



# Untersuchung der Strömungstopographie im Sprühdüsenfeld auf horizontalen Oberflächen

J. Hof, W. Lenz, H. Pfeifer

8. Oktober 2021



**3. Aachener Ofenbau- und  
Thermoprozess-Kolloquium**  
7. und 8. Oktober 2021



Institut für  
Industriefenbau  
und Wärmetechnik

**RWTHAACHEN  
UNIVERSITY**

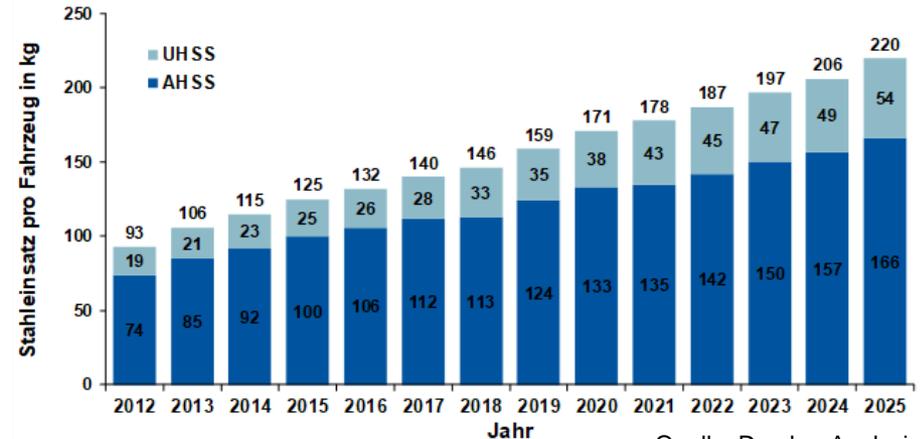
# Motivation

- Steigender Bedarf für hochfeste Werkstoff z.B. in der Automobilindustrie
  - 26% des deutschen Walzstahlbedarfs (ca. 11 Mio. t pro Jahr)<sup>1</sup> für Automotiv

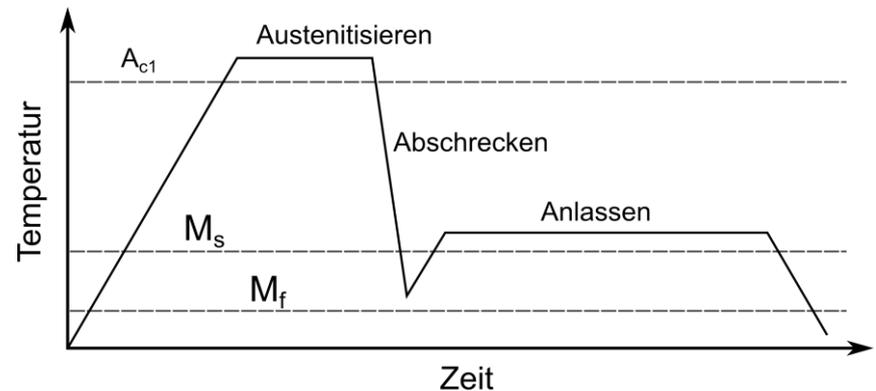
<sup>1</sup> Fakten in der Stahlindustrie, WV Stahl 2017

- Herstellung über Vergütungsprozess
  - Abkühlung als zentraler Bestandteil der Wärmebehandlung
  - Hohe Abkühlraten sind werkstofftechnisch festgelegt und bestimmen die mech. Eigenschaften
    - AHSS Stähle: bis 1000 K/s
    - 6XXX Al-Legierungen: 600 K/s
  - Abkühlraten nicht mit Gaskühlungen realisierbar
  - Verwendung von Wasserkühlungen notwendig

Prognose des AHSS- und UHSS-Einsatzes im Automobilsektor in Nordamerika

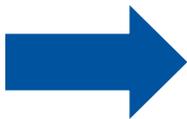


Quelle: Drucker Analysis



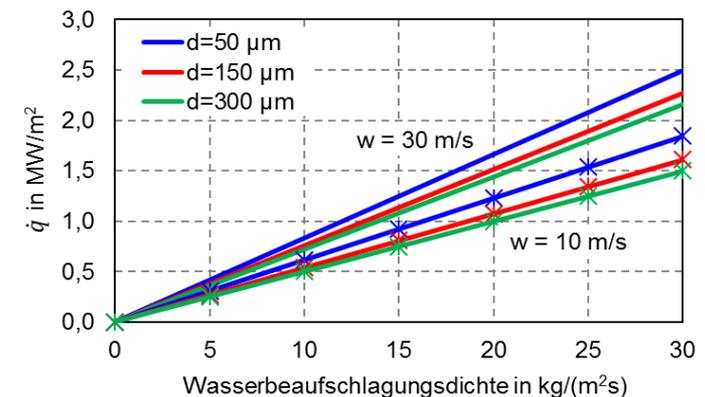
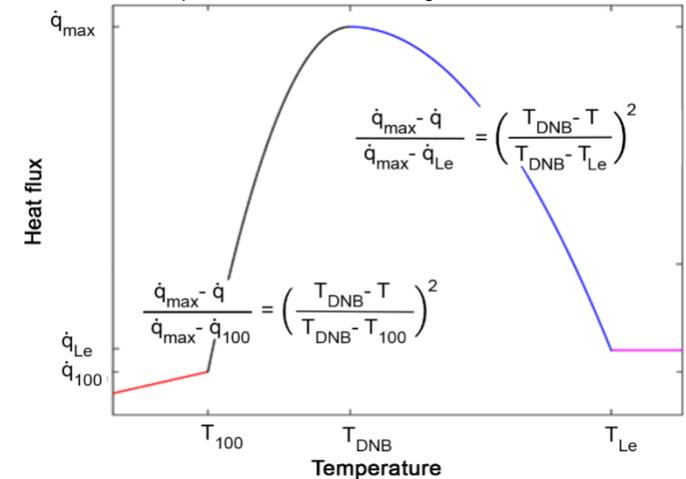
# Herausforderung Wasserkühlung

- Vier temperaturabhängige Phasen
- Sehr hohe temperaturabhängige Wärmeübergänge
- Lokale Gradienten der Wärmeübergänge
- Große Abmaße
- Kontinuierlicher Prozess
- Temperatursensitive Bauteilformen
- Verschieden Wärmebehandlungsstrategien
- Viele abhängige und unabhängige Einflussfaktoren
  - Düsen, Düsenvordruck, Düsenanordnung, Wasserbeaufschlagungsdichte
  - Wasserqualität
  - Bandgeschwindigkeit, Bandbreite
  - Ablaufwasser, Staupunkte, Überlappungsbereiche
- ...



Die große Herausforderung ist eine gleichmäßige Abkühlung mit flexiblen Abkühlraten

Quelle: E. Specht: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Vulkan Verlag 2014



# Parameter für die Sprühkühlung

---

## **Einflussparameter auf den Wärmeübergang bei Einzeldüsen**

- Tropfengröße und –geschwindigkeit
- Beaufschlagungsdichte bzw. -verteilung
- Abstand zur Oberfläche
- Düsenvordruck
- Wasserqualität

Wissenschaftlich  
gut untersucht

## **Zusätzliche Einflussparameter auf den Wärmeübergang bei Düsenfeldern in kontinuierlichen Bandanlagen**

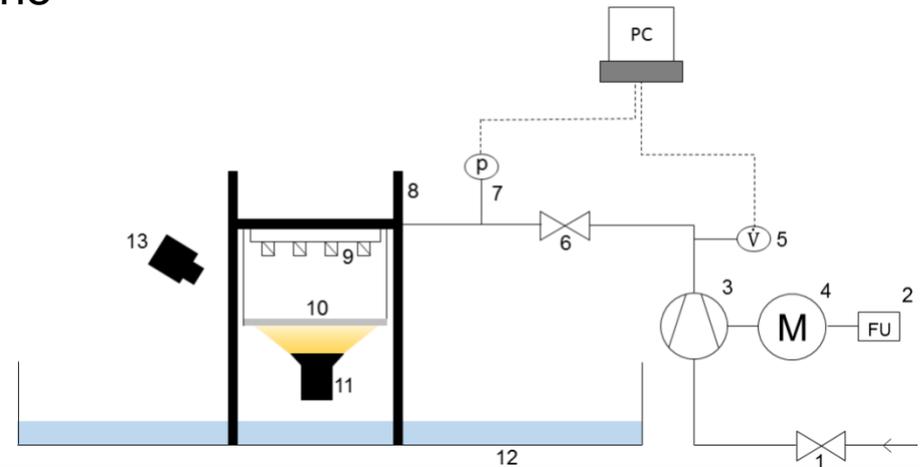
- Bandbreite
- Bandgeschwindigkeit
- Anordnung der Düsen
- Strömungsbildung im Düsenfeld
  - Bildung von Überlappungsbereichen einzelner Düsen
  - Verhalten von Ablaufwasser
  - Bildung von Staupunkten während der Abströmung

Wissenschaftlich  
noch nicht  
ausreichend  
untersucht

# Versuchsstand

## Strömung auf statischen horizontalen Oberflächen

- Versuchsstand mit Sprühdüsenfeld
  - Beliebiger Düsentyp bzw. -größe
  - Variable Düsenanzahl (aktuell: 3x3)
  - Düsenfeldgröße bis max. 400 x 400 mm<sup>2</sup>
  - Variable Abstände zwischen den Düsen (aktuell: 35 - 400 mm)
  - Variabler Abstand zwischen Oberfläche und Düsen (aktuell: 0 - 250 mm)
  - Düsenvordruck (aktuell: 2 - 12 bar)
- Plexiglasplatte als horizontale Oberfläche
- Messtechnik am Versuchsstand
  - Optische Messmethodik
  - Düsenvordruck
  - Durchflussmessung

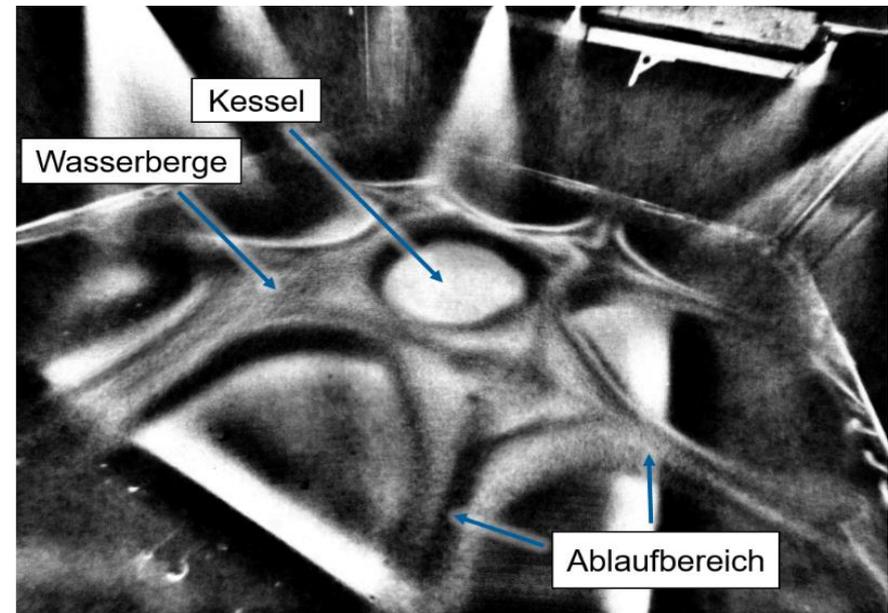
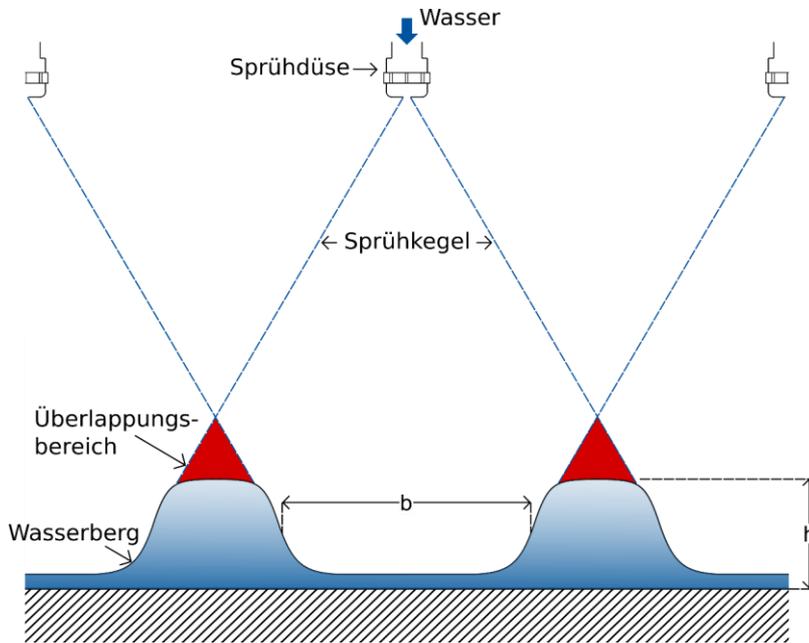


# Versuchsstand

## Strömung auf statischen horizontalen Oberflächen

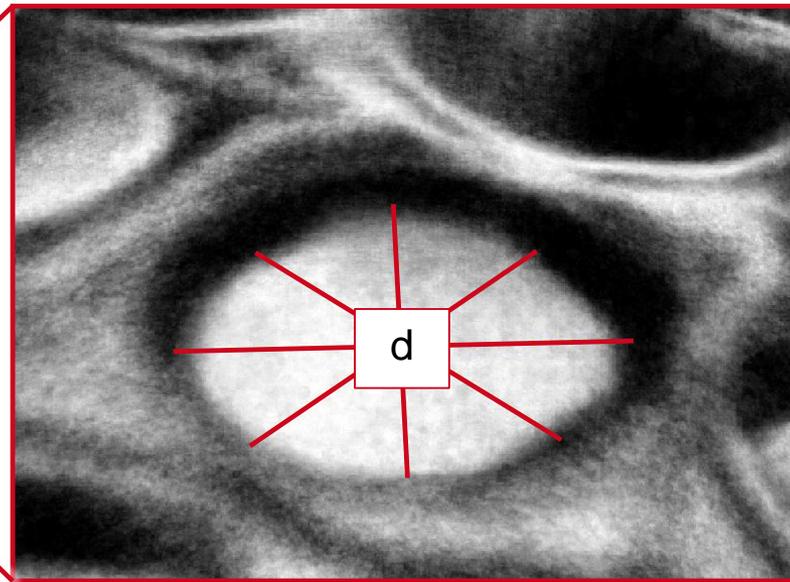
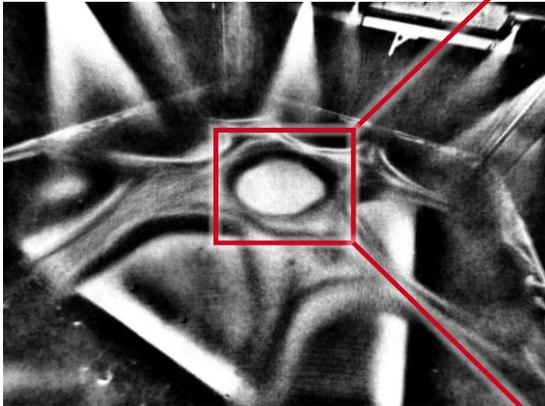
- Quantifizierung der Charakteristika auf der Bandoberfläche zur Strömungsbestimmung:
  - Staupunkte, „Wasserberge“
  - Auftreffregion, „Kessel“
  - Ablaufwasser, Ablaufkanäle

- Einfluss auf die lokale Abkühlrate und die Temperaturhomogenität
- Bestimmung von Einflussfaktoren
  - Düsenvordruck
  - Düsenabstand
  - etc.



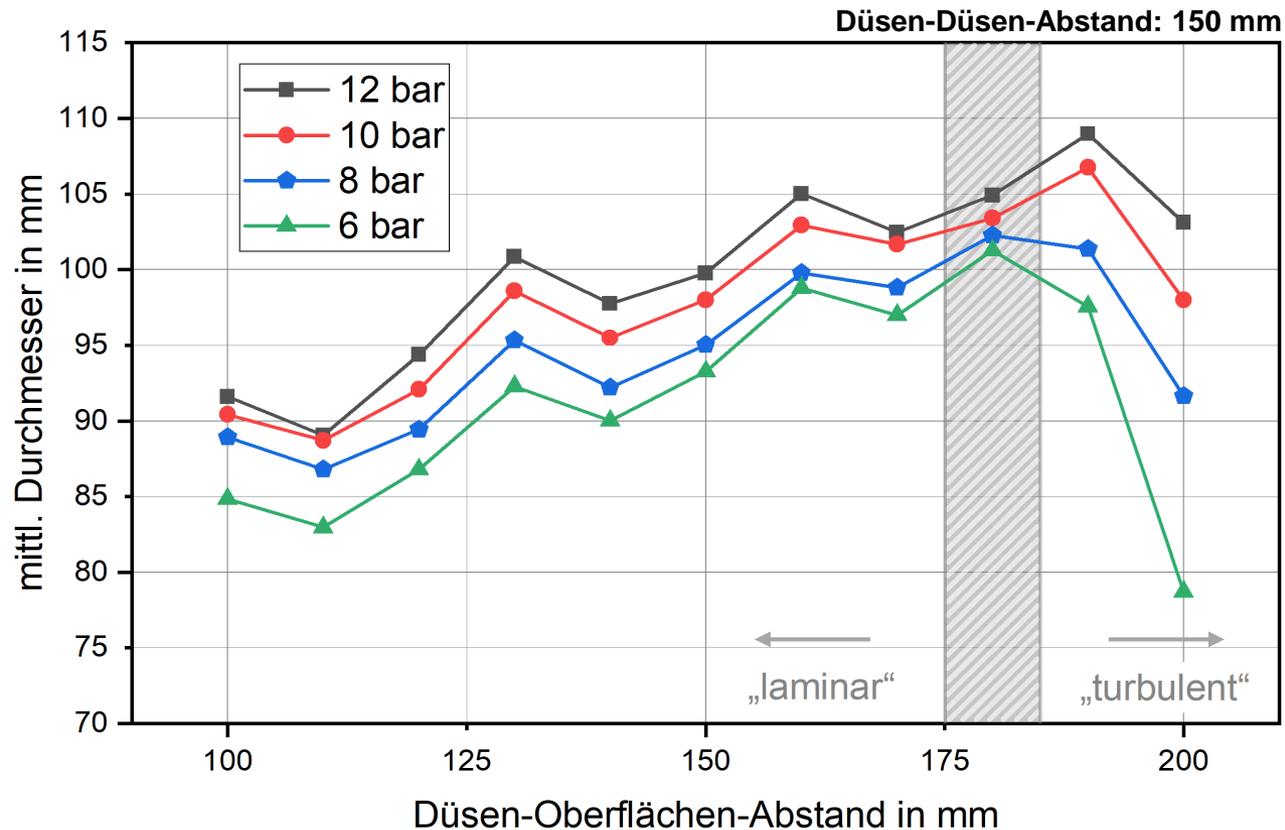
# Auswertungsmethodik

- Aufnahmen mit Kameras
  - Videos mit 30 FPS
  - Zerlegung in einzelne Bilder
- Kalibrierung der Kamera und Entzerrung der Bilder
  - Kalibrierung auf Plattenabstand
  - MATLAB-Toolbox
- Überlagerung der Bilder
  - Zeitliche Mittelung der Phänomene
  - Deutliche Kontraste



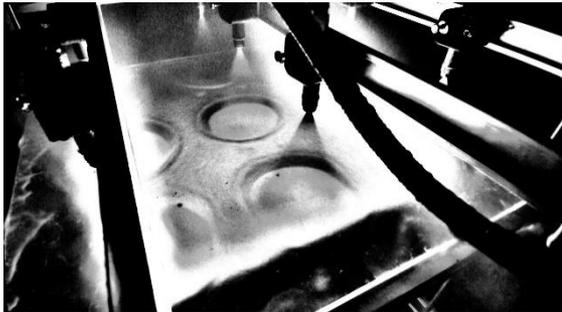
- Auswertung
  - Bestimmung der Durchmesser
  - Mittelung der Kamerapositionen
  - Vergleich mit Patternormessungen

# Messergebnisse optisches Messprinzip

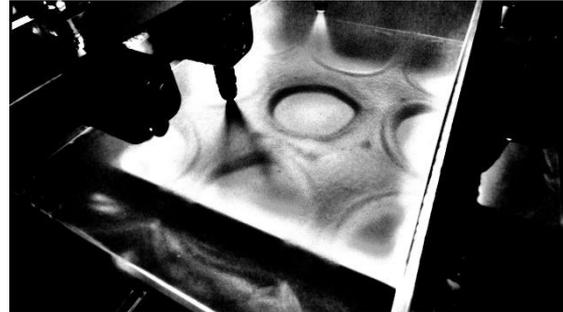


- Linearer Anstieg des mittleren Durchmessers mit dem Platten-Düsen-Abstand
- Umschlagpunkt von „laminar“ → zu „turbulent“
  - Wassermenge übersteigt kritischen Wert

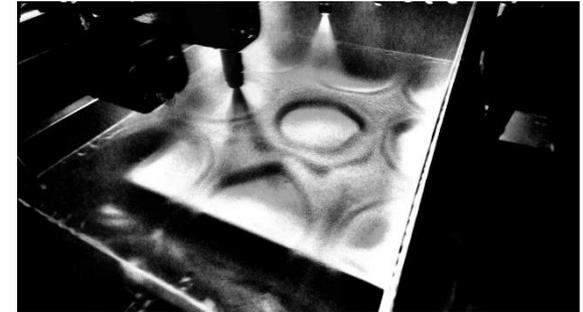
# Messergebnisse optisches Messprinzip



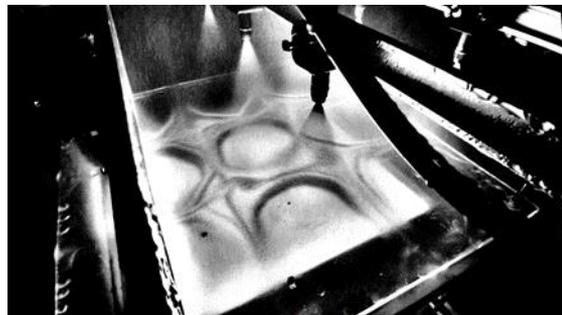
Düsen-Oberflächen-Abstand: 100 mm



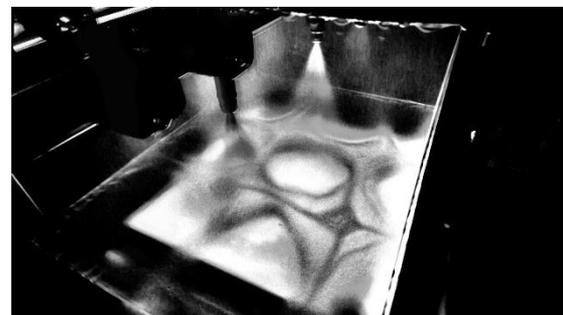
Düsen-Oberflächen-Abstand: 120 mm



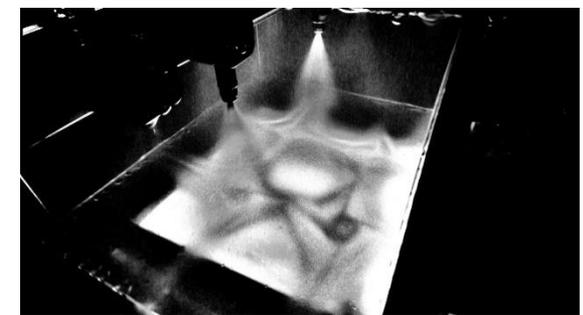
Düsen-Oberflächen-Abstand: 140 mm



Düsen-Oberflächen-Abstand: 160 mm



Düsen-Oberflächen-Abstand: 180 mm

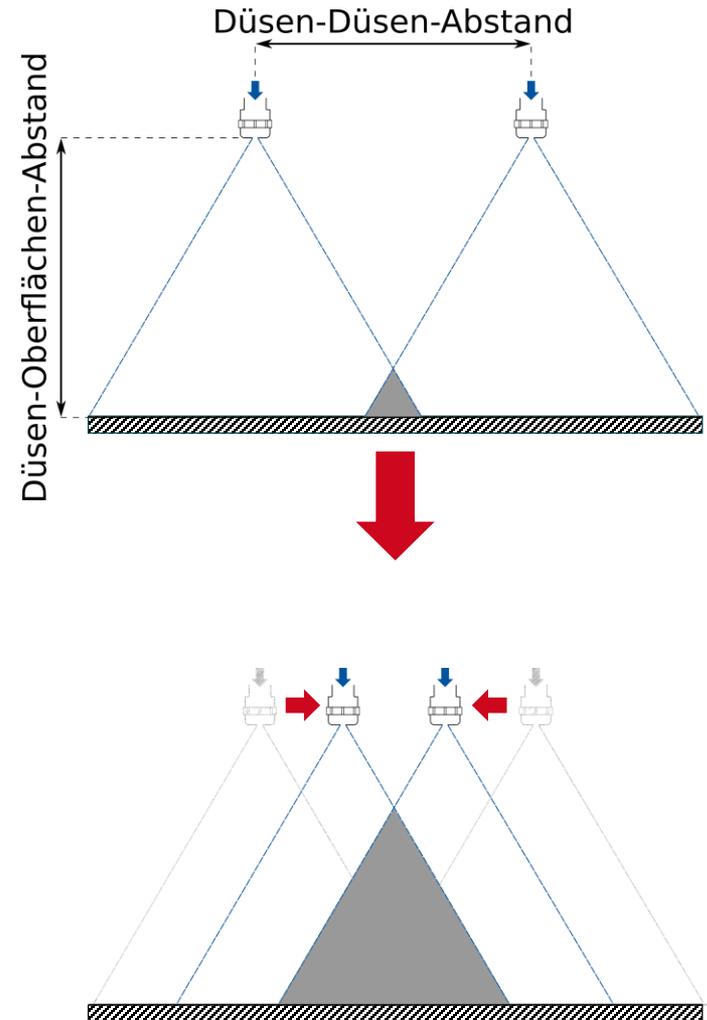


Düsen-Oberflächen-Abstand: 200 mm

- Düsenvordruck 10 bar, Düsen-Düsen-Abstand 150 mm
- Ausbildung von Wirbeln
- Kesselform weicht von idealer Form ab

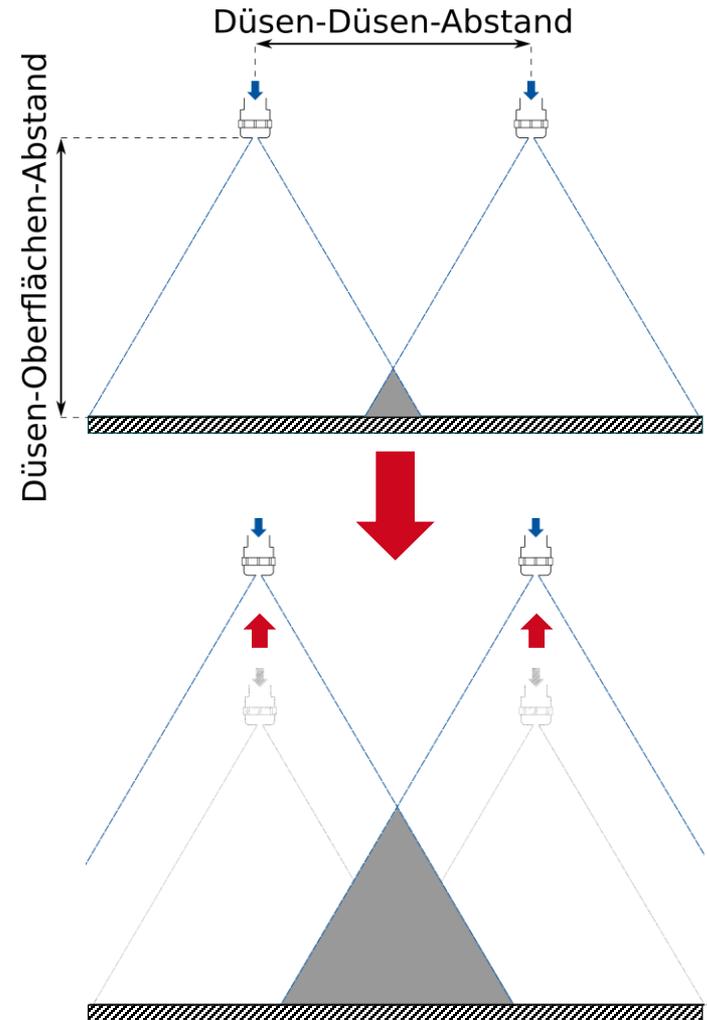
# Abhängigkeiten Strömung

- Viele Einflussfaktoren auf die Strömungsbildung:
  - Düsenanordnung
    - Düsen-Düsen-Abstand
    - Düsen-Oberflächen-Abstand
  - Düsenvordruck
  - Bandgeschwindigkeit
  - Bandbreite
  - Düsenart
- Charakterisierung der Düsenströmungen durch:
  - Tropfendurchmesser
  - Tropfengeschwindigkeit
  - Auftreffimpuls
  - **(Wasser-)Beaufschlagungsdichte**
    - Wichtige Messgröße
    - Bestimmung über sog. Patternator
    - $\frac{\text{Wassermenge}}{\text{Fläche und Zeit}}$  bzw.  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$



# Abhängigkeiten Strömung

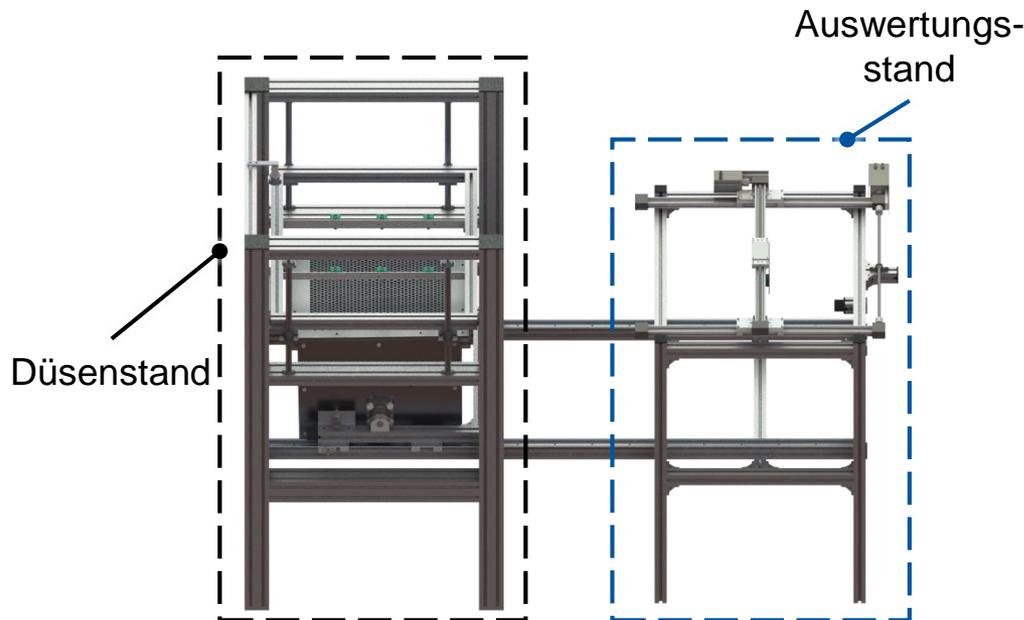
- Viele Einflussfaktoren auf die Strömungsbildung:
  - Düsenanordnung
    - Düsen-Düsen-Abstand
    - Düsen-Oberflächen-Abstand
  - Düsenvordruck
  - Bandgeschwindigkeit
  - Bandbreite
  - Düsenart
- Charakterisierung der Düsenströmungen durch:
  - Tropfendurchmesser
  - Tropfengeschwindigkeit
  - Auftreffimpuls
  - **(Wasser-)Beaufschlagungsdichte**
    - Wichtige Messgröße
    - Bestimmung über sog. Patternator
    - $\frac{\text{Wassermenge}}{\text{Fläche und Zeit}}$  bzw.  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$



# Patternator

- **Aufbau Patternator:**

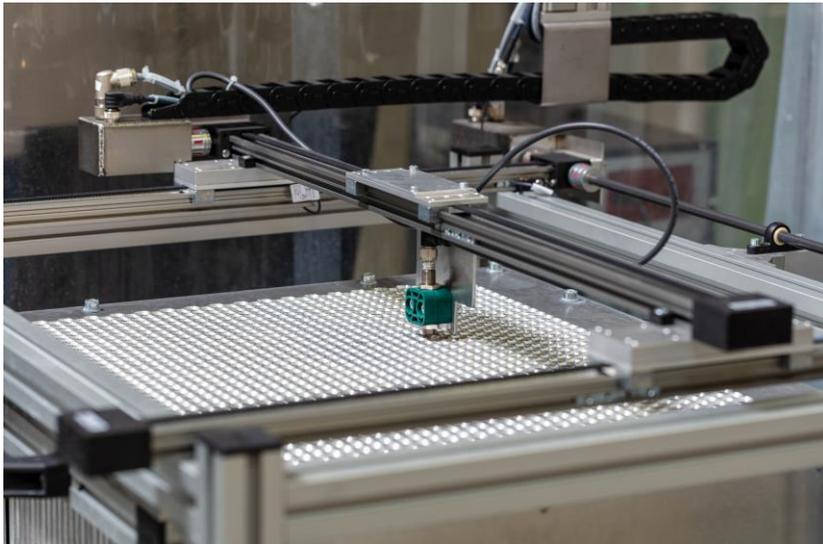
- Erweiterung des bestehenden Versuchsstands
- Bestimmung der Kesseldurchmesser und Wasserbeaufschlagungsdichte mit identischem Setup (Düsen-Oberflächen-Abstand, Düsen-Düsen-Abstand, Düsen etc.)
- Automatische Bestimmung der Wassersäulenhöhe mit Ultraschallsensor & Flächenportal
- Einfaches Handling und Entleeren
- Stufenlose Einstellung des Düsen-Oberflächen-Abstands & Düsen-Düsen-Abstands



# Patternator

- **Aufbau Patternator**

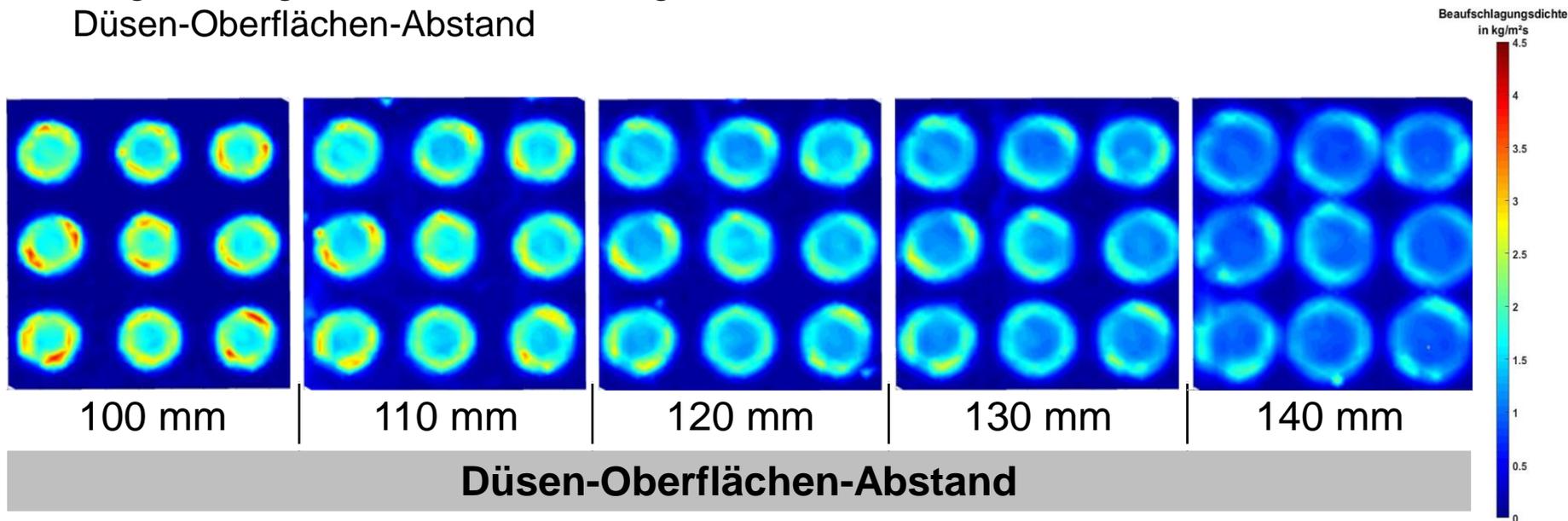
- Neues Messprinzip
  - Ultraschall und 2D-Transpose
  - Messung des Abstand Sensor-Wasseroberfläche
- 1330 Messstellen (38 x 35 Reihen, 465 x 430 mm<sup>2</sup>, versetzt angeordnet)
- Automatische Auswertung der Messergebnisse
- Messdauer für gesamten Patternator aktuell ~ 35 min



# Patternator

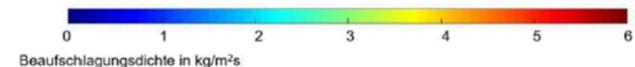
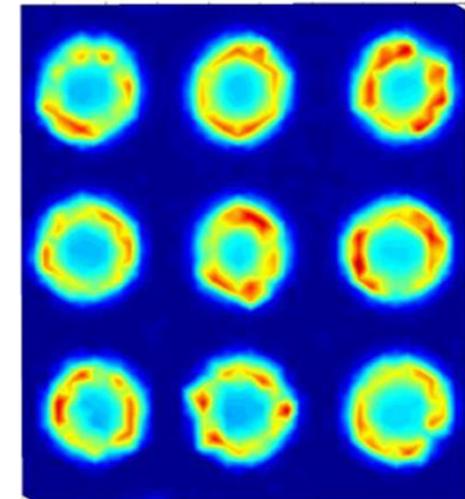
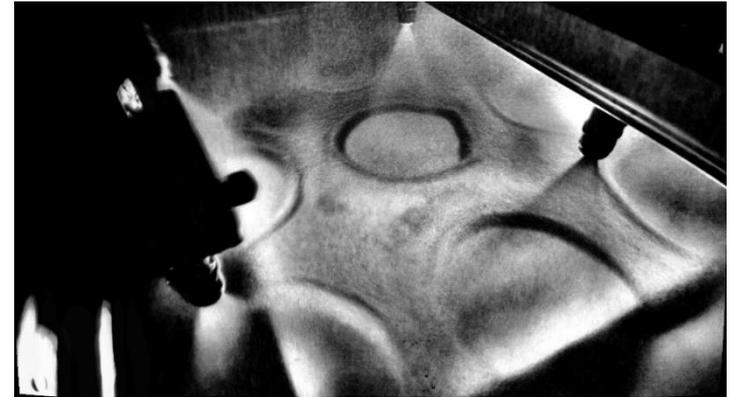
- **Exemplarische Messergebnisse**

- Messreihe am 3 x 3-Düsenfeld
  - Variation des Düsen-Oberflächen-Abstands
  - Düsen-Düsen-Abstand konstant bei 150 mm
  - Düsenvordruck konstant bei 4 bar
- Abnahme der Beaufschlagungsdichtepicks und Vergrößerung der Auftrefffläche mit größerem Düsen-Oberflächen-Abstand



# Strömung & Patternator

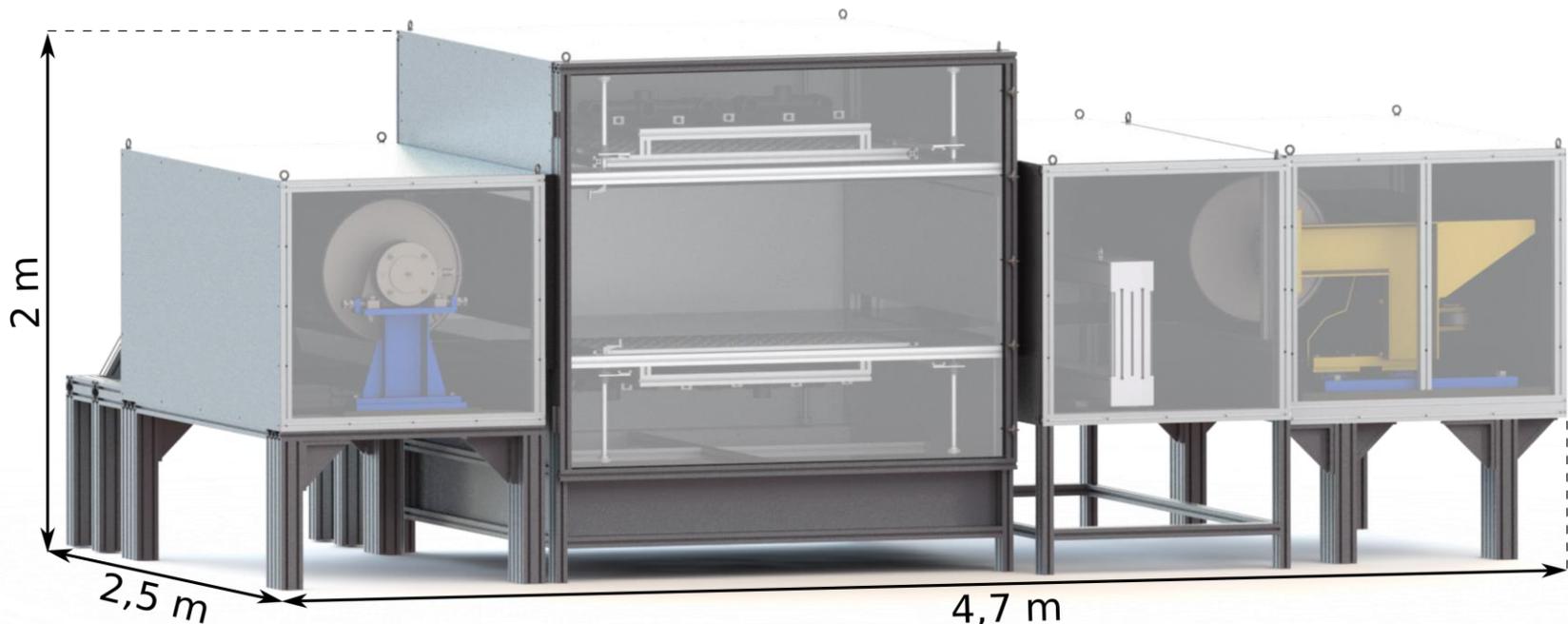
- Korrelation von Wasserbeaufschlagungsdichte und Kesseldurchmesser
  - Definition des Umschlagpunkts mit Hilfe der Beaufschlagungsdichte im Bereich der Überlappung
  - Verbesserte Vorhersage der Strömungsbildung
- Zusammenfassen von Einflussparametern mit der Beaufschlagungsdichte
  - Düsenvordruck
  - Düsen-Düsen-Abstand, Düsen-Oberflächen-Abstand
  - Düsenart und -größe
- Erweiterung der optischen Methode und Bestimmung des Auftreffimpulses
  - Erweiterung des Verständnisses



# Versuchsstand

## Strömung auf bewegten horizontalen Oberflächen

- Konstruktion und Inbetriebnahme eines weiteren Versuchsstands
- Untersuchung der Bandgeschwindigkeit und –breite auf die Strömung
- Industriennahe Abmessungen gewählt
  - 10 x 10 Sprühdüsenfeld
  - Anströmung von oben bzw. unten mit variablen Abständen
  - Bandbreite bis 1 m; Bandgeschwindigkeiten bis 300 m/min
  - Pumpkreislauf zur Regulierung der Wasserqualität



## Experimentelle Möglichkeiten zur Untersuchungen der Strömungsausbildung auf horizontalen Oberflächen am IOB:

- Bestimmung der Strömung und Beaufschlagungsdichte in einem Versuchsaufbau möglich
  - Untersuchung von unterschiedlichen Einflussfaktoren
  - Korrelation der Strömung und Beaufschlagungsdichte
  - Weiterentwicklung der Messmethodik
- Strömungsausbildung an stationären und bewegten Oberflächen
  - Einfluss der Bandbewegung und industriennahe Abmessungen
  - Korrelation mit Beaufschlagungsdichte möglich
- Weitere Untersuchungsmöglichkeiten zur Kopplung der Ergebnisse
  - Verformungsmessungen
  - Temperaturverteilung, Wärmeübergangskoeffizient, Abkühlrate
  - Werkstoffkennwerte

# Vielen Dank Für Ihre Aufmerksamkeit

Jan Hof, M.Sc.

Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik  
RWTH Aachen University  
Kopernikusstr. 10, 52074 Aachen  
Email: [hof@iob.rwth-aachen.de](mailto:hof@iob.rwth-aachen.de)  
Tel.: +49 241 80 26069  
[www.iob.rwth-aachen.de](http://www.iob.rwth-aachen.de)