

Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Professur für Energieverfahrenstechnik

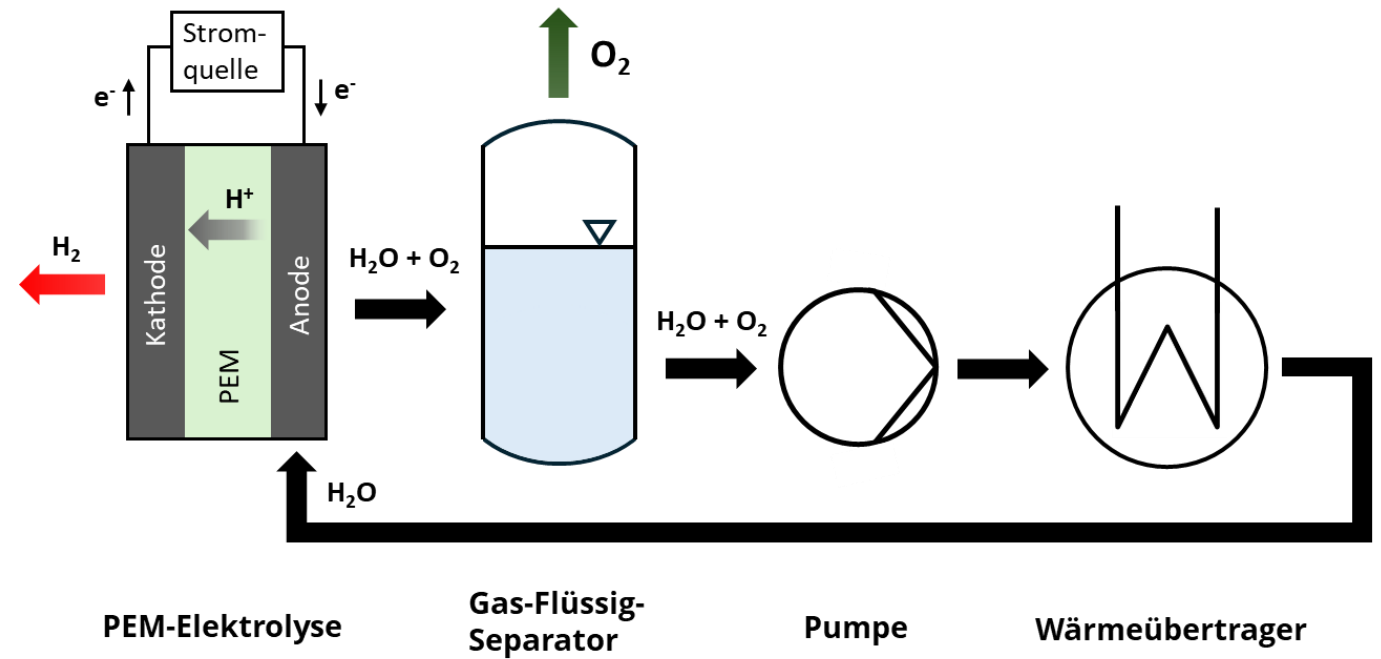
Untersuchung des Einflusses der Blasenbildung aufgrund von Übersättigung auf die Wärmeübertragung

Diplomverteidigung Vincent May
19.05.2025, Dresden

Betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann
Betreuer: Johannes Manthey

Motivation

- Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse) ist etabliertes Elektrolyseverfahren zur Herstellung grünen Wasserstoffs mit schnellen Lastwechseln
- Problemstellung: erhöhte Menge an produziertem Sauerstoff an Anode führt zur Sauerstoffübersättigung des Prozesswassers → Bildung von Gasblasen → Beeinflussung Wärmeübertragung im Kühlkreislauf
- Zielstellung: Untersuchung Einfluss Blasenbildung aufgrund von Übersättigung auf Wärmeübertragung



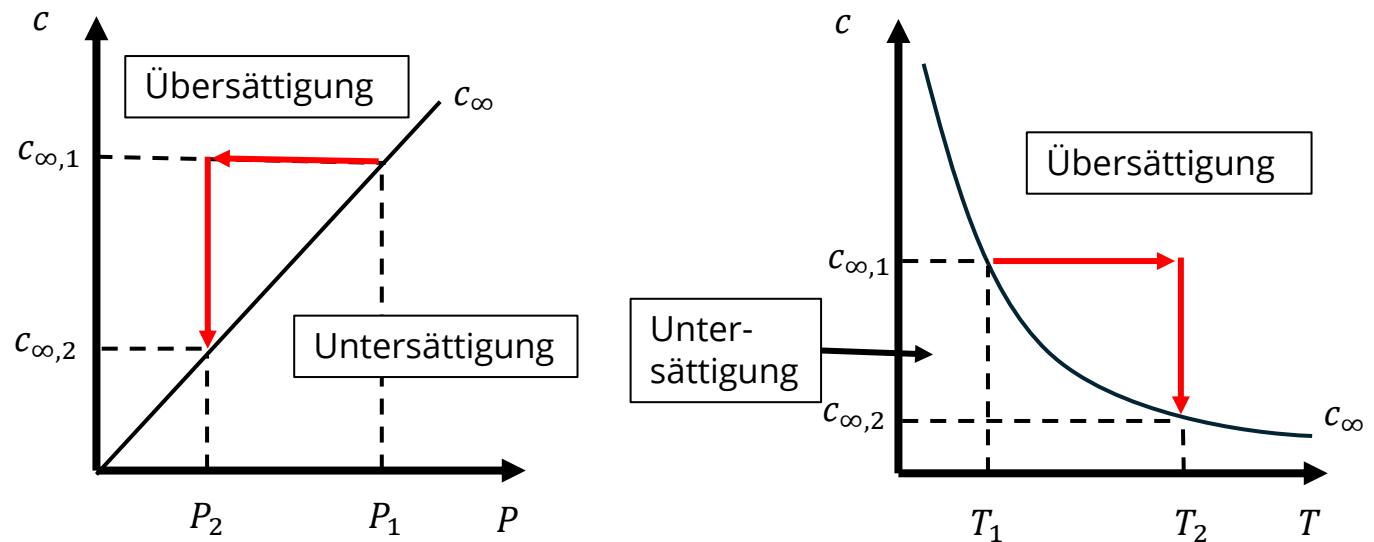
Inhalt

1. Stand der Technik
2. Experimentelle Vorgehensweise
3. Ergebnisse und Diskussion der Experimente
4. Zusammenfassung und Ausblick

1. Stand der Technik

Grundlagen der Blasenentstehung aufgrund von Übersättigung

- Löslichkeit eines Gases in Flüssigkeit c_∞ = Konzentration an gelöstem Gas c im Gleichgewichtszustand
- Sauerstofflöslichkeit ist temperatur- und druckabhängig
- Überschreitung Löslichkeit durch Konzentration = Übersättigung → Bildung von Gasblasen
- Sättigungsrate $S = \frac{\text{Konzentration}}{\text{Löslichkeit}}$
 - $S > 1$: Übersättigung
 - $S < 1$: Untersättigung
- Entstehung Übersättigung zudem durch Bildung von Gasmolekülen wie z.B. bei PEM-Elektrolyse

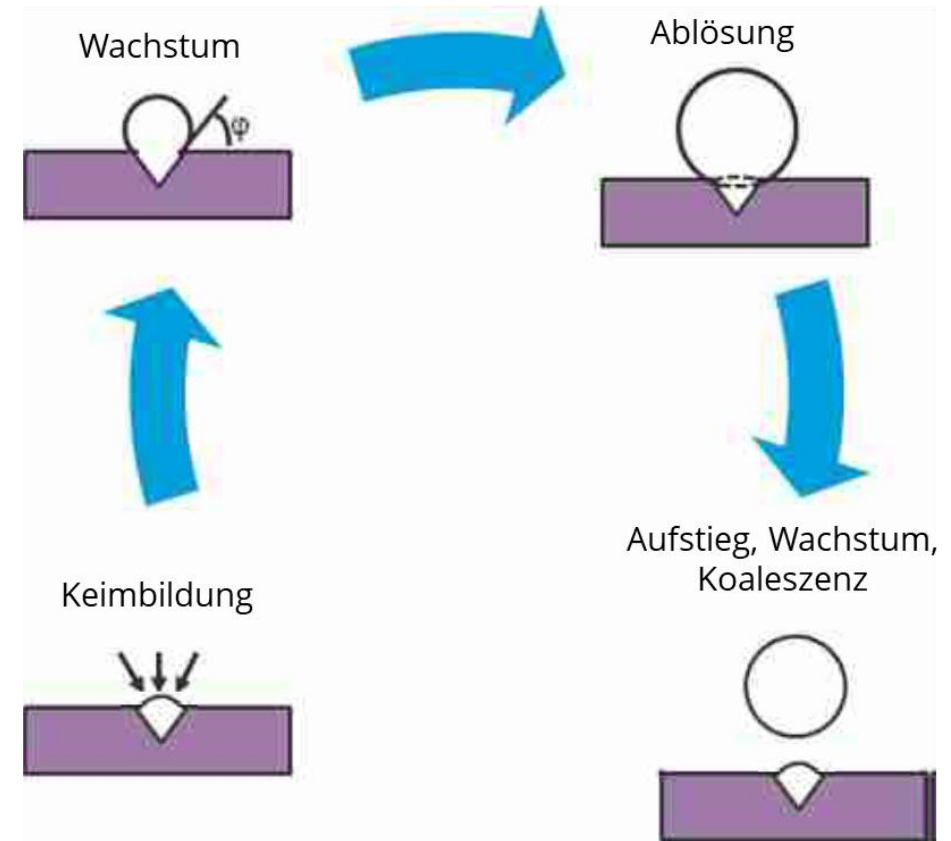


Abhängigkeit der Sauerstofflöslichkeit von Partialdruck und Temperatur

1. Stand der Technik

Grundlagen der Blasenentstehung aufgrund von Übersättigung

1. Bildung von Gasblasen hauptsächlich aus Gaskeimen ausreichender Größe
→ Bildung dieser Gaskeime hauptsächlich an Oberflächen beim Befüllen des Systems mit Flüssigkeit
2. Wachstum an der Keimstelle
3. Blasenablösung bei gewissem Ablöseblasendurchmesser
4. Blasenauftstieg



Schema des Zyklus der Gasblasenbildung

(Lavenson, D.M.; Kelkar, A.V.; Daniel, A.B. et al.: Gas evolution rates – A critical uncertainty in challenged gas-liquid separations. In: Journal of Petroleum Science and Engineering 147 (2016), S. 816-828. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.005>.)

1. Stand der Technik

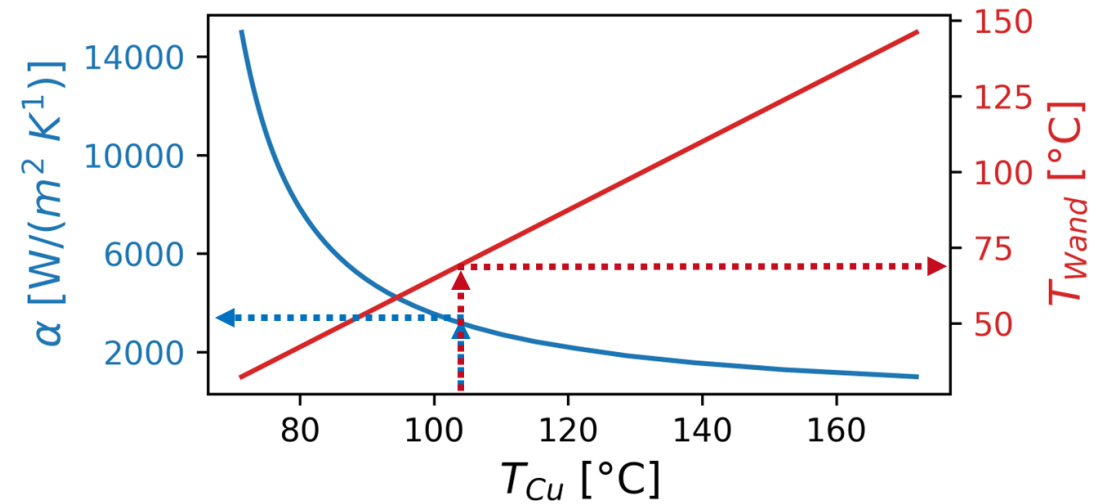
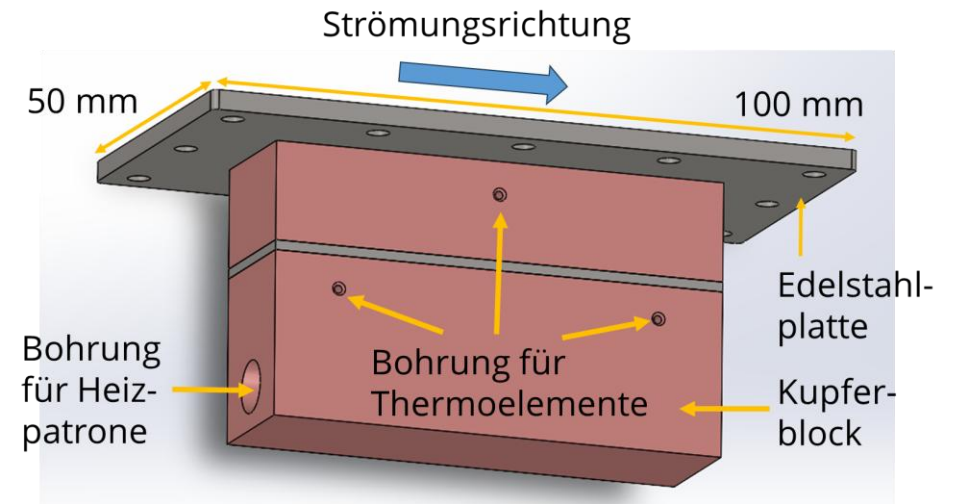
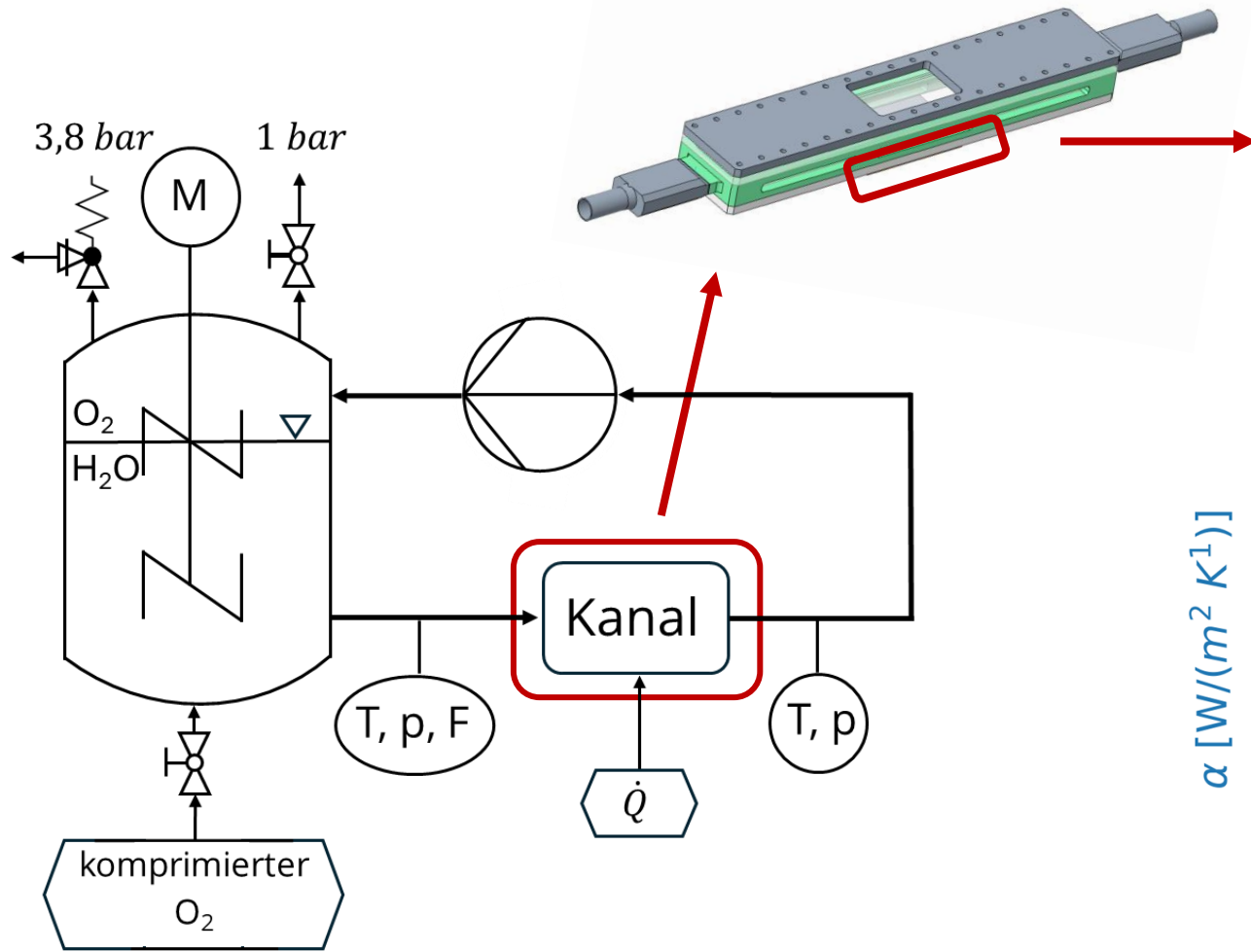
Verwandte Studien

- bisherige Studien betrachten Einfluss des Übersättigungszustands in Strömungen nur infolge lokaler Temperaturerhöhung, nicht infolge eines Druckabfalls

| Studie | Geometrie, Hydraulischer Durchmesser [mm] | Reynoldszahl [-] | Wärmestromdichte [kW/m^2] | Einfluss Übersättigung auf Wärmeübertragung |
|-------------------------|---|------------------|-------------------------------|--|
| Chao et al., 1994 | Kanal, 3,98 | 384 – 845 | 17 – 124 | <ul style="list-style-type: none"> Verbesserung um 20 – 50 % Wärmestromdichte ↑ → Erhöhung ↑ |
| Adams et al., 1999 | Rohr, 0,76 | 5000 – 23000 | 500 – 2500 | <ul style="list-style-type: none"> Verbesserung von 0 – 17 % Re ↓ und Wärmestromdichte ↑ → Erhöhung ↑ |
| Steinke et al., 2004 | Kanal, 0,21 | 150 | 20 – 293 | <ul style="list-style-type: none"> Verschlechterung um bis zu 27 % Wärmestromdichte ↑ → Verringerung ↑ |
| Cioncolini et al., 2007 | Rohr, 4,03 | 20.000 – 46.000 | 210 – 384 | <ul style="list-style-type: none"> kein Einfluss |

2. Experimentelle Vorgehensweise

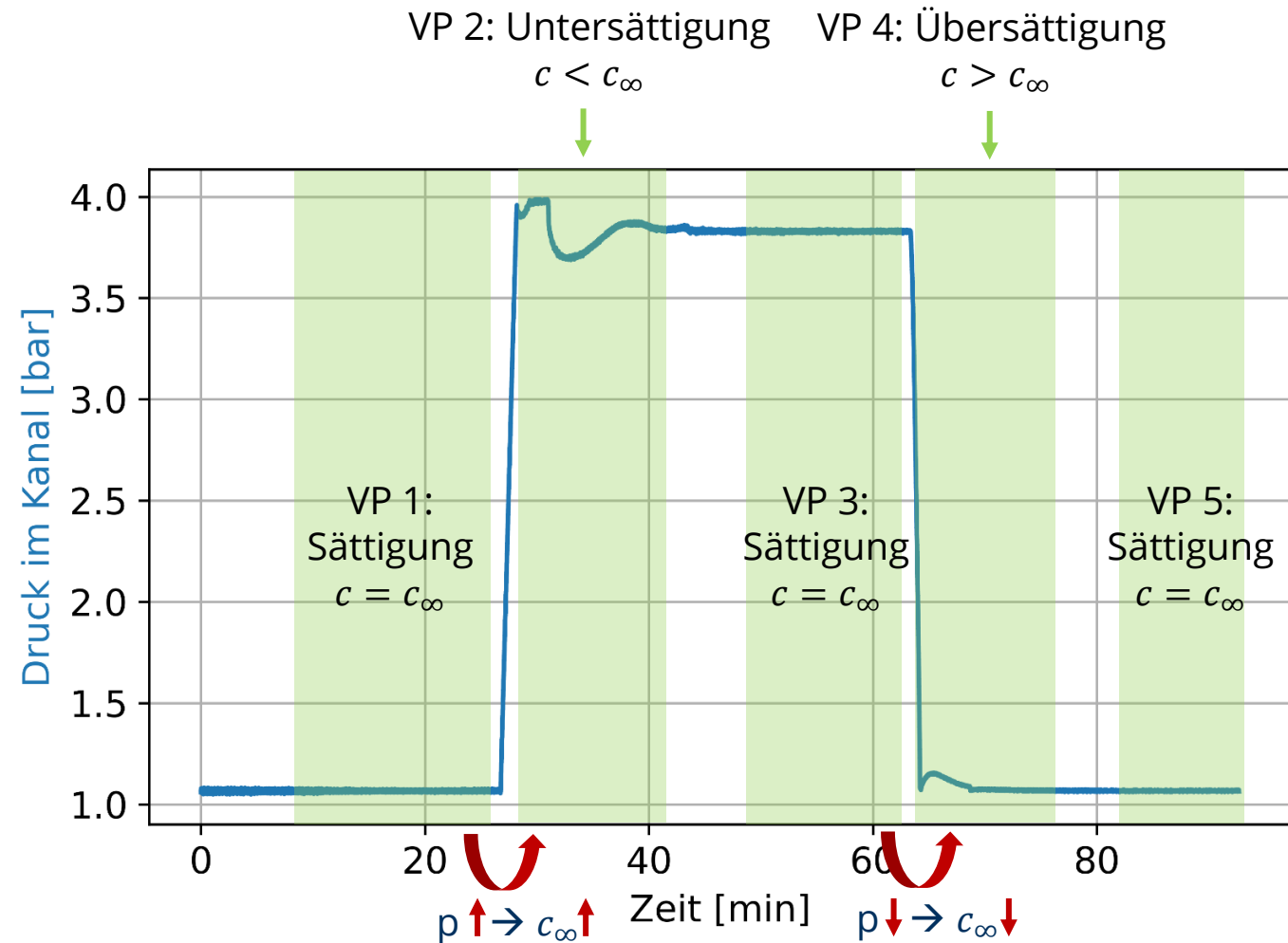
Versuchsaufbau



2. Experimentelle Vorgehensweise

Veruchsdurchführung

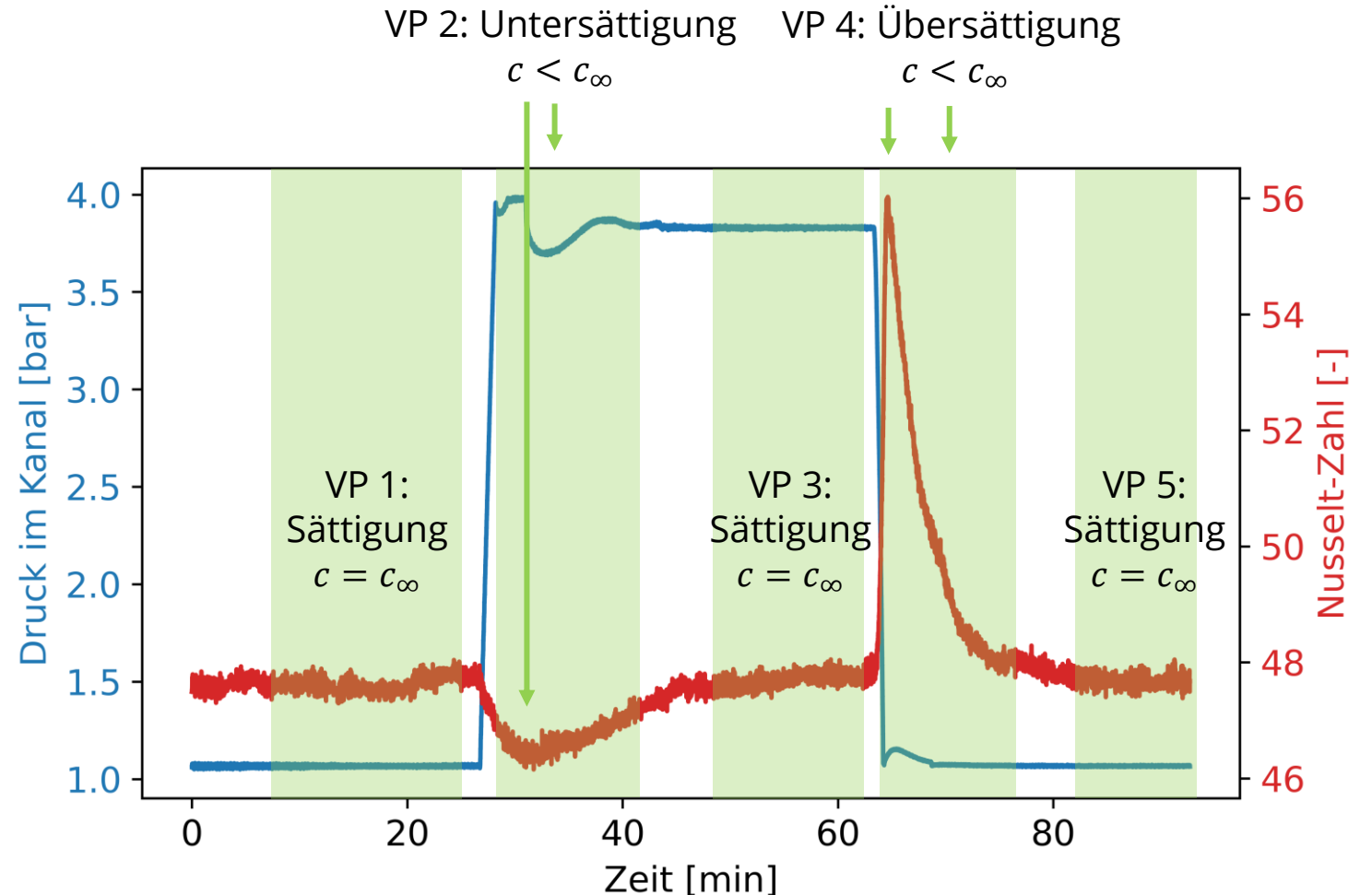
- Erzeugung von Übersättigung und Untersättigung durch sprunghafte Druckänderung
- außerdem lokale Übersättigung der Fluidelemente in der Nähe der beheizten Wand



Druckänderung während einer Versuchsreihe bei konst. Wärmestrom und konst. Reynolds-Zahl

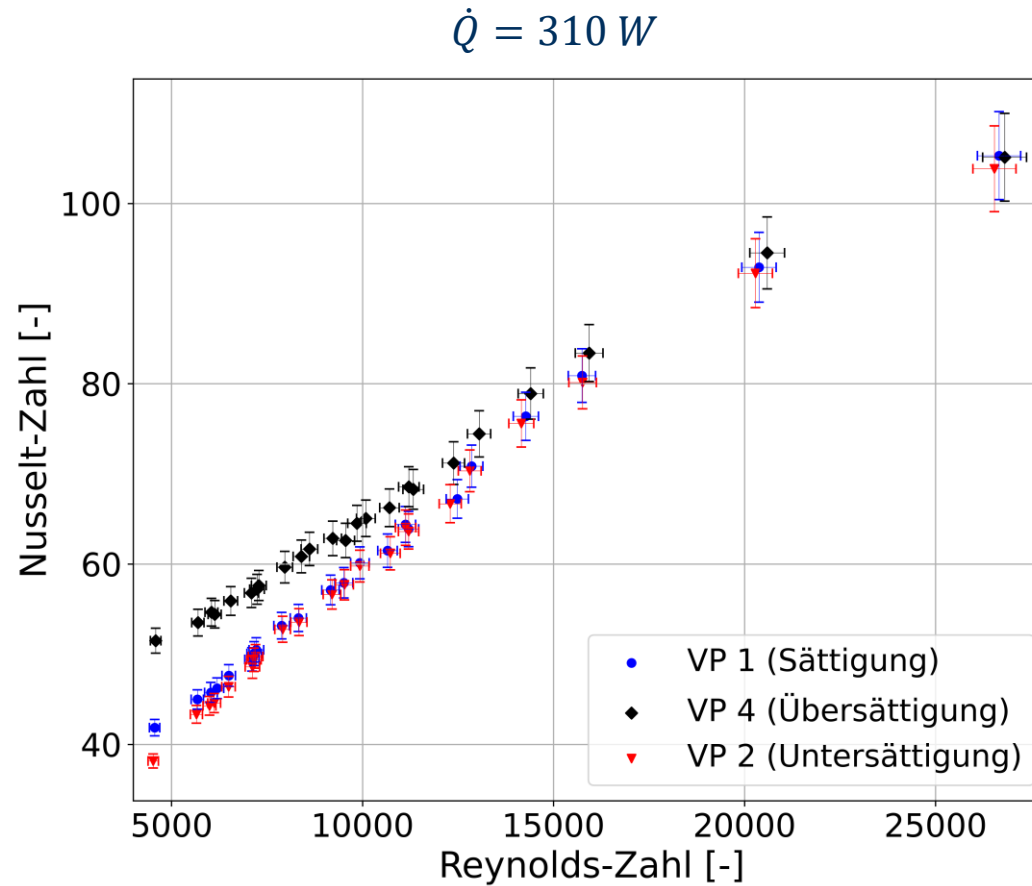
3. Ergebnisse und Diskussion der Experimente

- Untersättigung (VP 2):
Sättigungsrate von ca. 0,3
- Übersättigung (VP 4):
Sättigungsrate von ca. 3,5

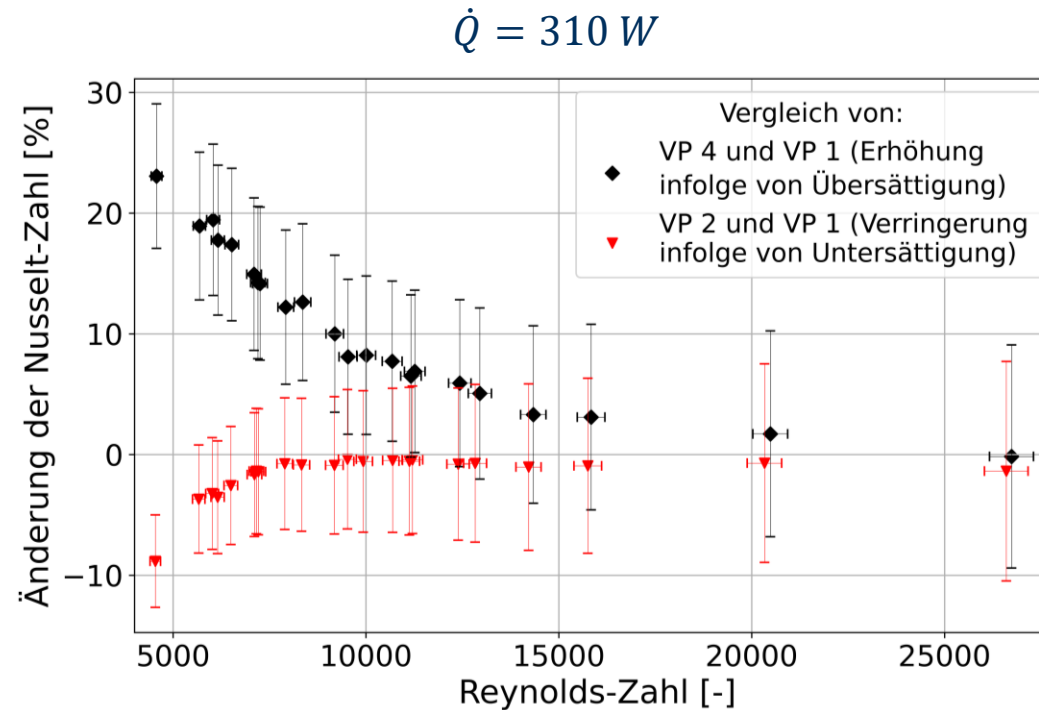


zeitlicher Verlauf der Nusselt-Zahl sowie des Kanaldruckes bei einem Wärmestrom von $\dot{Q} = 310 \text{ W}$ und einer Reynolds-Zahl von $Re \approx 6500$ während einer Versuchsreihe

3. Ergebnisse und Diskussion der Experimente



3. Ergebnisse und Diskussion der Experimente

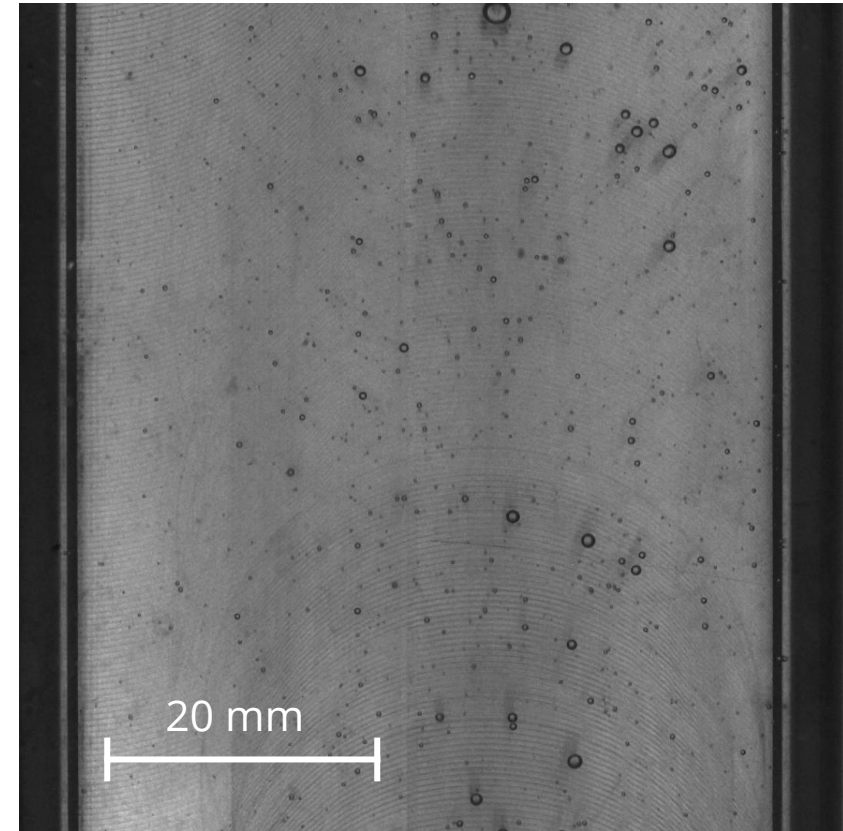


- keine signifikante / geringe Verringerung durch Untersättigung
- Erhöhung durch Übersättigung bei moderaten Reynolds-Zahlen

3. Ergebnisse und Diskussion der Experimente

Ursachen der Verbesserung des Wärmeübergangs infolge von Übersättigung

1. Verstärkung Durchmischung der Kernströmung durch stromaufwärts entstandene Blasen
 2. Verstärkung Durchmischung der viskosen Unterschicht infolge Blasenbildung an der Wand
- jeweils relevanter Beitrag zur Verbesserung der Wärmeübertragung bei geringen Reynolds-Zahlen
- jeweils gestützt durch Ergebnisse bisheriger Studien



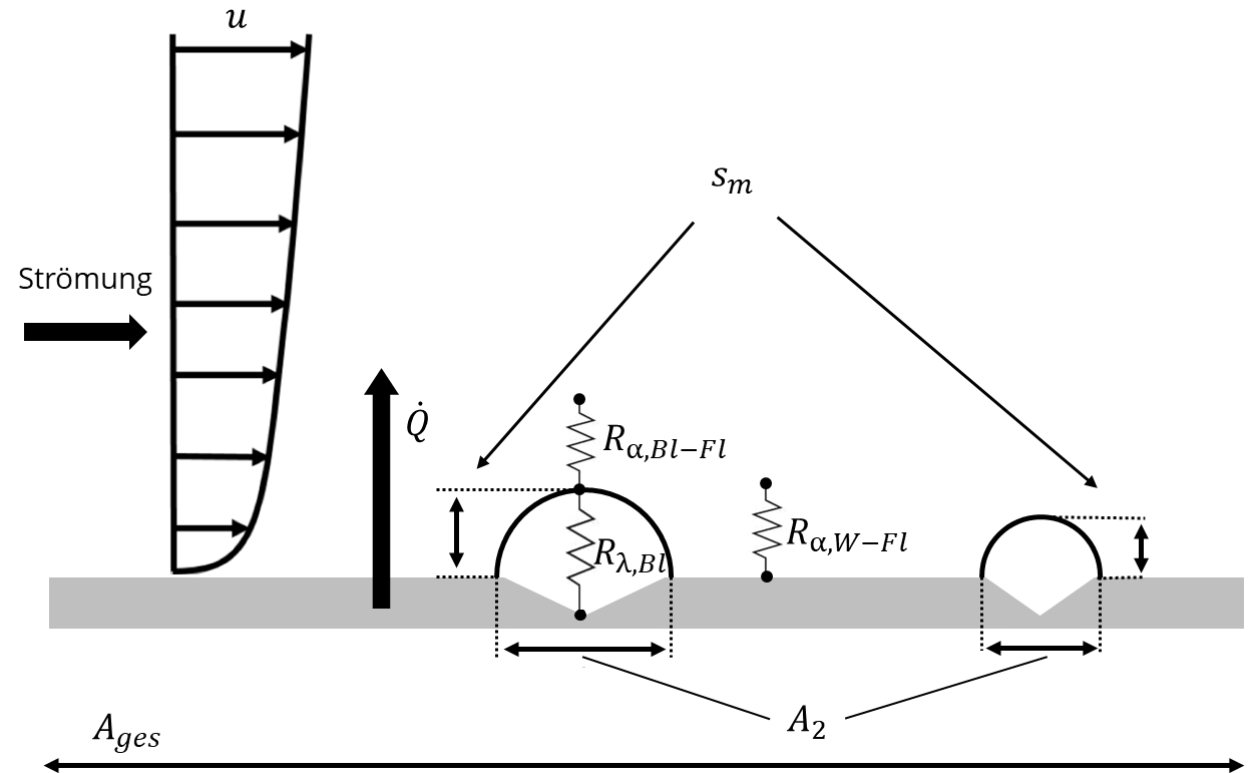
High-Speed-Aufnahmen der Zwei-Phasen-Strömung im Übersättigungszustand bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $u = 0,92 \text{ m/s}$

4. Zusammenfassung und Ausblick

- Experimentelle Untersuchung: Verbesserung Wärmeübergang infolge Übersättigung bei $Re < 15000$
 - zunehmende Verbesserung mit abnehmender Reynolds-Zahl bis zu $(24,3 \pm 6,0) \%$
 - Ursache: Turbulenzerhöhung infolge Blasenbildung stromaufwärts und an Wand
- beobachtete Verbesserung liefert Optimierungsansätze für Auslegung des Wärmeübertragers und Gas-Flüssig-Separators im Kühlkreislauf der PEM-Elektrolyse
- weiterführende experimentelle Untersuchung anzuraten durch Änderung der
 - Übersättigungsrate
 - Rohrlänge vor Kanal
 - Geometrie hin zu Plattenwärmeübertrager

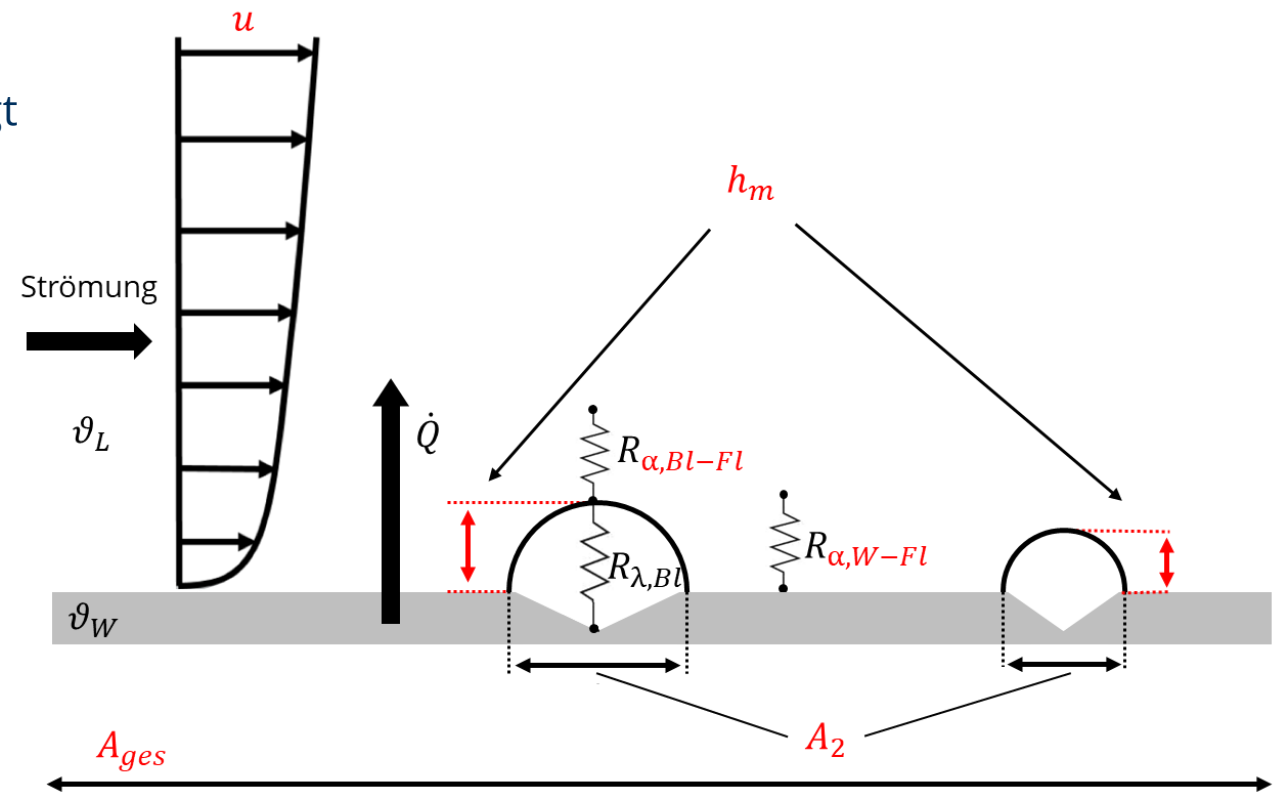
Modellierung Wärmetransport bei an der Wand haftender Blasen

- Berücksichtigung der Übersättigungsrate vereinfacht durch Annahme vers. Anteile von mit Blasen bedeckter Wandfläche $\frac{A_2}{A_{ges}}$
- Ableitung der Einflussgrößen s_m , α_i , u in Abhängigkeit der Blasenbedeckung
- Sensitivitätsanalyse: Variation von u und $\frac{A_2}{A_{ges}}$
→ Verschlechterung des Wärmeübergangs durch Blaseneinfluss



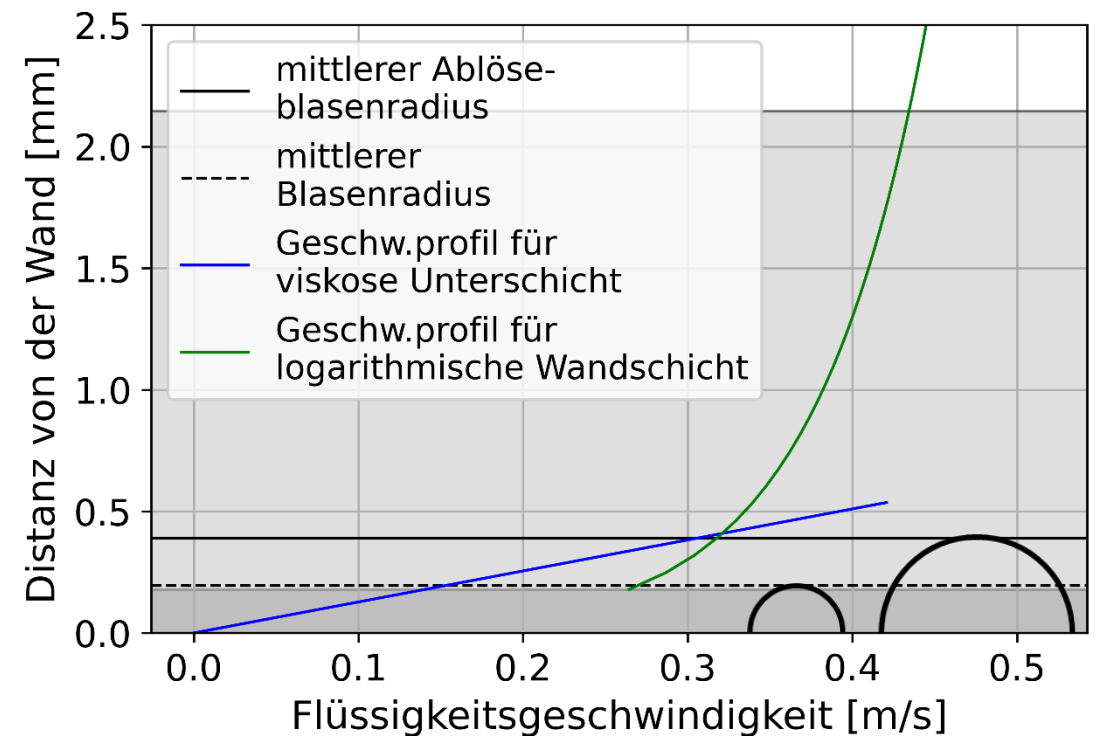
2. Modellierung Wärmetransport bei an der Wand haftender Blasen

- Berücksichtigung der Übersättigungsrate vereinfacht durch Annahme eines Anteils von mit Blasen bedeckter Wandfläche berücksichtigt
- Annahmen:
 - hydrodynamisch ausgebildete turbulente Strömung
 - Kontaktwinkel der Blasen von 90°
- Ermittlung der erforderlichen Temperaturdifferenz zur Einbringung eines bestimmten Wärmestroms:
$$\vartheta_W - \vartheta_l = \dot{Q} \cdot R_{ges}$$
- $R_{ges} = f\left(\frac{A_2}{A_{ges}}, \text{mittlere Wegstrecke } h_m, \alpha_i, u\right)$



2. Modellierung Wärmetransport bei an der Wand haftender Blasen

- Quantifizierung mittlere Wegstrecke h_m unter Berücksichtigung von:
 - Blasengeometrie
 - Wachstumsverhalten
 - Ablöseblasendurchmesser in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit und Strömungsgeschwindigkeit
- Strömungsgeschwindigkeit u : Erhöhung durch Querschnittsverengung infolge Gasbildung vernachlässigbar gering
- Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{Wand-Fl}$, $\alpha_{Blase-Fl}$: Ermittlung mithilfe bekannter Korrelationen aus der Literatur

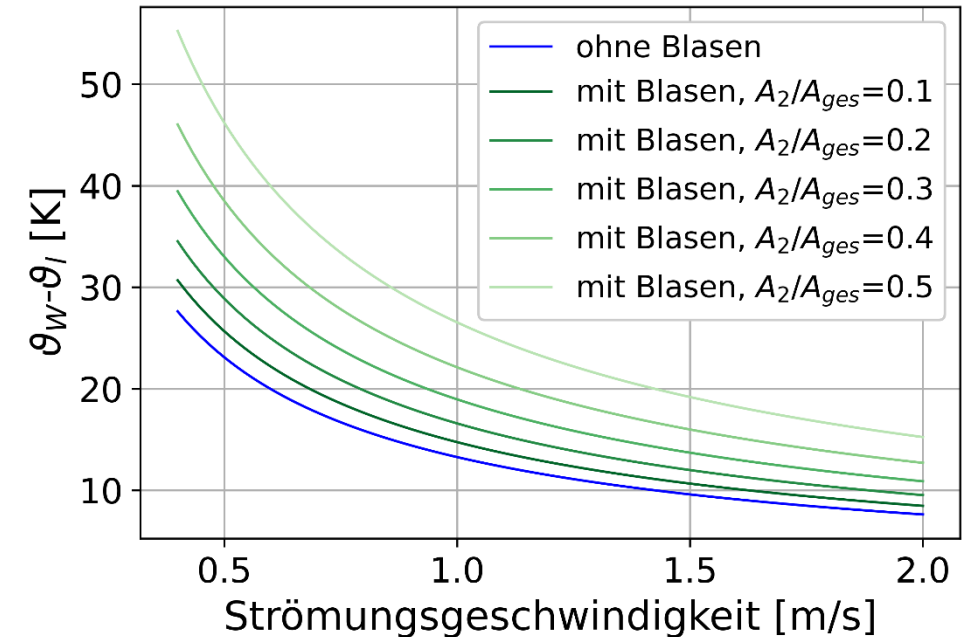
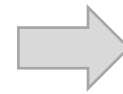


Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht eines schmalen Kanals ($6 \times 50 \text{ mm}^2$) für eine Strömungsgeschwindigkeit von $u = 0,4 \text{ m/s}$

2. Modellierung Wärmetransport unter Einfluss anhaftender Blasen

Sensitivitätsanalyse

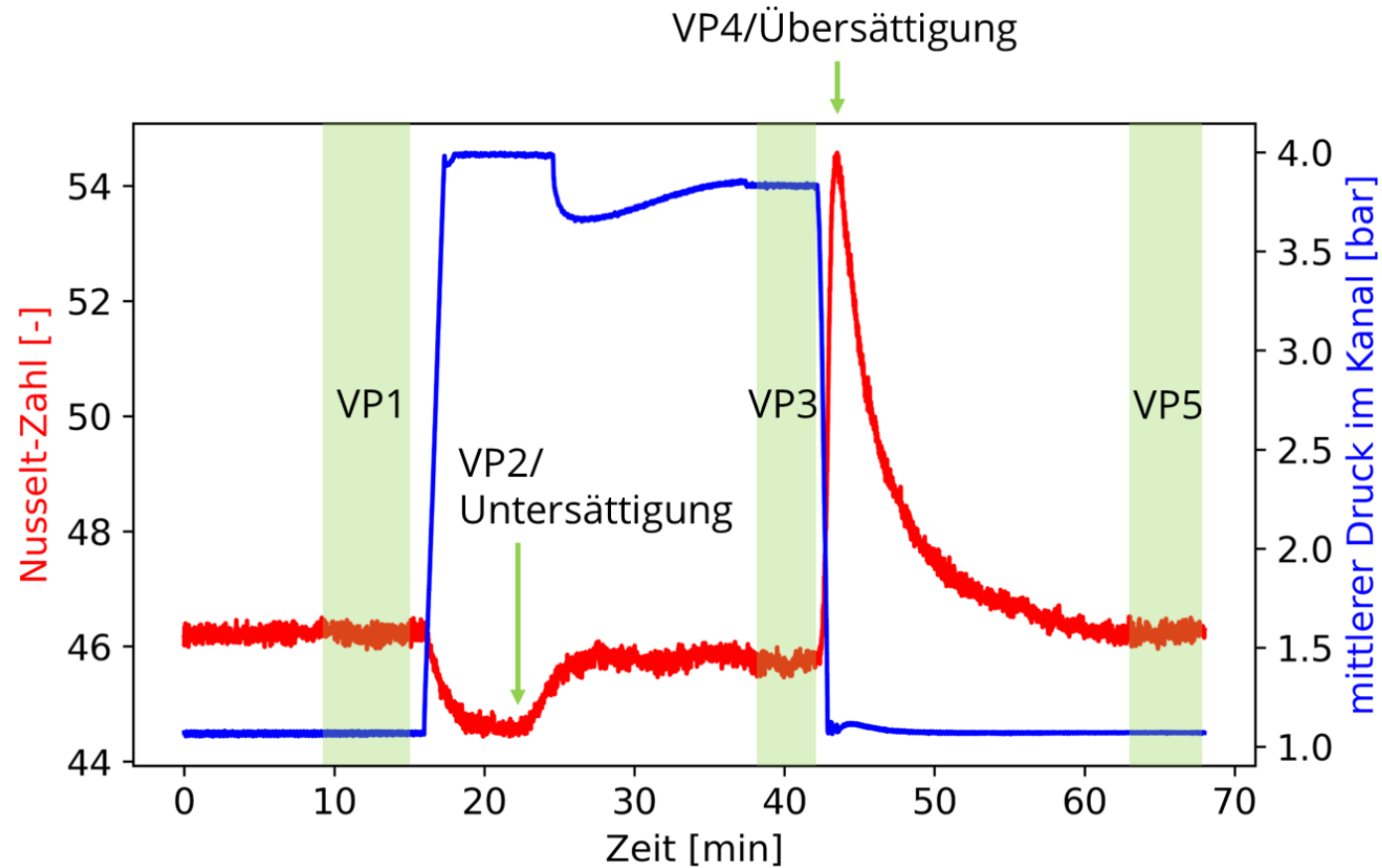
| Parameter | Wert |
|---|---|
| Kanalquerschnitt [mm x mm] | 50 x 6 |
| Fluidtemperatur ϑ_l [°C] | 20 |
| Druck p [bar] | 1,013 |
| Reynolds-Zahl Re [-] | $4300 \leq Re \leq 21400$ bei $0,4 \text{ m/s} \leq u \leq 2 \text{ m/s}$ |
| gesamte beheizte Wandfläche A_{ges} [cm ²] | 50 |
| Eingebrachter Wärmestrom \dot{Q} [W] | 310 |



- Verschlechterung des Wärmeübergangs durch Wärmewiderstand der Sauerstoffblasen unabhängig von

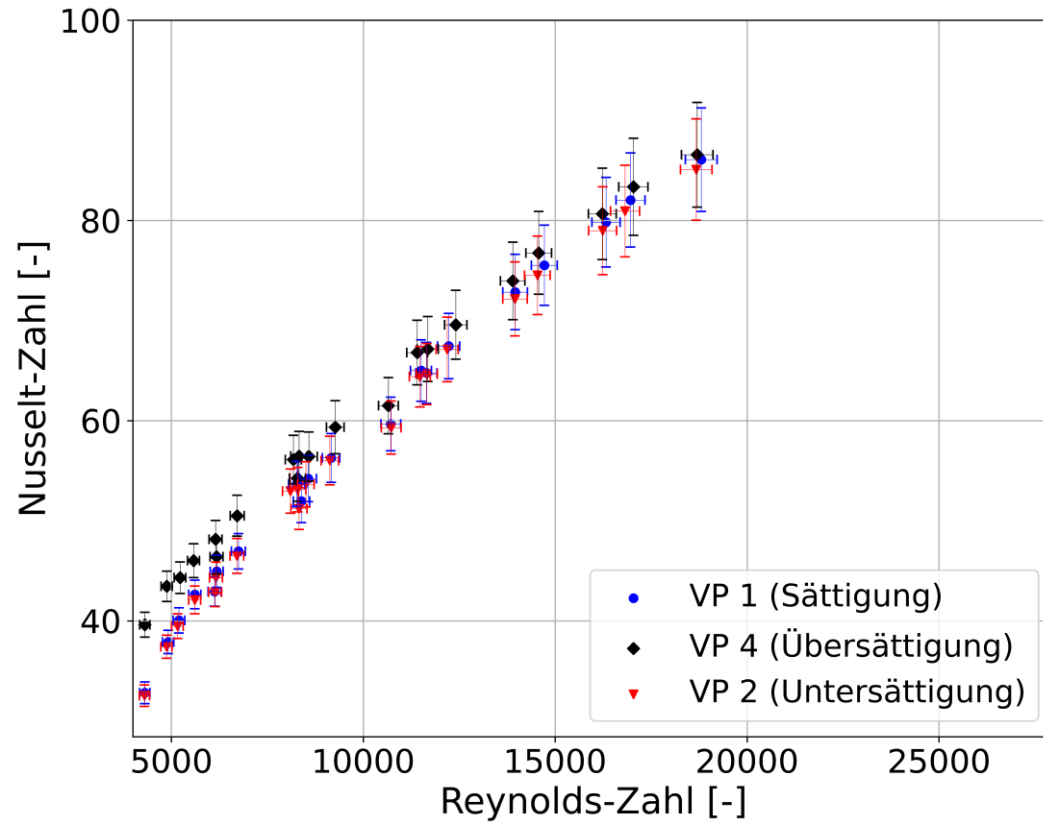
der Strömungsgeschwindigkeit jeweils um $\frac{\frac{A_2}{A_{ges}}}{1 - \frac{A_2}{A_{ges}}} \cdot 100\%$ (Abweichung < 0,01%)

p und Nu vs. Zeit

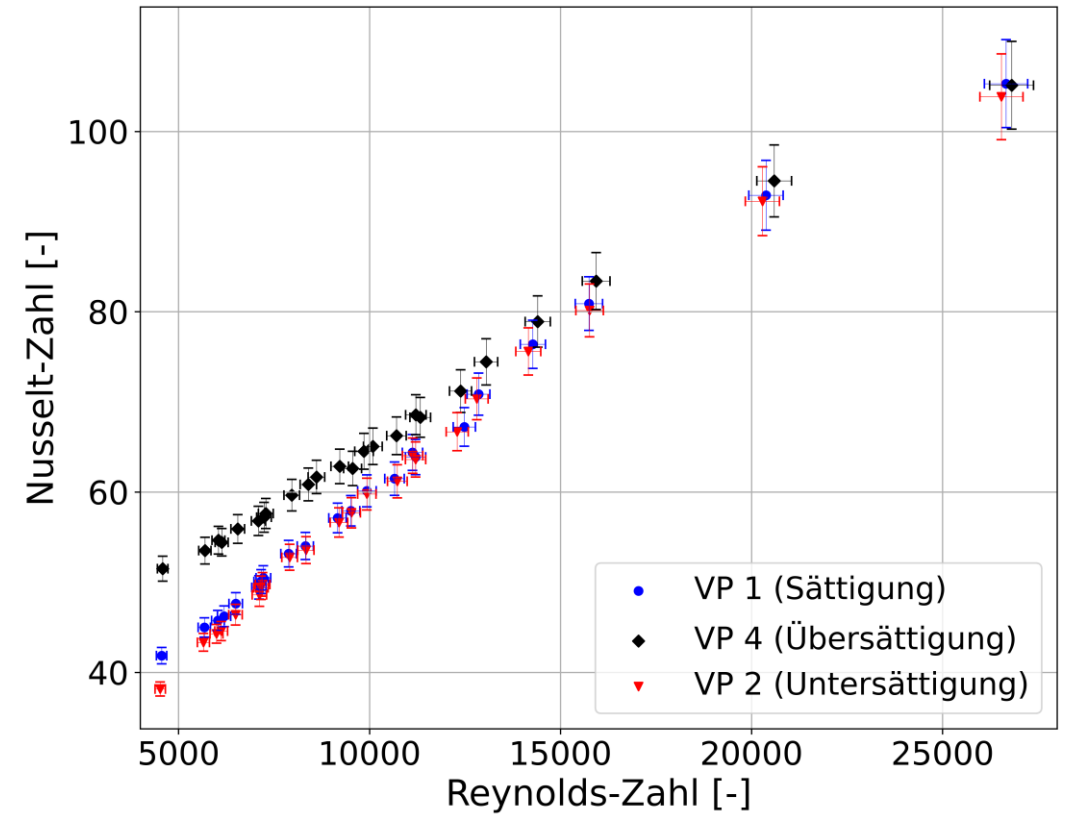


4. Ergebnisse und Diskussion der Experimente

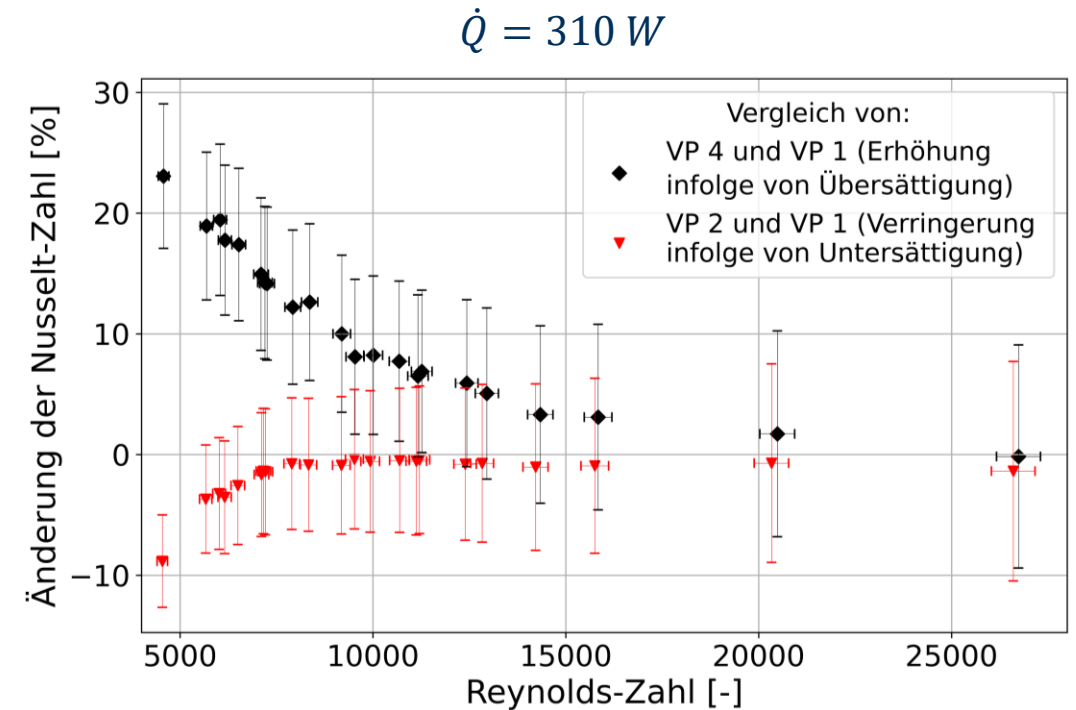
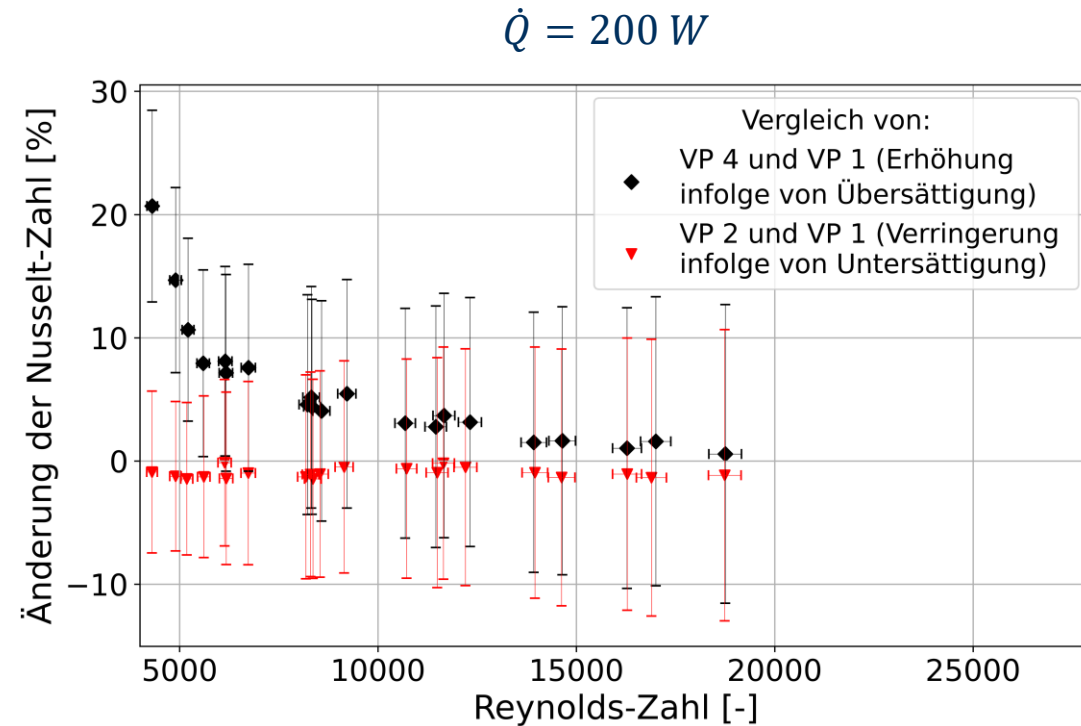
$\dot{Q} = 200 \text{ W}$



$\dot{Q} = 310 \text{ W}$



4. Ergebnisse und Diskussion der Experimente

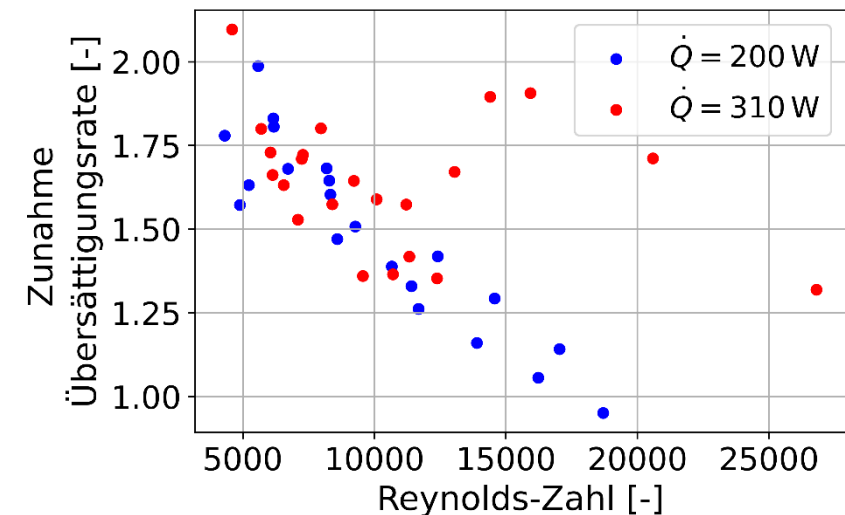
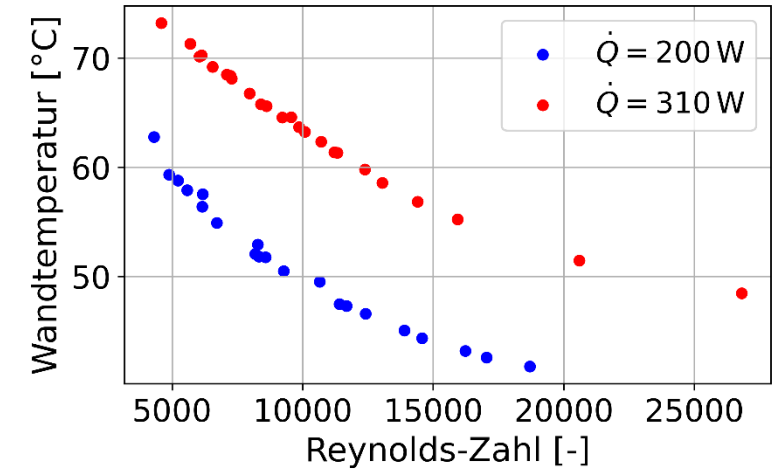
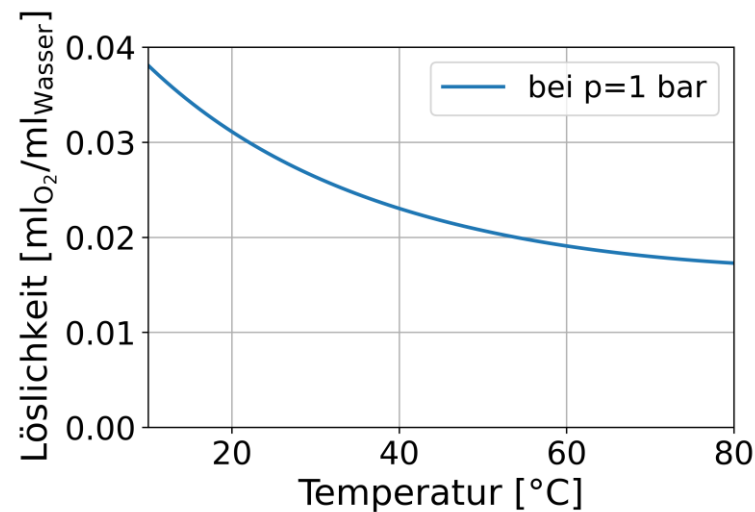


- keine signifikante / geringe Verringerung durch Untersättigung
- Erhöhung durch Übersättigung bei moderaten Reynolds-Zahlen

4. Ergebnisse und Diskussion der Experimente

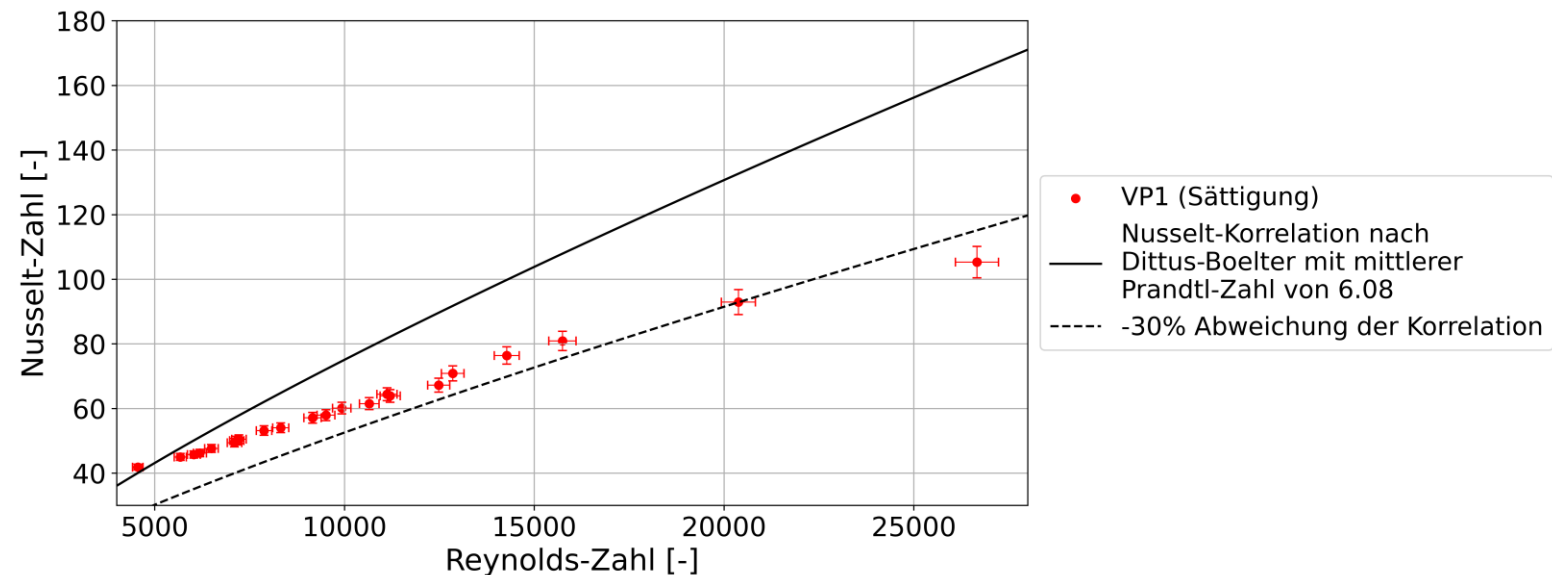
Einfluss der Wandtemperatur

- höhere Wandtemperatur sorgt für geringere Löslichkeit in Wandnähe
 - Zunahme Gasblasenbildung an beheizter Wand
 - Zunahme Durchmischung in viskoser Unterschicht
 - Zunahme Verbesserung Wärmeübergang
- Löslichkeitsunterschied allerdings geringfügig im Vergleich zum generellen Unterschied der Löslichkeit zw. Wandnähe und Kernströmung
- Einfluss Wandtemperatur wird durch Studien aus Literatur gestützt



Fehler infolge bekannter Messabweichungen

- Messabweichungen steigen: Absolute Messabweichungen von Nusselt- und Reynolds-Zahl nehmen mit zunehmendem Wert deutlich zu
- Nusselt-Zahl: Hauptursache der Abweichung ist die Temperaturmessung im Heizblock; relative Abweichung steigt progressiv
- Reynolds-Zahl: Messabweichung vor allem durch Volumenstrom und Viskosität; relative Abweichung bleibt nahezu konstant
- Vergleich mit Theorie: Experimentelle Nusselt-Zahlen liegen unterhalb der Dittus-Boelter-Korrelation, Abweichung >30 % bei hoher Leistung
- Mögliche Ursachen:
 - Nicht vollständig ausgebildete Strömung (Einlaufänge nicht erreicht)
 - Vereinfachungen in der FEM-Simulation (z. B. konstante Wärmeübergangskoeffizienten)
 - Abweichende Kanalgeometrie gegenüber Literatur

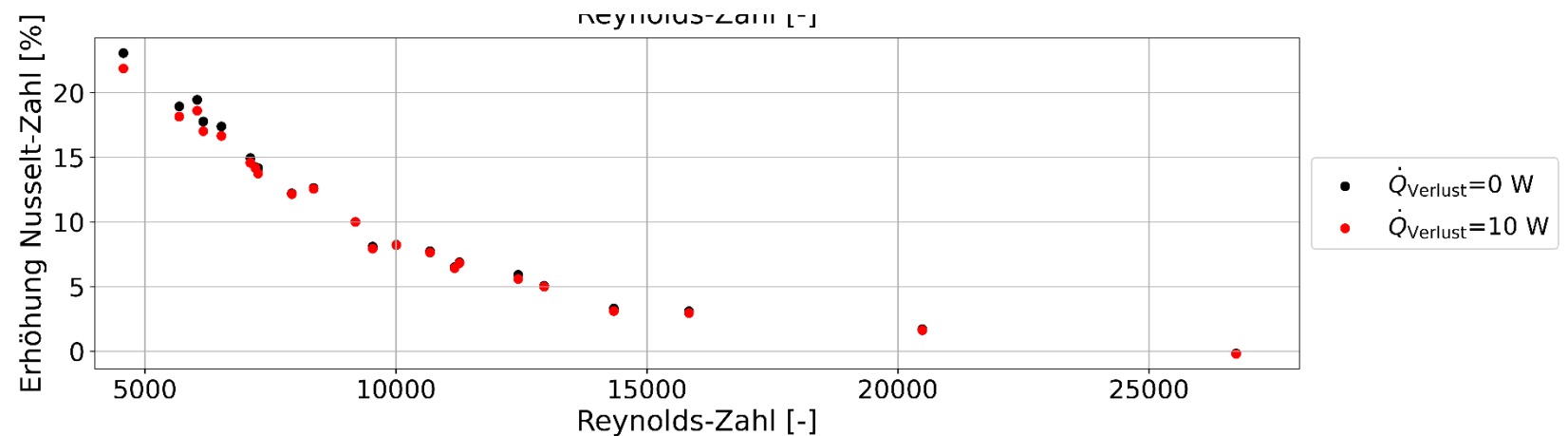


Zu Messabweichung der Veränderung der Nusselt-Zahl

- Messabweichungen für die Veränderung der Nusselt-Zahl liegt allerdings im deutlich geringeren Bereich
- Grund dafür ist, dass die dargestellten Messabweichungen mithilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet wurden
- dieses setzt voraus, dass die Eingangsgrößen voneinander unabhängig sind
- bei den Eingangsgrößen zur Berechnung der prozentualen Veränderung handelt es sich um Werte derselben Größe (Nusselt-Zahl) in zwei verschiedenen Zuständen (Sättigungs- und Unter-/Übersättigungszustand)
- die Nusselt-Zahlen zwischen diesen Zuständen basieren wiederum auf nur geringfügig voneinander abweichenden Eingangsgrößen: leichte Änderung der Temperatur im Heizblock
- Nu im geringen Temp.bereich zw. Sättigung und Über-/Untersättigung korreliert stark
- wird in Fehlerrechnung durch Korrelationskoeffizient berücksichtigt

Fehler infolge eines maximal auftretenden Wärmeverlustes

- Wärmeverluste des Kupferblocks in FEM nicht berücksichtigt da sie nicht direkt messbar sind.
- zur Bewertung Einfluss Verluste: Annahme Worst-Case-Szenario angenommen – maximale Temperatur (85 °C), freie Konvektion ($\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
→ Wärmeverlust: ca. 10 W.
- zweite FEM-Simulation mit reduzierter Eingangsleistung (300 W statt 310 W) durchgeführt
- Absolute Nusselt-Zahlen verringern sich, aber nur geringfügige Veränderung der relativen Erhöhung der Nusselt-Zahl



Messabweichung der Erhöhung der Nusselt-Zahl

- Messabweichungen hoch → innerhalb Messabweichungen negative Veränderung im Übersättigungszustand möglich
- wahren Messabweichungen liegen allerdings im deutlich geringeren Bereich
- Grund dafür ist, dass die hier dargestellten Messabweichungen mithilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet wurden
- dieses setzt voraus, dass die Eingangsgrößen voneinander unabhängig sind
- bei den Eingangsgrößen handelt es sich allerdings um Werte derselben Größe (Nusselt-Zahl) in zwei verschiedenen Zuständen (Sättigungs- und Unter-/Übersättigungszustand)
- die Nusselt-Zahlen zwischen diesen Zuständen basieren wiederum auf nur geringfügig voneinander abweichenden Eingangsgrößen: leichte Änderung der Temperatur im Heizblock, Druck und Volumenstroms in diesen Zuständen sind jeweils gleich