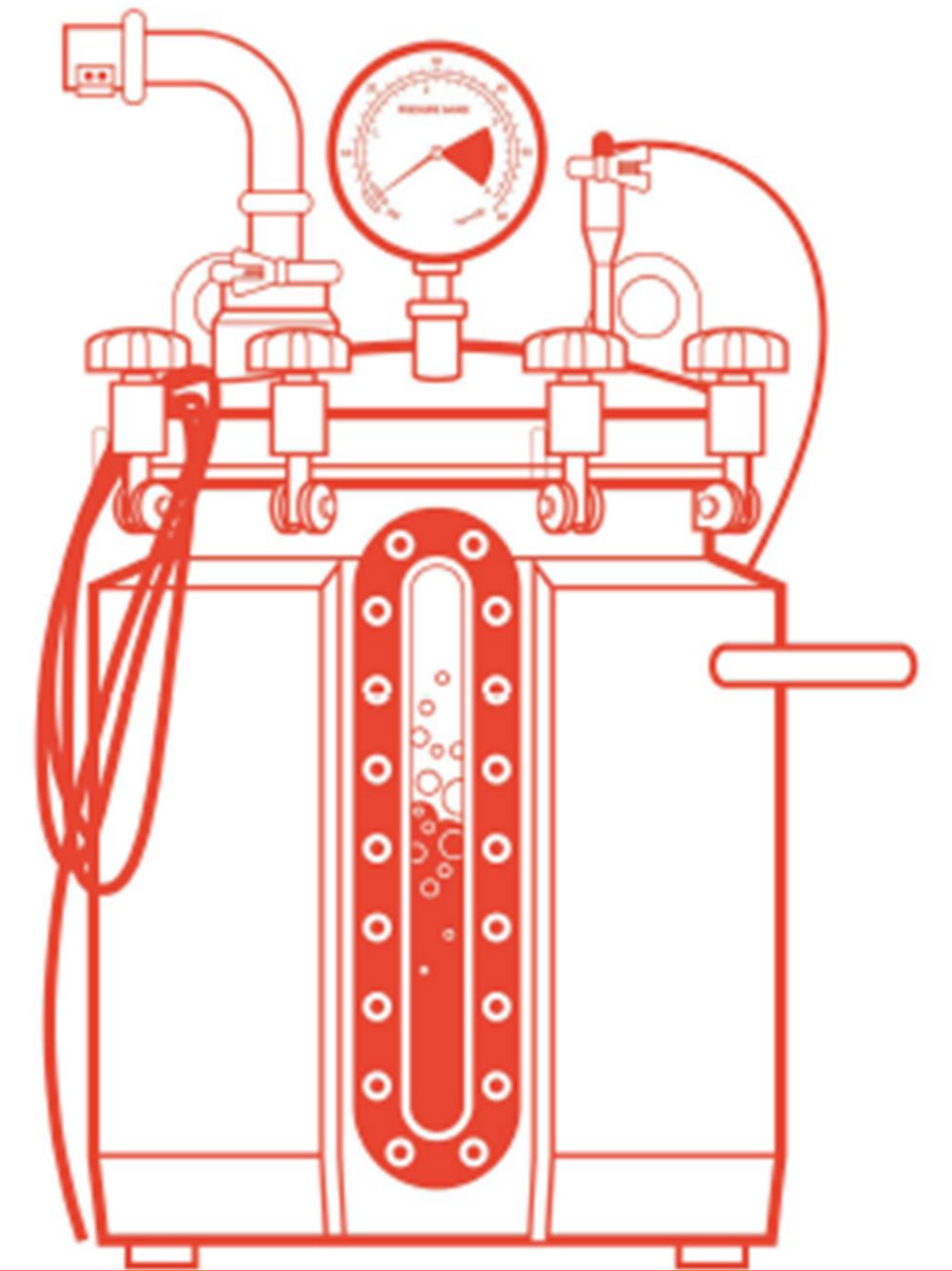


# Charakterisierung des Wärmetransfers von Mikroflussreaktoren

Timo Suter

Bachelor-Thesis, Studienrichtung Chemie- und Bioprozesstechnik

Auftraggeber, Dr. Jean-Philippe Krieger, Syngenta Crop Protection AG  
Expert/in: Dr. Gabriele Caspani, Syngenta Crop Protection AG  
Verantwortliche/r: Prof. Dr. Andreas Zogg, FHNW



## Einleitung & Ziel

Die Prozessentwicklung ist in der chemischen Industrie ein Standard-Verfahren. Dabei ist das Batch-Verfahren historisch weiterverbreitet und länger im Einsatz als kontinuierliche Verfahren [1], [2] [3]. Ein kontinuierlicher Prozess eignet sich besonders für grosse Produktionsvolumen, bei denen das Produkt möglichst konstant und gleichbleibend hergestellt werden muss [4]. Zur Nutzung von kontinuierlichen Prozessen und Ihren Vorteilen, können Flussreaktoren Anwendung finden. Bei der Entwicklung neuer Prozesse werden immer häufiger Mikroflussreaktoren eingesetzt [5], [6].

Der Entwicklungsablauf eines kontinuierlichen und eines Batchprozesses ist unterschiedlich, eine Herausforderung ist es zu wissen ob und wann der Einsatz von Flussreaktoren von Vorteil ist. Durch die Charakterisierung des Mikroflussreaktors kann fundierter eine Entscheidung zur Entwicklungsrichtung getroffen werden. Ein Flussreaktor kann durch den Massentransfer, der Verweilzeit und dem Wärmetransfer charakterisiert werden [13]. Für die Bestimmung des Wärmetransfers kann der Wärmedurchgangskoeffizient des Reaktors ermittelt werden.

Ziel ist es die experimentelle Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Mikroflussreaktors und der Anpassung eines Rechenmodells zur Modellierung des Mikroflussreaktors unter verschiedenen Betriebsbedingungen.

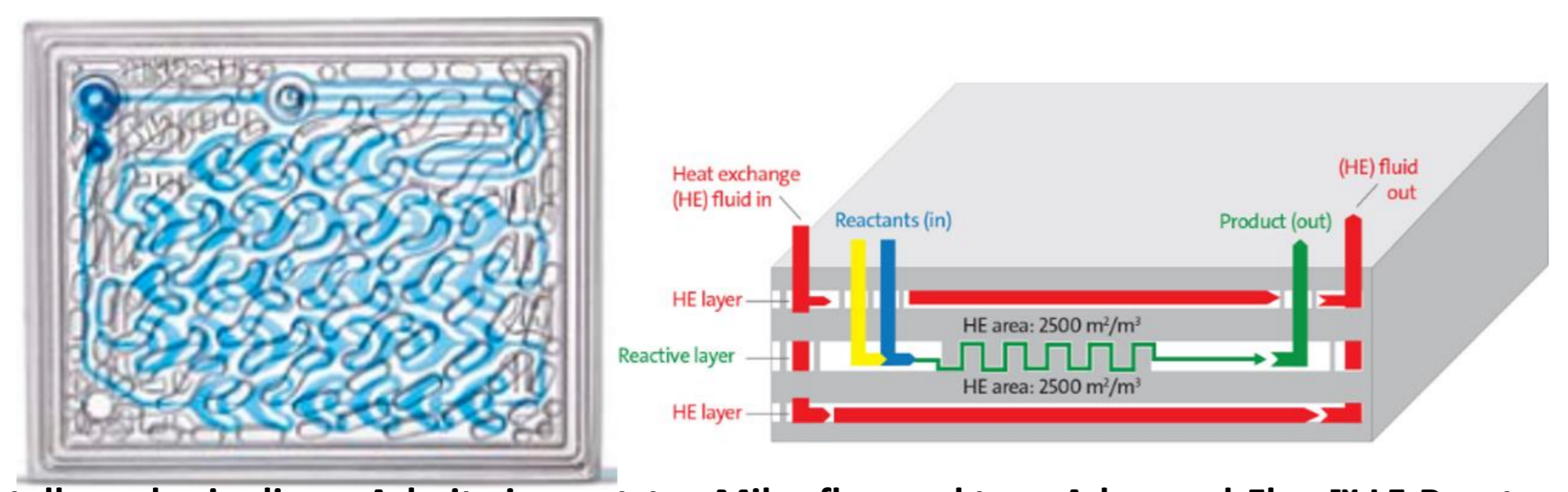
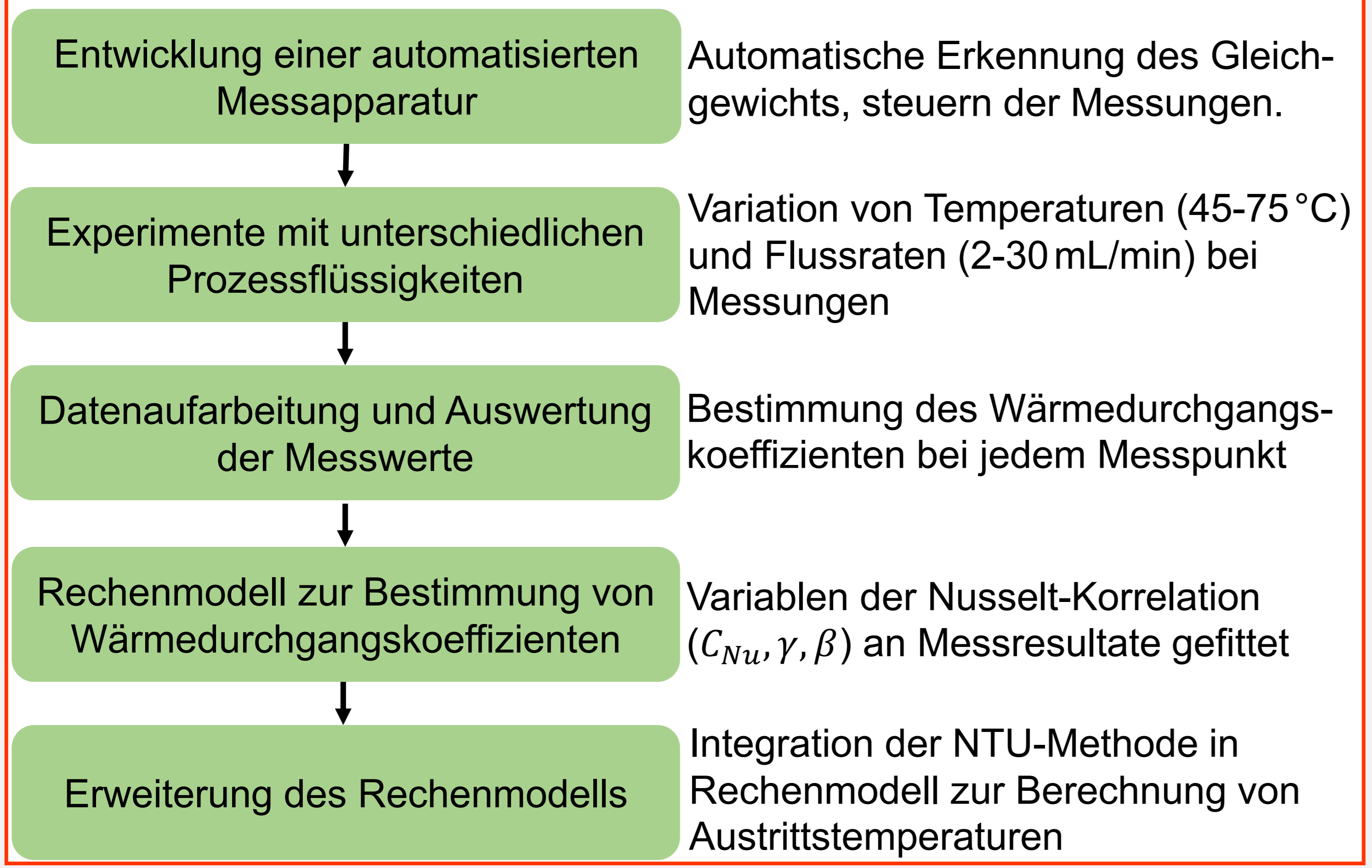


Abbildung 1: Darstellung des in dieser Arbeit eingesetzten Mikroflussreaktors; Advanced-Flow™ LF-Reactor von Corning [18].

## Methode

Es wurde eine automatisierte Messapparatur entwickelt, die während der Versuche Gleichgewichtszustände erkennt und Messungen selbständig steuert. Zur Charakterisierung des Wärmetransfers wurden Messungen bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Aus den Messwerten wurde der Wärmedurchgangskoeffizient ( $k$ , [W/m<sup>2</sup>\*K]) jedes Messpunkts mittels der LMTD-Methode bestimmt. Zur Charakterisierung des Wärmetransfers wurden Variablen einer Nusselt-Korrelation ( $Nu = C_{Nu} * Re^\gamma * Pr^\beta$ ) an die Messresultate gefittet. Durch Erweiterung des Rechenmodells mit der NTU-Methode ermöglicht es die Vorhersage von Austrittstemperaturen bei unbekanntem Parametern.



## Messapparatur

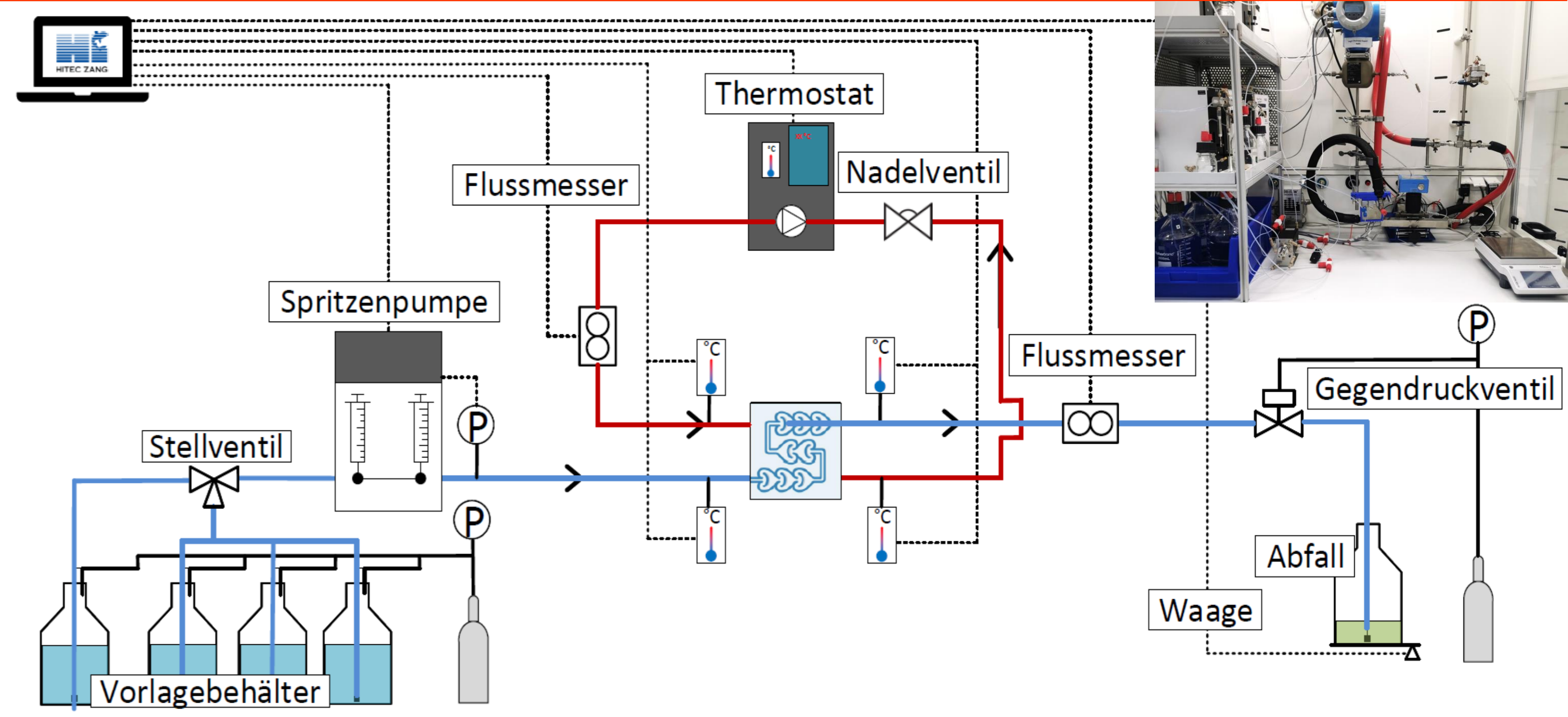


Abbildung 2: Schema der entwickelten Messapparatur. Prozessstrom ist blau und der Mantelkreislauf ist rot dargestellt. Gepunktete Linie sind Geräte und Sensoren, welche mit dem Steuerungsprogramm verbunden sind. Rechts-oben Abbildung des Messaufbaus.

## Ergebnisse

Während einer Messreihe wurde die Temperatur auf der Mantelseite und die Flussrate auf der Prozessseite abgeändert. Als Wärmeträgerfluid wurde Wasser bei allen Experimenten mit konstanten Strömungsbedingungen benutzt. Der Wärmedurchgangskoeffizient steigt mit der Massenflussrate deutlich an, während der Einfluss der Manteltemperatur im untersuchten Bereich geringer ist (Abbildung 3). Darstellung der Messresultate gegenüber Reynoldszahlen, zeigt die Abhängigkeit des Wärmetransfers von der Prozessflüssigkeit. Die Streuung der Resultate ist ersichtlich und verstärkt sich bei höheren Reynoldszahlen. Die Aufteilung der Flüssigkeiten kann besser erkannt werden und einen steileren Anstieg ist bei Flüssigkeiten mit höheren Viskositäten vorhanden.

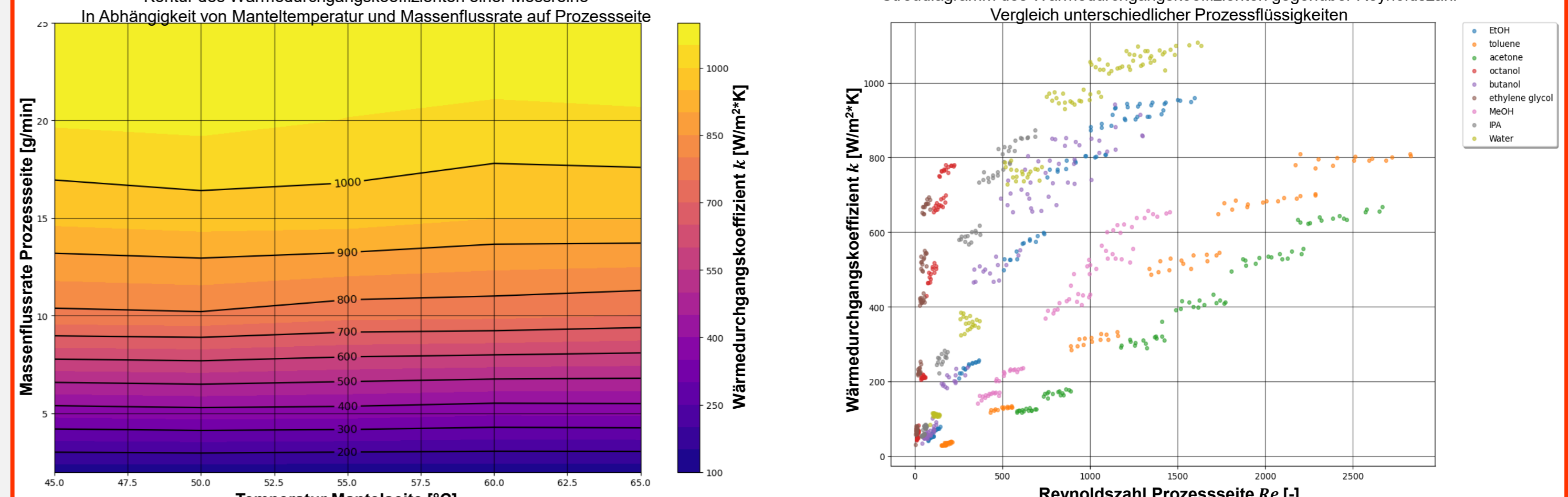


Abbildung 3: Links: Konturgrafik der Resultate einer Messreihe mit Wasser. Rechts: Vergleichsgrafik der Messreihen gegenüber Re. Im Rechenmodell wurden der Wärmewiderstand der Prozessseite durch die Variablen der Nusselt-Korrelation an die Messresultate gefittet. Der Wand- und Mantelwiderstand wurde als Konstante gefittet. Des untersuchten Arbeitsbereich ergab sich folgende Korrelationsgleichung:

$$Nu_R = 4.52 * 10^{-5} * Re^{1.22} * Pr^{1.18}$$

So liegen die k-Vorhersagen ab 400 W/m<sup>2</sup>\*K bei ±20% (mittlere Abweichung: 42W/m<sup>2</sup>\*K). Durch die Erweiterung mittels der NTU-Methode können Austrittstemperaturen mit einer Abweichung von 0.9 °C prognostiziert werden (durchschnittliche Abweichung von 1.6%).

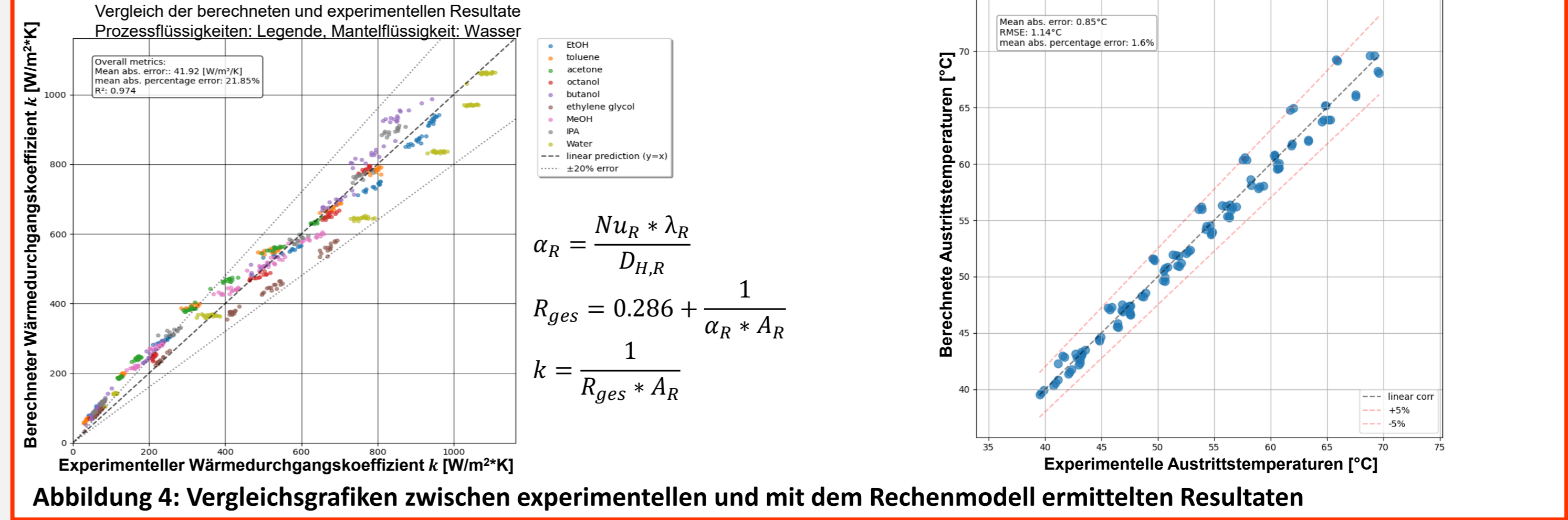


Abbildung 4: Vergleichsgrafiken zwischen experimentellen und mit dem Rechenmodell ermittelten Resultaten

## Schlussfolgerung

Mit der entwickelten Messapparatur konnte der Wärmedurchgangskoeffizient ( $k$ ) des Mikroflussreaktors automatisiert und reproduzierbar charakterisiert werden. Die Reproduzierbarkeit der Messapparatur wurde anhand einer dreimal wiederholten Messreihe mit Wasser bestätigt. Der beobachtete Wertebereich liegt zwischen 50 und 1200 W/m<sup>2</sup>\*K. Der Wärmedurchgangskoeffizient steigt mit der Massenflussrate und zeigt bei höheren Flussraten ein asymptotisches Verhalten, was auf einen zunehmenden Einfluss des konduktiven Wandwiderstands hindeutet. Über den Einfluss der Mantelseite kann keine Aussage getroffen werden. Für Wärmedurchgangskoeffizienten > 400 W/m<sup>2</sup>\*K beträgt die Modellgenauigkeit ±20%. Durch die Erweiterung des Rechenmodell ist es möglich von unbekanntem Parametern im untersuchten Arbeitsbereich die Austrittstemperatur mit einer Abweichung von ±5% und eine leichte Überschätzungstendenz zu bestimmen.

## Referenzen

[1] Brian P. Mason, Kristin E. Price, Jeremy L. Steinbacher, and Andrew R. Bogdan, and D. T. McQuade, "Greener Approaches to Organic Synthesis Using Microreactor Technology," Accessed: Aug. 07, 2025. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr050944c>  
 [2] "Chemistry in flow systems," Accessed: Aug. 07, 2025. Available: <https://www.beilstein-journals.org/beilstein/article4>  
 [3] C. Wiles and P. Watts, "Continuous flow reactors: a perspective," Green Chem., vol. 14, no. 1, pp. 38–54, Jan. 2012, doi: 10.1039/C1GC16022B.  
 [5] S. A. Thorat, L. Chen, and H. Yang, "Continuous Flow Reactors: A Precise Review," Accessed: Jul. 15, 2025  
 [6] "Flow chemistry—Microreaction technology comes of age," Accessed: Mar. 11, 2025. Available: [https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aic.15642?gettt\\_integrator=sciencedirect\\_contenthosting&scifpd=full&source=sciencedirect\\_contenthosting](https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aic.15642?gettt_integrator=sciencedirect_contenthosting&scifpd=full&source=sciencedirect_contenthosting)  
 [13] S. R. L. Gobert, S. Kuhn, L. Braeken, and L. C. J. Thomassen, "Characterization of Milli- and Microflow Reactors: Mixing Efficiency and Residence Time Distribution," Org. Process Res. Dev., vol. 21, no. 4, pp. 531–542, Apr. 2017, doi: 10.1021/acs.oprd.6b00359.