



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria



## Diplomarbeit

# Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung der Vereisungseigenschaften von laserstrukturierten Oberflächen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und  
Betriebswissenschaften

**Gregori PAOLIN**

Mat.Nr.: 01326432

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl

unter der Betreuung von

Dipl.-Ing. Roland Fürbacher

Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Wien, April 2022

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

### *Eidesstattliche Erklärung*

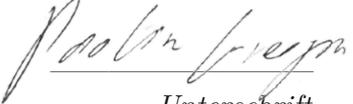
Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

11.04.2022

*Stadt und Datum*

  
Pauline Frey  
*Unterschrift*

## Kurzfassung

Die technischen Eigenschaften von Oberflächen können unter Einsatz neuester Technologien gezielt auf den praktischen Anwendungsfall hin optimiert werden. Dazu kann unter anderem die Technologie der Laserbearbeitung genutzt werden, durch welche es möglich ist, die topographischen und chemischen Oberflächeneigenschaften eines Werkstoffs zu modifizieren. Unter spezifischen Prozessparametern können ultrakurze Laserpulse dazu führen, dass sich periodische Nanostrukturen namens LIPSS (Laser induced periodic surface structures) bilden. Abhängig von der Ausprägung diese Nanostrukturen können dadurch Eigenschaften wie Verschleißfestigkeit, Reibungswiderstand oder Benetzbarkeit optimiert werden. Neben den genannten Eigenschaften, werden an der Technischen Universität Wien auch die Vereisungseigenschaften an mikro- und nanostrukturierten Oberflächen untersucht. Die Vereisung von Strukturen ist eine weit verbreitete Problematik und betrifft unter anderem auch Windkraftanlagen (WKA). Temperaturen unterhalb von 0 °C und Niederschlag oder Wolken führen dazu, dass unterkühlte Wassertröpfchen auf der Vorderkante der Rotorblätter auftreffen und schlagartig gefrieren. Es bildet sich eine Eislast an der Rotorblatt-Vorderkante, welche zu Sicherheitsrisiken beim Betrieb der Anlage führen kann. Durch die zusätzliche Last und durch eine mögliche Unwucht ist die Anlage zusätzlichen Kräften ausgesetzt. Im Betrieb stehende vereiste WKA, können durch die Rotation Eisfragmente abwerfen und Personen- oder Sachschaden anrichten. Diese Risiken führen dazu, dass WKA in Österreich zur Abschaltung verpflichtet sind, sobald sich Eis an der Oberfläche bildet. Dies führt in erster Linie zu Verlusten der Energieproduktion und infolgedessen zu wirtschaftlichen Einbußen. Für die Hersteller und Betreiber der WKA besteht daher Interesse, eine Lösung zu entwickeln, welche Vereisung möglichst energieeffizient verhindert oder reduziert.

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, welche Themen im Zusammenhang mit Eisschutzmaßnahmen von WKA durch aktive und passive Anti-Eis-Oberflächen. Dabei wurde auf die Problematik der Vereisung von WKA, den Stand der Technik der Eisschutzmaßnahmen, die Grundlagen für die Herstellung strukturierter Oberflächen mittels Laserablation, die physikalischen Grundlagen der Eisbildung sowie auf die meteorologischen Voraussetzungen für die Vereisung von WKA eingegangen. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche, wurde ein Versuchsaufbau zur Untersuchung des Vereisungsvorgangs auf Proben mit strukturierten Oberflächen konstruiert. Die Anforderungen an den Versuchsaufbau wurden von den realen Vereisungsbedingungen von WKA abgeleitet und definiert. Die Anforderungsanalyse und die Ideenfindungsphase führte zu einem Klima-Windkanal im Labormaßstab. Mit Hilfe von thermischen und mechanischen Berechnungen konnten Komponenten wie Antrieb, Kühlung und thermische Dämmung ausgelegt werden. Im nächsten Schritt wurde aus dem Konzept und aus den festgelegten Komponenten ein 3D-CAD Modell konstruiert, welches in weiterer Folge die Grundlage für den mechanischen Aufbau war. Die Aufbau- und Entwicklungsphase des Klima-Windkanals führte zu vier Ausbaustufen. Dabei wurde die Temperatur im Windkanal kontinuierlich reduziert, bis in der letzten Ausbaustufe eine Temperatur von -15 °C erreicht wurde. Die Strömung in der Testsektion erreichte unter Vollast eine Geschwindigkeit von bis zu  $52 \frac{m}{s}$ . Durch die Wassereinleitung mit einer

Zerstäubungsdüse konnte eine Tröpfchengröße ähnlich der vom Sprühregen erreicht werden. Es wurde zudem ein Setup aufgebaut, welches die Foto- und Videoaufnahme mit einer Highspeed-Kamera und entsprechender Belichtung ermöglichte. Zum Abschluss der Arbeit wurde eine Testreihe durchgeführt, in welcher eine mikro- und eine nanostrukturierte Probe mit hydrophoben Eigenschaften untersucht wurde. Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Vereisung der Proben mit dem Prüfstand gezielt eingeleitet werden konnte. Eine besondere Herausforderung war dabei die Bewertung des Vereisungszustandes, wofür gravimetrische Messungen und optische Auswertungen angewendet wurden. Die Herstellung reproduzierbarer Bedingungen und die Quantifizierung des Vereisungsgrades sind Eigenschaften des Prüfstandes die im Zuge von weiteren Arbeiten untersucht werden sollten.

## Abstract

The technical properties of surfaces can be optimized for practical applications using latest technologies. Among other things, the technology of laser processing can be used to adapt surface properties. Under specific process parameters, ultrashort laser pulses can lead to a formation of periodic nanostructures called LIPSS (laser induced periodic surface structures). Depending on the characteristics of these nanostructures, properties such as friction, wettability and wear resistance can be optimized. In addition to these properties, the Technical University of Vienna is also investigating the icing properties of micro- and nanostructured surfaces.

The icing of wind turbines is a problem that causes safety risks and economic losses. Supercooled water droplets can impact and freeze instantly at the leading edge of a rotor blades. The additional load and imbalance can lead to additional forces to the structures of the wind turbine. Due to the rotation, the Ice-covered wind turbines can throw off ice fragments and cause damage to property or even injury people. These risks lead to the fact that wind turbines in Austria are obliged to shut down as soon as ice forms on the surface. This results in a drop in energy output that consequently leads to economic losses and forces manufacturers and operators of wind turbines to develop a system that prevents or reduces icing on wind turbines in an energy-efficient way.

A literature research was conducted, covering topics related to ice protection measures of wind turbines by anti-icing surfaces. In this context, the problem of icing wind turbines, the state of the art of ice protection measures, the basics of laser-structured surfaces, the physics of ice accumulation as well as the meteorological conditions for icing were addressed. Based on the conclusions from the literature research, an experimental setup was constructed to investigate the icing process on samples with structured surfaces.

The requirements for the experimental setup were derived from the conditions that causes Icing on wind turbines. The requirements analysis led to a small-scale climatic wind tunnel. With thermal and mechanical calculations, components such as drive, cooling and thermal isolation had been dimensioned and a 3D-CAD model was designed and subsequently formed the basis for the mechanical structure.

The construction and development of the climatic wind tunnel led to four stages of development. The temperature in the wind tunnel was continuously reduced until  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  was reached in the last development stage. The airflow in the wind tunnel reached a velocity up to  $52\frac{\text{m}}{\text{s}}$ . By injecting water with a nozzle, droplets with a similar size to light rain were created. A setup was built that allowed the capture the icing process using a high-speed camera.

To conclude the thesis, a series of tests were carried out in which micro- and nanostructured sample with hydrophobic properties were tested. The experiments demonstrated that icing of the samples could be accomplished. A particular challenge was the evaluation of the icing condition, for which gravimetric measurements and optical valuations were used. The production of reproducible conditions and the quantification of the degree of icing are features of the climatic wind tunnel that should be investigated in further work.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Windenergie und Problematik der Vereisung . . . . .	2
2.1.1	Erneuerbare Energien in Europa . . . . .	2
2.1.2	Windkraftanlagen in Österreich und im Alpenraum . . . . .	2
2.2	Eisbildung und Nukleation . . . . .	3
2.3	Meteorologie . . . . .	4
2.3.1	Wolkenbildung . . . . .	4
2.3.2	Eiskristallbildung in Wolken . . . . .	4
2.3.3	Niederschlag . . . . .	5
2.3.4	Meteorologische Bedingungen für atmosphärische Vereisung . . . . .	5
2.4	Vereisung von Strukturen . . . . .	8
2.4.1	Trockene und nasse Vereisung . . . . .	8
2.4.2	Arten von Vereisung . . . . .	8
2.4.3	Zeitliche Quantifizierung der Vereisung . . . . .	9
2.4.4	Anti-Icing und De-Icing . . . . .	10
2.5	Vereisung von Windkraftanlagen . . . . .	11
2.5.1	Vereisung der Rotorblätter . . . . .	12
2.5.2	Parameter der Vereisung von Rotorblätter . . . . .	13
2.5.3	Maßnahmen gegen Vereisung von Windkraftanlagen . . . . .	15
2.5.4	Detektion von Eis . . . . .	15
2.5.5	Anti-Icing Methoden . . . . .	17
2.5.6	De-Icing Methoden . . . . .	19
2.6	Nanostrukturierte Oberflächen . . . . .	20
2.6.1	Lasertechnische Grundlagen . . . . .	21
2.6.2	Laser induzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS) . . . . .	24
2.7	Hydrophobe Eigenschaften von strukturierten Oberflächen . . . . .	26
2.7.1	Benetzungseigenschaften . . . . .	26
2.7.2	Vereisungseigenschaften von strukturierten hydrophoben Oberflächen . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>32</b>
3.1	Planung . . . . .	32
3.1.1	Aufgabenstellung . . . . .	32
3.1.2	Ableitung der Anforderungen . . . . .	32
3.2	Konzept . . . . .	34
3.2.1	Kanalführung . . . . .	35
3.2.2	Kühlung . . . . .	35

## Inhaltsverzeichnis

3.2.3	Probenhalterung . . . . .	36
3.2.4	Einspritzung . . . . .	36
3.2.5	Steuerung und Datenaufnahme . . . . .	36
3.3	Entwurf . . . . .	36
3.3.1	Erstellung eines 3D-Modells . . . . .	37
3.3.2	Komponenten . . . . .	39
3.3.3	Thermische Berechnung der Kühlanlage und Interpretation der Ergebnisse . . . . .	42
3.4	Ausarbeitung . . . . .	45
3.4.1	Versuchsaufbau 1 . . . . .	45
3.4.2	Versuchsaufbau 2 . . . . .	51
3.4.3	Versuchsaufbau 3 . . . . .	55
3.4.4	Versuchsaufbau 4 . . . . .	62
3.4.5	Abhängigkeit der Temperatur im Windkanal von der Strömungs- geschwindigkeit . . . . .	65
3.4.6	Einspritzung . . . . .	67
3.4.7	Steuereinheit . . . . .	74
3.4.8	Kalibrierung des Geschwindigkeitssensors . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>80</b>
4.1	Fertigung der strukturierten hydrophoben Oberflächen . . . . .	80
4.2	Kontaktwinkelmessung der Probenoberfläche . . . . .	81
4.3	Durchführung der Versuche . . . . .	82
4.3.1	Ablauf der Versuchsdurchführung . . . . .	83
4.3.2	Setup der Versuchsdurchführung . . . . .	83
4.4	Ergebnisse der Versuche . . . . .	84
4.4.1	Gravimetrische Messungen . . . . .	84
4.4.2	Optische Bewertung des Vereisungszustandes der Probenoberflächen	86
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>88</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	88
5.2	Ausblick . . . . .	90

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Der Wunsch nach umweltfreundlicher Energiegewinnung veranlasste den Ausbau der Windenergie und führte zur Erschließung von neuen Standorten. In Österreich wurden zunehmend höhere Lagen im alpinen oder voralpinen Raum für die Errichtung von Windparks erschlossen. Mit steigender Höhe fallen die Temperaturen und die Witterungsbedingungen führen vermehrt zur Vereisung von Windkraftanlagen (WKA). Bei Temperaturen unter 0 °C und Niederschlag oder Wolken bzw. Nebel kann es zur Unterkühlung von Wassertröpfchen kommen. Treffen diese auf die Rotorblätter auf, kommt es an der Rotorblatt-Vorderkante zur Bildung eines hufeisenförmigen Eisansatzes. Vereiste WKA stellen ein Risiko in vielerlei Hinsicht dar. Die von dem Rotorblatt abfallenden Eisfragmente werden als Eiswurf bezeichnet und können im Umkreis von einigen hundert Metern Personen- und Sachschaden verursachen. Durch die erhöhte Masse an den Rotorblättern, resultieren höhere Belastungen für das Material, besonders wenn die Anlage durch die unausgeglichene Eismassen in Unwucht gerät. In Extremfällen können die Eismassen an der Vorderkante der Rotorblätter derart anwachsen, dass das Rotorblatt durch die gestörte Aerodynamik den Auftrieb verliert und die WKA mangels Antriebs zum Stillstand kommt. Diese Risiken führen dazu, dass in einigen Ländern, darunter auch Österreich, der Betrieb von vereisten WKA nicht erlaubt ist [1]. Die damit verbundene Abschaltung der Anlagen, führt zu wirtschaftlichen Einbußen, welche die Betreiber und Hersteller dazu veranlasst, Maßnahmen gegen Vereisung zu setzen. Der Einsatz von Eisschutzmaßnahmen in Form von gezielter Oberflächenmanipulation kann die Vereisung verzögern, reduzieren oder verhindern, ohne dabei Energie aufzuwenden. Die Herstellung einer laserbehandelten Oberfläche die Anti-Icing oder De-Icing Eigenschaften vorweist, wird derzeit im Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU Wien untersucht. Durch hochenergetische Laserpulse können auf der Oberfläche periodische Mikro- und Nanostrukturen erzeugt werden. Eine mögliche Ausprägung dieser Strukturen sind sogenannte LIPSS (Laser induced periodic surface structures). Diese können eine wasserabweisende (hydrophobe) Wirkung aufweisen, welche auf Grund von chemischen Prozessen an der Oberfläche oder durch die Minimierung der Kontaktflächen (Cassie-Baxter-State) entsteht. Die modifizierten Oberflächen müssen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit ihrer Anti-Eis-Eigenschaften untersucht werden. Dazu werden geeignete Prüfmittel und Methoden benötigt, welche aber teuer sind (professioneller, ausgereifter Klima-Windkanal). In dieser Arbeit wird ein Versuchsaufbau ausgelegt und konstruiert der für die Untersuchung von Vereisungseigenschaften von flachen, quadratischen Proben geeignet ist. Die Entwicklung des Prüfstandes wird dabei in dieser Arbeit von der Ideenfindung bis zur ersten Testreihe dokumentiert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Windenergie und Problematik der Vereisung

#### 2.1.1 Erneuerbare Energien in Europa

Die Nutzung von erneuerbaren Energien geht bis in die 1990er Jahre zurück. In dieser Zeit wurden erste Maßnahmen gesetzt, um die Entwicklung der Technologien für Windkraft-, Wasserkraft- und Solaranlagen voranzutreiben. Der Zuwachs an erneuerbaren Energien hat in Europa mit den Förderungen in Deutschland und mit dem ersten Offshore-Windpark in Dänemark im Jahr 1991 begonnen. Von den weltweit installierten WKA, befanden sich im Jahr 2000 mehr als 70 % in Europa [2]. Die Produktion und Nutzung von erneuerbaren Energien nahmen in weiterer Folge weltweit weiter zu. Der Anteil der grünen Energie am Bruttoendenergieverbrauch der EU ist zwischen 2004 und 2018 von 9,6 % auf 18,9 % gestiegen. Österreich konnte im Jahr 2018 einen Anteil von über 30 % erreichen [2].

#### 2.1.2 Windkraftanlagen in Österreich und im Alpenraum

In Österreich hat der Ausbau der WKA Mitte der 1990er Jahre durch die Erlassung von Fördermaßnahmen begonnen. Die Errichtung von Windparks wurde dadurch wirtschaftlich rentabel, woraus eine bis zum Jahr 2006 anhaltende Ausbauwelle resultierte. Vom Jahr 2001 bis 2006 verzehnfachte sich die Anzahl der WKA in Österreich von 94 auf 968 Anlagen [3]. In den Folgejahren herrschte eine Ausbau-Flaute in Österreich die im Jahr 2012, durch das neu in Kraft getretene Ökostromgesetz endete. Die kumulierte Leistung der WKA in Österreich wurde vom Jahr 2010 bis 2019 von 1015 MW auf 3015 MW beinahe verdreifacht [3].

Die europäische Union hat für das Jahr 2030 ein Klima- und Energieziel gesetzt, welches den Anteil der Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch im EU Raum von mindestens 32 % festlegt. Im Jahr 2018 erreichte die EU einen Wert von 18 %. Die Bundesregierung Österreich verfolgt das Ziel, bis 2030, die Stromversorgung zu 100 % aus erneuerbaren Quellen zu generieren. Beide Ziele geben den weiteren Ausbau der WKA Rückenwind. Konkret sollen bis zum Jahr 2030 jährlich rund 120 WKA gebaut werden, damit würde der Windstrom 26 % des österreichischen Strombedarfs decken [4]. Der steigende Bedarf an WKA, die zunehmende Verknappung der verfügbaren Fläche und die Weiterentwicklung der Technologie sind die Hauptgründe dafür, dass die Betreiber zunehmend das Blickfeld auf gebirgige Lagen richten. Die Nutzung von WKA in alpinen Raum hat im Gegensatz zu Standorten im Flachland einige Nachteile. Der Eingriff in das Naturbild mit bis zu 200 m hohen WKA und die Anbindung mit Hochspannungsleitungen und Materialseilbahnen ist zufolge des österreichischen Alpenvereins ein irreversibler Eingriff in das Ökosystem [5]. Zusätzliche Kosten entstehen nicht nur

## Windkraftleistung in Österreich

Ende 2020 und Prognose 2021



Abbildung 2.1: Windkraftleistung in Österreich von 1994 bis 2019 mit Prognose 2020 [3].

beim Bau durch Erschließungswege, sondern auch im Betrieb der Anlagen durch Vereisung der Strukturen. Die erhöhten Investitionskosten sollten sich deshalb mit möglichst langem und fortlaufendem Betrieb der Windkraftanlagen relativieren.

## 2.2 Eisbildung und Nukleation

Wasser besitzt beim Phasenübergang von flüssig zu fest besondere physikalische Eigenschaften. Die Eisbildung setzt nicht wie allgemein angenommen bei einer Temperatur von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ein, sondern Wasser kann unterhalb von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  auch in flüssiger Form existieren [6]. In der Thermodynamik wird die Absenkung der Temperatur einer Flüssigkeit unter den Gefrierpunkt, ohne dass diese erstarrt als Unterkühlung bezeichnet. Die Differenz zwischen Schmelzpunkt und Gefrierpunkt wird als thermale Hysterese bezeichnet und kann durch die Verzögerung der Eiskeimbildung (Eis-Nukleation) erklärt werden. Die Kristallisation von Wasser wird durch Eiskeime ausgelöst. Ist das Wasser sehr rein, dann bestehen die Eiskeime ausschließlich aus Wasser und der Vorgang wird als homogene Eis-Nukleation (homogene Vereisung) bezeichnet. Die Nukleationstemperatur von reinem Wasser liegt bei  $\vartheta_N = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7]. Wird der Vereisungsvorgang durch Fremdkörper im Wasser ausgelöst, spricht man von einer heterogenen Nukleation (heterogene Vereisung). Befinden sich Partikel, oder angrenzende Oberflächen im Wasser, so können diese als Eiskeime fungieren und die Nukleationstemperatur wird deutlich erhöht. In der Meteorologie ist die Bildung von Eiskristallen in den Wolken von Aerosolpartikel abhängig [8].

### 2.3 Meteorologie

Die Meteorologie beschäftigt sich mit der Physik der Atmosphäre und mit den geophysikalischen Eigenschaften der Lufthülle. Die Entstehung von Niederschlag, unterkühlten Wassertröpfchen und Eisregen ist Teil der Meteorologie und dient als Grundlage für die Bestimmung der Anforderungen für den Klima-Windkanal.

#### 2.3.1 Wolkenbildung

Zur Verdunstung von Wasser kommt es, wenn die Gasphase über der Flüssigkeit noch nicht den Sättigungsdampfdruck <sup>1</sup> erreicht hat und dadurch das Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht, ohne dabei den Siedepunkt zu erreichen. An feuchten oder flüssigen Oberflächen wird dadurch ein ständiger Wasserdampfnachschub an die Atmosphäre abgegeben. Die feuchte Luft kann entweder thermisch oder dynamisch zum Aufsteigen gezwungen werden. Der Aufstieg der Luft bewirkt eine Abkühlung von rund 1 °C je 100 m [9], wodurch ein Rückgang des Sättigungsdruckes entsteht und es zur Kondensation kommt. Bei der Wolkenbildung an der Erdoberfläche wird die Kondensation durch sogenannte Kondensationskerne begünstigt. Die Luft in der Atmosphäre enthält eine Vielzahl an Staubpartikel, welche durch Turbulenzen von der Erdoberfläche in die Atmosphäre gelangen. Derartige Partikel stammen beispielsweise von Vulkanausbrüchen oder von Wind der über die Meeresoberfläche weht und dadurch Salzteilchen aufnimmt. Sie können aber auch aus anthropogenen Quellen stammen, wie beispielsweise Abgase. Die feinsten dieser Partikel werden als Aerosolteilchen bezeichnet. Wenn die Teilchen zusätzlich die Fähigkeit der Wasseranlagerung besitzen, dann werden diese als hygroskopische Aerosole bezeichnet und im meteorologischen Kontext auch Kondensationskerne genannt. Bei der Kondensation lagern sich Wasserdampfmoleküle an den Kondensationskern an und umhüllen diesen mit einer Wasserschicht. Die entstehenden Wassertröpfchen bilden somit eine Wolke.

#### 2.3.2 Eiskristallbildung in Wolken

Die Eiskristallbildung in den Wolken geschieht zunächst von den flüssigen in den festen Aggregatzustand. Dabei bilden sich Wassertröpfchen, welche gefrieren und in weiterer Folge als Kristallisationskeime fungieren. An diesen kann Wasserdampf direkt gefrieren, womit die flüssige Phase übersprungen wird. Wolken können also aus Wasser, Eis oder beidem bestehen (Mischwolke). Die Kristallisation der Wassertröpfchen geschieht dabei nicht schlagartig beim Unterschreiten des Gefrierpunktes, sondern kann bei sehr sauberer Atmosphäre zur Unterkühlung der Wassertröpfchen von bis zu -40 °C führen [10]. Wie in Tabelle 2.1 ersichtlich, lässt sich der Zustand der Wassertröpfchen in der Wolke anhand der durchschnittlichen Tröpfchentemperatur  $T_{wt}$  in vier Kategorien unterteilen.

---

<sup>1</sup>Der Sättigungsdampfdruck eines Stoffes ist der Druck, bei dem sich die Aggregatzustände im Gleichgewicht befinden.

$0\text{ °C} \geq T_{wt} \geq -12\text{ °C}$	unterkühlte Wassertropfen überwiegen
$-12\text{ °C} > T_{wt} \geq -20\text{ °C}$	Wassertropfen und Eiskristalle
$-20\text{ °C} > T_{wt} \geq -40\text{ °C}$	Eiskristalle überwiegen
$T_{wt} < -40\text{ °C}$	nur Eiskristalle

Tabelle 2.1: Aggregatzustand von Wolkentropfen.  $T_{wt}$  ist die durchschnittliche Temperatur der Wassertropfen [9].

### 2.3.3 Niederschlag

Die kondensierten Tröpfchen in Wolken können unter Umständen bis zu  $500\ \mu\text{m}$  groß werden, sind in der Regel aber zwischen  $20\ \mu\text{m}$  und  $100\ \mu\text{m}$ . Regentropfen haben im Mittel einen Durchmesser von  $0.4\ \text{mm}$  bis  $5\ \text{mm}$  - daraus lässt sich schließen, dass die Größe der Wassertropfen von weiteren Parametern abhängig ist. Die Bergeron-Findeisen-Theorie beschreibt die Entstehung von großen Regentropfen in außertropischen Zonen [9]. Sie beruht auf dem Effekt, dass der Sättigungsdampfdruck über Eis geringer ist als über flüssigem Wasser. Die Luft kondensiert über Eis also früher als über Wasser, weshalb die Eiskristalle anwachsen, obwohl die relative Feuchte unter  $100\%$  liegt. Parallel dazu verdunstet das Wasser der flüssigen Tröpfchen und kondensiert über dem Eis. Das Wachstum der Eiskristalle wird durch das Anfrieren von unterkühlten Tröpfchen und durch das Aneinanderfrieren oder Verhaken von Schneekristallen zusätzlich gefördert. Die entstehenden Eiskristalle wachsen an und beginnen zu fallen, sobald sie nicht mehr vom Aufwind der Wolken in der Schwebelage gehalten werden. Aus den Wolkenelementen werden Niederschlags-elemente- auch Hydrometeore genannt. In bodennahen Bereichen mit Temperaturen über  $0\text{ °C}$  schmelzen die Eiskristalle und Regen setzt ein. Wenn der Schmelzpunkt nicht erreicht wird, fällt der Niederschlag als Schnee.

Niederschlags-element	Durchmesser	Fallgeschwindigkeit
Wolkentropfen	$0.02\ \text{mm}$	$0.1\ \text{m/s}$
Sprühregen	$0.4\ \text{mm}$	$1.7\ \text{m/s}$
Leichter Regen	$1.0\ \text{mm}$	$4.0\ \text{m/s}$
Mäßiger Regen	$2.0\ \text{mm}$	$6.0\ \text{m/s}$
Starker Regen	$4.0\ \text{mm}$	$9.0\ \text{m/s}$
Eisnadeln	$2.0\ \text{mm}$	$0.7\ \text{m/s}$
Eiskristalle	$1 - 5\ \text{mm}$	$0.5\ \text{m/s}$
Graupel	$5\ \text{mm}$	$2.6\ \text{m/s}$

Tabelle 2.2: Größe und Fallgeschwindigkeit von Niederschlags-elementen [10]

### 2.3.4 Meteorologische Bedingungen für atmosphärische Vereisung

Atmosphärische Vereisung kann als Folge von Niederschlag und In-Cloud Icing auftreten.

### Vereisung als Folge von Niederschlag

Niederschlag, der im flüssigen oder festen Zustand auf die Erdoberfläche fällt und innerhalb kürzester Zeit gefriert, lässt sich in drei Fälle unterteilen:

Unterkühlter Regen:

Unterkühlter Regen ist unterkühlter Niederschlag, welcher beim Auftreffen auf Festkörper durch den Kontakt mit der Oberfläche schlagartig kristallisiert. Die Unterkühlung der Regentropfen tritt ein, wenn sich eine warme Luftschicht über eine kalte legt. Die kristallisierten Niederschlagselemente fallen durch die warme Luftschicht und werden zu Regen. Anschließend gelangen sie zur bodennahen, kalten Luftschicht und können dabei mangels Kristallisationskeime im flüssigen Zustand unterkühlen [11]. Beim Auftreffen auf eine Oberfläche bildet sich schlagartig Eis.

Gefrierender Regen:

Gefrierender Regen unterscheidet sich von unterkühltem Regen durch die Wassertemperatur der Tröpfchen vor dem Aufprall auf die Erdoberfläche. Die Niederschlagselemente fallen aus einer warmen, in eine kalte, Luftschicht. Vor dem Kontakt mit der Erdoberfläche ist die Temperatur der Tröpfchen noch knapp oberhalb des Gefrierpunktes. Sobald sie auf die gefrorene Oberfläche auftreffen gefrieren sie unmittelbar aufgrund der Oberflächentemperatur [12].

Eisregen:

Bei Eisregen liegt der Niederschlag bereits in der Luft in vereister Form vor. Eisregen stellt den Übergang zwischen Schneefall und Regen dar. Auch hier ist ein Zusammenfrieren am Erdboden möglich [12].

### Vereisung als Folge von In-Cloud Icing

Mischwolken:

Mischwolken sind Wolken in denen sowohl Eisteilchen als auch unterkühlte Wassertropfen vorkommen (Tabelle 2.1). Sie gehören zu den Gattungen Altostratus, Nimbostratus und Cumulonimbus, wovon die letzteren Zwei zu den tiefen Wolken zählen und bis zu einer Untergrenze von 2000 m Höhe vorkommen [9]. Treffen diese Wolken auf Strukturen, kommt es durch die unterkühlten Tröpfchen zur Eisbildung.

Tau:

Abgesehen von der Wolkenbildung kommt atmosphärische Kondensation auch bei Nebel und Tau vor. Die Bildung von Tau-Tröpfchen an Oberflächen, ist eine Folge von Temperaturschwankungen, wie sie im Allgemeinen über Nacht vorkommen. Bei tiefen nächtlichen Temperaturen kühlt die Erdoberfläche stark ab. Steigt die Temperatur wieder an, erwärmt sich die Umgebungsluft rapider als die Erdoberfläche bzw. Körper an der Erdoberfläche. Hat die Umgebungsluft eine hohe relative Feuchte von 80 - 90 % und kommt in die Nähe der noch kühlen Strukturen, so kommt es, aufgrund der Temperaturabsenkung der Luft in unmittelbarer Nähe

## 2 Grundlagen

der Oberfläche, auch zur Absenkung des Sättigungsdrucks und somit zur Kondensation. Liegt die Temperatur unterhalb des Gefrierpunkts, so bildet sich Reif.

Nebel:

Zur Nebelbildung kommt es, wenn an erdnahen Oberflächen atmosphärische Kondensation der Luft stattfindet. Unterkühlter Nebel kann bei Temperaturen zwischen 0 °C und -20 °C auftreten und zu Reifeablagerung an Bäumen, Sträuchern oder anderen Strukturen führen.

### Meteorologische Parameter für atmosphärische Vereisung nach ISO12494

In der ISO12494 wird die Eisbildung an Strukturen unter anderem durch Tabelle 2.3 und Abbildung 2.2 beschrieben.

Eisbildung	Lufttemperatur	Windgeschwindigkeit	Tröpfchengröße	Luft-Wassergehalt
<b>NIEDERSCHLAG</b>				
Klareis	-10 °C bis 0 °C	beliebig	groß	mittel
Nassschnee	0 °C bis 3 °C	beliebig	Flocken	sehr hoch
<b>IN-CLOUD ICING</b>				
Klareis	siehe Abbildung 2.2	siehe Abbildung 2.2	mittel	hoch
Raueis			mittel	hoch
Raureif			klein	niedrig

Tabelle 2.3: Meteorologische Parameter für atmosphärische Vereisung [13].

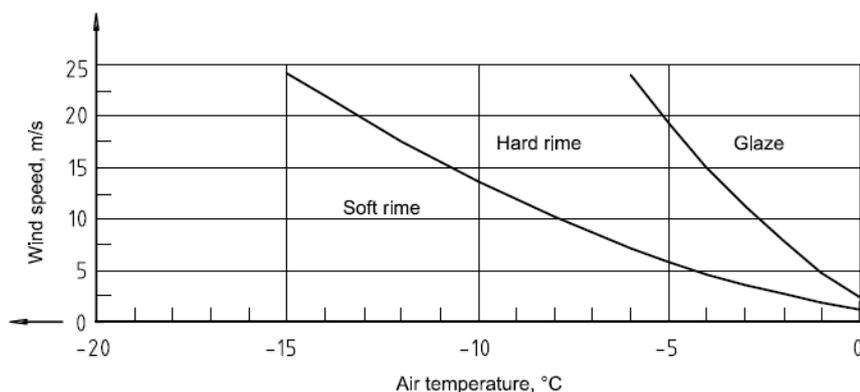


Abbildung 2.2: Arten der Eisbildung zufolge von In-Cloud Icing. Eisbildung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit der Lufttemperatur gemäß ISO12494 (2001, S7). „Soft rime“ entspricht weichem Raureif und „Hard rime“ hartem Raureif bzw. Raueis und „Glaze“ Klareis [13].

## 2.4 Vereisung von Strukturen

Die Vereisung von Strukturen ist eine weit verbreitete Problematik und daher auch gut erforscht. Im folgenden Abschnitt wird auf die Physik hinter der Eisbildung und auf die daraus resultierenden Eistypen eingegangen.

### 2.4.1 Trockene und nasse Vereisung

Grundsätzlich kann bei der Vereisung von Strukturen zwischen trockener und nasser Vereisung unterschieden werden. Bei der nassen Vereisung ist die Menge an Wasser, die in Form von Wassertröpfchen auf die Oberfläche auftrifft, höher als die Menge an Wasser, die an der Oberfläche vereisen kann. Die Folge ist eine Wasserschicht an der Oberfläche, die dafür sorgt, dass nur sehr wenige Luftbläschen im Eis hinterlassen werden und Klareis gebildet wird.

Eine trockene Vereisung kommt zustande, wenn die auftreffenden Wassertröpfchen gefrieren, bevor die nächsten Tröpfchen auftreffen. Zwischen den gefrierenden Wassertröpfchen können sich Luftblasen in unterschiedlichen Größen bilden. Dies führt zur Eisbildung mit opaker Optik [1].

### 2.4.2 Arten von Vereisung

Abgesetzter und gefrorener Niederschlag kann in drei Arten unterteilt werden:

#### Raureif

Raureif ist die häufigste Form von In-Cloud Icing und entsteht, wenn Wolken oder Nebel mit unterkühlten Wassertropfen vom Wind gegen Strukturen getragen werden. An der vom Wind zugewandten Seite frieren die Tröpfchen sofort (trockene Vereisung). Es kann noch zwischen hartem und weichem Raureif unterschieden werden - in der Literatur oftmals auch als Raueis (harter Raureif) und Raureif bezeichnet. Harter Raureif hat eine opake Optik und weist eine Dichte von  $600 - 900 \text{ kg/m}^3$  auf. Er entsteht, wenn Wolken oder Nebel größere Tröpfchen tragen. Sind diese hingegen klein, so wird die Entstehung von weichem Raureif begünstigt. Dieser kann optisch durch seine weiße Farbe und anhand der geringeren Dichte von  $200 - 600 \text{ kg/m}^3$  von harten Raureif unterschieden werden [13]. Raureif bildet sich bei Temperaturen von  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  [14].

#### Klareis

Klareis bildet sich typischerweise bei unterkühltem Regen, kann aber auch durch Wolken oder Nebel entstehen. Der Vorgang findet bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes zwischen  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  statt (nasse Vereisung). Klareis hat eine glatte gleichmäßig verteilte Oberfläche und ist transparent. Im Eis befinden sich keine oder nur sehr wenige Luftbläschen, weshalb die Dichte mit  $900 \text{ kg/m}^3$  höher als jene von Raureif ist. Die Haftung auf Oberflächen ist deutlich höher als bei Raureif [14].

### Nassschnee

Nassschnee bildet sich aus geschmolzenen Schneeflocken, die an Strukturen haften bleiben und eine Schicht bilden. Die Temperaturen sind dabei im positiven Bereich zwischen 0 °C und 3 °C. Sinkt die Temperatur nachdem sich eine Nassschnee-Schicht gebildet hat, kann diese einfrieren [14].

Eistyp	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Adhäsion und Kohäsion	Farbe	Form
Klareis	900	stark	transparent	gleichmäßig verteilt / Eiszapfen
Raueis	600-900	stark	opak	exzentrisch in Windrichtung
Raureif	200-600	stark	weiß	exzentrisch in Windrichtung
Nassschnee	300-600	schwach (Bildung), stark (gefroren)	weiß	gleichmäßig verteilt / exzentrisch

Tabelle 2.4: Eistypen und deren Eigenschaften nach [13].

### 2.4.3 Zeitliche Quantifizierung der Vereisung

Die zeitliche Abfolge der Vereisung kann in instrumentelles und meteorologisches Vereisen unterteilt werden [14].

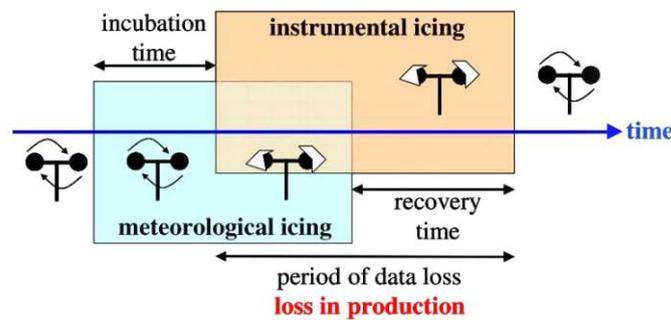


Abbildung 2.3: Grafische Darstellung der meteorologischen und instrumentellen Vereisung sowie der Inkubationszeit und Erholungszeit [14].

### Meteorologische Vereisung (Meteorological Icing)

Die meteorologische Vereisung beschreibt den Zeitraum in dem die meteorologischen Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck für die Vereisung von

Strukturen gegeben sind. In dieser Phase bildet sich aktiv Eis und sie geht der instrumentellen Phase voraus. Sobald die Bedingungen für die Eisbildung nicht mehr erfüllt sind, gilt die meteorologische Vereisung als beendet.

### **Instrumentelle Vereisung (Instrumental Icing)**

Die instrumentelle Vereisung beschreibt den Zeitraum, in dem Strukturen vereist sind. Der Beginn der instrumentellen Vereisung wird durch den ersten Eisansatz an der Struktur ausgelöst und sie ist beendet, wenn die komplette Enteisung erfolgt ist. Es wird damit der Zeitraum beschrieben, in welchem technische Störungen durch Eis an technischen Geräten wie Messinstrumente auftreten können. Die Phase der instrumentellen Vereisung beginnt zwangsläufig nach der meteorologischen Vereisung und hält entsprechend länger an.

### **Inkubationszeit (Incubation Time)**

Die Inkubationszeit beschreibt die zeitliche Verzögerung zwischen Beginn der meteorologischen und instrumentellen Vereisung.

### **Erholungszeit (Recovery Time)**

Die Erholungszeit beschreibt die zeitliche Verzögerung zwischen Ende der meteorologischen und instrumentellen Vereisung.

### **2.4.4 Anti-Icing und De-Icing**

Eisschutzmaßnahmen können in Anti-Icing und De-Icing unterteilt werden. Bei Anti-Icing-Maßnahmen wird die Bildung von Eis auf der Oberfläche verhindert oder möglichst verzögert (Erhöhung der Inkubationszeit). Beim De-Icing wird die bereits bestehende Eisschicht durch Maßnahmen entfernt (Verringerung der Erholungszeit).

### **Anti-Icing bzw. Vereisungsprävention**

Als Vereisungsprävention versteht man das Maximieren der Inkubationszeit, also das möglichst lange Hinauszögern der instrumentellen Vereisung. Im Falle von WKA können technische Oberflächen die Eisanhftung verzögern. Bei Flugzeugen werden beispielsweise Anti-Icing Fluide gegen die Vereisung der Tragflächen beim Startvorgang eingesetzt. Präventive Maßnahmen können bei WKA zu einer Verringerung der Stillstandszeit führen. Als Nachteil gilt der Mangel an technologischen Optionen [1].

### **De-Icing bzw. Enteisung**

Enteisung kann als Minimierung der Erholungszeit bezeichnet werden. Wenn die Bedingungen für das meteorologische Vereisen nicht mehr vorhanden sind, so wird die Zeit minimiert, bis die instrumentelle Vereisung beendet ist. Im Vergleich zum Anti-Icing

stehen hier mehr Optionen zur Auswahl.

### 2.5 Vereisung von Windkraftanlagen

Der Einsatz von WKA im Alpenraum ist aufgrund der komplexen Geländestrukturen, der turbulenten Winde und der Vereisung eine Herausforderung für Betreiber und Hersteller. Die Höhenlage und die tieferen Temperaturen sorgen dafür, dass es öfters zu Vereisung der Strukturen kommt. Betroffen sind vermehrt WKA welche oberhalb der 1000 m ü.M. liegen [14]. Durch Wolken oder Nebel kommt es im alpinen Raum, häufig zur Bildung von Raureif oder Klareis, seltener in Folge von Nassschnee und Eisregen. Der Eisansatz an WKA kann sich wie folgt auswirken [14]:

- Eisansatz an den Rotorblättern führt zu gestörter Aerodynamik und verringert die Effizienz.
- Asymmetrische Masseverteilung durch Vereisung der Rotorblättern kann zur Unwucht führen, wodurch Rotorblattschwankungen und verstärkte Turmschwingungen zu beobachten sind. Die wechselnden Belastungen der Struktur können zur Materialermüdung führen.
- Vereiste Rotorblätter führen zu erhöht Lärmemission.
- Zusatzlasten der Rotorblätter führen zu erhöhten Materialbelastungen.
- Vereiste Windmessgeräte können zu fehlerhaftem Betrieb und zu Sicherheitsabschaltungen führen.
- Vom Rotorblatt abfliegende Eispartikel (Eiswurf) stellen ein Sicherheitsrisiko dar.

Die Vereisung einer WKA reduziert deren Verfügbarkeit und führt zu erhöhten Planungs- und Betriebsaufwand. Der Einsatz von Eisschutzmaßnahmen kann die Verfügbarkeit einer WKA erhöhen, wodurch die Investitions- und Betriebskosten relativiert werden können.

Eine Studie der Narvik University in Norwegen hat sich mit dem Leistungsverlust durch die Vereisung einer 5 MW WKA beschäftigt. Dabei wurden Simulationen durchgeführt und mit bereits veröffentlichten Daten verglichen. Die Ergebnisse deckten sich mit anderen Studien und zeigten einen Leistungsverlust durch die vereisten Rotorblätter von bis zu 28 % [16]. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Regelung der Winkelgeschwindigkeit des Rotors anhand des Drehmomentes am Generator, durch die veränderten Parameter nicht mehr optimal abgestimmt werden konnte. Der Betrieb von vereisten WKA ist nur möglich, wenn die Eismasse im dynamischen Gleichgewicht ist. Tritt eine Unwucht im Betrieb auf, kommt es zur Notausschaltung.



Abbildung 2.4: Vereiste Rotorblätter [15]

### 2.5.1 Vereisung der Rotorblätter

WKA sind insbesondere an den Rotorblättern von Vereisung betroffen. Wenn die meteorologischen Bedingungen gegeben sind, baut sich an der dem Wind zugewandten Seite eine Eisschicht auf. Die Wassertröpfchen können dem raschen Richtungswechsel der Luft am Staupunkt nicht folgen und treffen auf der Vorderkante des Blattes auf. Beginnend an der Blattspitze, bildet sich ein hufeisenförmiger Eisansatz aus Klareis und Raueis oder eine gemischte Form davon [17]. Die Vereisung am Rotorblatt beginnt meist aufgrund der höheren Windgeschwindigkeit an der Blattspitze. Die mit dem Radius zunehmende Windgeschwindigkeit führt auch dazu, dass die Vereisung von der Blattwurzel zur Blattspitze typischerweise zunimmt [18]. An der dem Wind abgewandten Seite des Profils, ist aufgrund des entstehenden Unterdrucks auch Vereisung möglich, wobei diese im geringeren Ausmaß stattfindet.

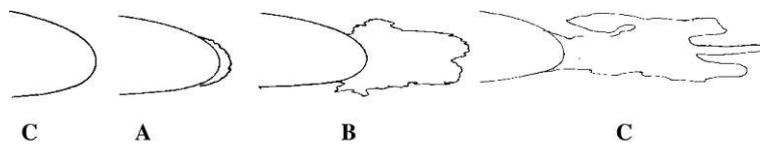


Abbildung 2.5: Typischer Eisansatz am Rotorblatt [19]

Die Abbildung 2.6 zeigt den Vereisungszustand und das Anströmungsverhalten eines im Leerlauf und im Generatorbetrieb befindlichen Rotorblattes. Die Untersuchung zeigte

eine erhöhte Eisansammlung im Leerlaufbetrieb, was auf verringerte aerodynamische Kräfte zurückgeführt wurde. Im Produktionsbetrieb sorgten diese Kräfte dafür, dass der Eisansatz ab einer bestimmten Größe abbrach und sich eine sägezahnartige Blatt Nase entlang der Kante bildete.

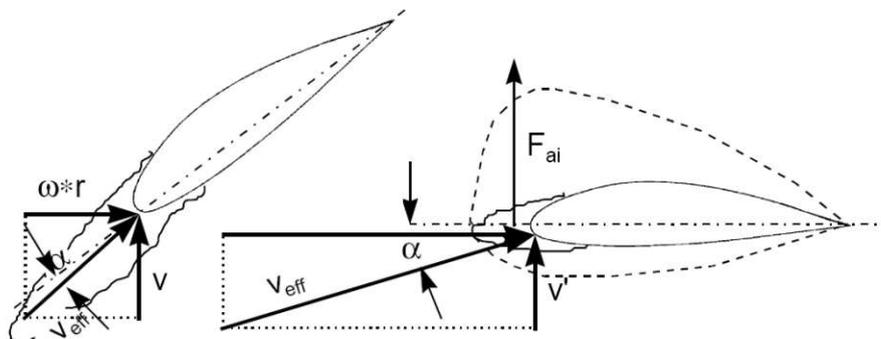


Abbildung 2.6: Eisansatz an der Profilnase. Unterscheidung zwischen Leerlauf Betrieb (links) und Leistungsbetrieb (rechts) [20].

Im Zuge einer Untersuchung der Universität von Quebec, wurde ein Abschnitt eines skalierten Rotorblattes im Windkanal unter zwei verschiedenen meteorologischen Bedingungen getestet. Es wurden die Bildung von Klareis und Raueis simuliert. In beiden Fällen ergaben die Simulationen eine erhöhte Eisbildung mit steigendem Rotorblatradius. Eine Hochrechnung ergab eine Eismasse von 11 % bei Klareis und 6.7 % Raueis bezogen auf die initiale Masse des Rotorblattes. Durch die vom Eis veränderten geometrischen Querschnitte des Rotorblatts, konnte eine Verringerung des Auftriebes und eine Erhöhung des Luftwiderstandes festgestellt werden. Die Folge ist eine Reduktion der Rotationsgeschwindigkeit die bis zum Stillstand der Anlage führen kann [21].

### 2.5.2 Parameter der Vereisung von Rotorblätter

Die Vereisung von WKA wird durch eine Reihe von meteorologischen Parametern bestimmt, wobei die dominantesten die Windgeschwindigkeit, die Tröpfchengröße, der Wassergehalt und die Umgebungstemperatur sind. Wie die Parameter quantifiziert werden können und wie diese sich auf die Vereisung auswirken wird in diesen Abschnitt beschrieben.

#### Tröpfchendurchmesser

Der tatsächliche Tröpfchendurchmesser ist bei Wolken und Regen einer gewissen Streuung unterworfen, sodass als Maß der mittlere Volumendurchmesser MVD herangezogen wird. Dieser stellt ein Volumen bezogenen Medianwert dar.

Kleine Tröpfchen im Bereich von  $0.02 \text{ mm}$  wie sie in Wolken und bei In-Cloud Icing vorkommen, können bis zu  $-20 \text{ °C}$  und in Extremfällen bis zu  $-35 \text{ °C}$  in flüssiger Form vorkommen. Mit steigender Tröpfchengröße steigt auch die Kristallisationstemperatur.

Unterkühlte Regentropfen haben in der Regel eine Größe von  $0,5\text{ mm}$  bis  $5\text{ mm}$  und können bis zu einer Temperatur von  $-15\text{ °C}$  in unterkühlter Form vorkommen [22]. Der höchste Anteil an unterkühlten Wassertröpfchen soll bei Temperaturen oberhalb  $-7\text{ °C}$  auftreten [23]. Die Tröpfchengröße hat auch einen direkt proportionalen Einfluss auf das dynamische Flugverhalten der Tröpfchen [22]. Große Tröpfchen werden aufgrund der Masse weniger von der Luftströmung beeinflusst als kleine Tröpfchen.

### Flüssigwassergehalt

Der Flüssigwassergehalt LWC (liquid water content) gibt den Anteil von Wasser pro Volumeneinheit feuchter Luft an. Der höchste LWC wird im Zentrum von Regenwolken mit Werten bis zu  $5\text{ g/m}^3$  beobachtet, im allgemeinen liegt er aber eher bei  $1\text{ g/m}^3$  [9]. Der Anteil von flüssigem Wasser in der Luft und die Größe der Tröpfchen können die Intensität der Vereisung stark beeinflussen. Bei In-Cloud Icing wird in der Literatur ein LWC im Bereich von  $0,2\text{--}0,7\text{ g/m}^3$  angegeben [23]. Es ist aber zu beachten, dass der LWC aufgrund von atmosphärischen Bedingungen und geographischen Gegebenheiten hohen Schwankungen unterworfen ist. Bei gefrierenden Regen oder Niesel ( $MVD > 0,1\text{ mm}$ ) ist der LWC im allgemeinen geringer als bei In-Cloud Icing und liegt im Bereich von  $0,05\text{--}0,2\text{ g/m}^3$ . Der LWC ist zusammen mit dem MVD ein wichtiger Parameter für Berechnungsmodelle der Eiszuwachsrate [22].

### Temperatur

Die Umgebungstemperatur und die Oberflächentemperatur sind wichtige Parameter für die Eisbildung und können diese maßgeblich beeinflussen. Die Umgebungstemperatur ist entscheidend für den Phasenzustand der Wassertröpfchen und beeinflusst in weiterer Folge auch die Art der Eisbildung und die Eiszwachstumsrate.

Die Vereisung von WKA ist dabei nicht unbedingt an negativen Temperaturen gebunden. Kommt ein Wassertröpfchen von einer kalten in eine warme Temperaturzone, kann er unterkühlt auf die Oberfläche in einer positiven Umgebungstemperatur treffen und gefrieren. Die Oberflächentemperatur kann von der Anströmungsgeschwindigkeit beeinflusst werden. Durch die aerodynamische Reibung am Staupunkt kann Wärme in die Oberfläche eingebracht werden und damit die Oberflächentemperatur um einige Grad erhöhen. Dies ist bei Hauptrotoren von Hubschraubern oder bei Flugzeugen mit hoher Fluggeschwindigkeit der Fall. Beim Rotorblatt von WKA ist aufgrund der relativ niedrigen Anströmungsgeschwindigkeit die Oberflächentemperatur annäherungsweise gleich der Umgebungstemperatur.

### Geschwindigkeit

Die Anströmungsgeschwindigkeit ist ein weiterer Parameter, der die Eisbildung und insbesondere die Eiszwachstumsrate beeinflussen kann. Mit steigender Anströmungsgeschwindigkeit an der Rotorblattvorderkante, steigt auch die Wassermasse, die auf die Oberfläche der Rotorblätter auftrifft. Mit zunehmenden Wassermassenstrom kann auch die Eiszwachstumsrate ansteigen, wenn die weiteren Bedingungen für den Eiswachstum

erfüllt sind. Die Anströmungsgeschwindigkeit am Rotorblatt ergibt sich aus der Vektoraddition der Umfangsgeschwindigkeit und der Windgeschwindigkeit.

### 2.5.3 Maßnahmen gegen Vereisung von Windkraftanlagen

Maßnahmen gegen Vereisung von WKA können in zwei Kategorien unterteilt werden: Anti-Icing und De-Icing. Ziel des Anti-Icings ist es, den Prozess des Anhaftens von Eis zu verhindern oder verzögern. Unter De-Icing werden Methoden verstanden, die zum Entfernen von bereits anhaftendem Eis führen. Beide Maßnahmen können erneut in passive und aktive Systeme unterteilt werden. Aktive Eisschutzmaßnahmen benötigen eine Energiezufuhr um ihre Funktion zu erfüllen, während passive Systeme ohne zusätzlichem Energieaufwand auskommen [24]. Aus diesem Grund reduzieren aktive Anti-Eis-Systeme den Wirkungsgrad von WKA. Einer Abschätzung zufolge, können Eisschutzmaßnahmen zwischen 1 - 4 % der jährlichen Stromproduktion der WKA verbrauchen [25]. Passive Maßnahmen erfüllen oftmals die gewünschte Wirkung nicht oder greifen zu sehr in das dynamische Verhalten der WKA ein.

### 2.5.4 Detektion von Eis

Ein wichtiger Bestandteil der Anti-Icing und De-Icing Systeme (ADIS) ist die Detektion der Vereisung. Eisdetektionssysteme haben die Aufgabe den Eisansatz an den Rotorblättern zuverlässig zu detektieren. Nicht alle Systeme bieten die Möglichkeit, den eisfreien Zustand nach einer Vereisung zu erkennen (Abtauverhalten). Die derzeit auf den kommerziellen Markt verfügbaren Messsysteme, basieren auf unterschiedliche physikalische Prinzipien und lassen sich durch die Position an der WKA unterteilen:

- Gondelbasierte Systeme: Das Eisdetektionssystem ist an der Gondel der WKA installiert.
- Rotorblattbasierte Systeme: Das Eisdetektionssystem ist am Rotorblatt der WKA installiert.

Eis-Detektionssysteme an der Gondel messen nicht die tatsächlichen Bedingungen am Rotorblatt, sondern können nur instrumentelle oder meteorologische Vereisung erkennen. Diese Systeme sind weit verbreitet und schon länger auf dem Markt verfügbar, weshalb sie auch genauer erforscht und technisch ausgereifter sind. Die Genauigkeit und insbesondere die limitierte Erkennung des Abtauverhaltens gilt als deren Nachteil [1]. Die Wirtschaftlichkeit einer WKA ist besonders in alpinen Lagen an die Stillstandszeit durch Vereisung gebunden. Eine zuverlässige Erkennung eisfreier Rotorblätter, ist eine Möglichkeit die Verfügbarkeit der WKA zu erhöhen.

In einem technischen Bericht von Meteotest wurden unterschiedliche Eisdetektionssysteme verglichen und zeigten dabei die Vor- und Nachteile auf [26]. Einige dieser Systeme werden hier beschrieben:

#### **Gondelbasierte Systeme:**

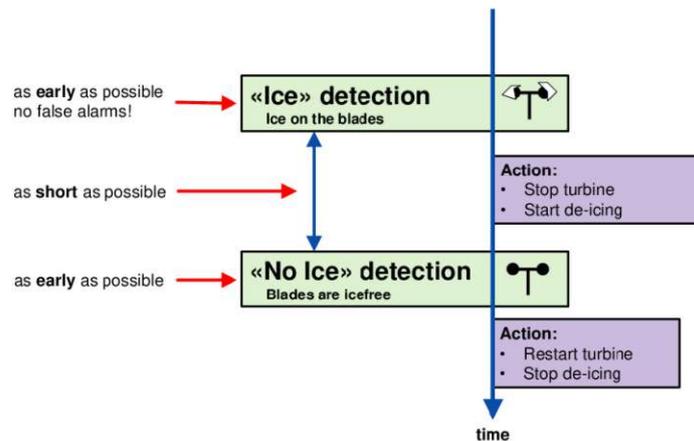


Abbildung 2.7: Darstellung der Eisdetektion [26]

- **Temperatur und relative Luftfeuchte (synoptisch):** Bei diesem System werden an der Gondel Temperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen, womit auf die meteorologische Vereisung geschlossen werden kann. Typische Grenzwerte für meteorologische Vereisung sind unterhalb von  $2 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$  und oberhalb von  $90 - 95 \%$  relativer Luftfeuchtigkeit [26].
- **Beheiztes und unbeheiztes Anemometer:** Durch das Vergleichen der Messungen eines beheizten und unbeheizten Anemometers kann der Beginn und das Ende der instrumentellen Vereisung bestimmt werden.
- **Gewichtsmessung:** Ein gravimetrisches Messsystem welches die angehaftete Eismasse an einen Stab erfassen kann. Das System verfügt über eine Heizung, wodurch es wieder enteist werden kann. Durch Heizzyklen kann Beginn und Ende der instrumentellen Vereisung, sowie die Vereisungsintensität über die Zeit erfasst werden.
- **Änderung der Eigenfrequenz:** Ein schwingendes System ändert seine Eigenfrequenz, wenn durch Eis die Masse des schwingenden Systems verändert wird. Überschreitet die Frequenzänderung einen Grenzwert, kann auf instrumentelle Vereisung geschlossen werden.
- **Infrarot Detektoren:** Das Messsystem besteht aus einem beheizbaren Stab und ein oder mehreren Infrarotlichtstrahlern und -detektoren. Beginnt der Stab zu vereisen, wird die Intensität des reflektierten Strahls abgeschwächt.
- **Impedanzmessung:** Ein System das durch Messung der elektrischen Impedanz und der Oberflächentemperatur auf Eis und Wasser an der Oberfläche schließen kann.

**Rotorblatt basierte Systeme:**

- **Leistungskurve:** Die Leistungskurve der WKA ist im Wesentlichen von den aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter, der Windgeschwindigkeit und dem Anstellwinkel der Rotorblätter abhängig. Es wird eine Funktion der Leistungskurve in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und dem Anstellwinkel unter gewöhnlichen, nicht vereisten, Bedingungen erstellt. Bildet sich Eis an den Rotorblättern, so ist die Aerodynamik der Rotorblätter gestört und die generierte Leistung nimmt im Vergleich zur referenzierten Leistung ab, wodurch auf Vereisung geschlossen werden kann, wenn die Anlage in Betrieb ist.
- **Eigenfrequenz der Rotorblätter:** Das System kann durch piezoelektrischen Beschleunigungssensoren im Rotorblatt die Eigenfrequenz messen. Kommt es zur Vereisung, ändert sich durch die zusätzliche Eismasse das dynamische Verhalten und die Vereisung kann anhand der Änderung der Eigenfrequenz erfasst werden. Die weitere Verarbeitung der Messdaten kann auch eine gute Abschätzung der Eislast liefern.
- **Impedanz- und Kapazitätsmessung am Rotorblatt:** Bei diesem Messsystem werden flache, flexible kapazitive Sensoren eingesetzt und an mehreren Punkten entlang der Rotorblattkante platziert, wodurch die Vereisung, anhand der Veränderung der Impedanz, zu erkennen ist. Diese Messmethode ermöglicht auch eine Abschätzung der Eisschichtdicke, sowie mit zusätzlichen Temperatursensoren die Abschätzung der Oberflächentemperatur. Das System ist unabhängig vom Betriebszustand und kann sowohl Eis als auch den eisfreien Zustand erkennen.

Gondelbasierte Systeme eignen sich für die Messung von meteorologischer und instrumenteller Vereisung. Der Vereisungszustand der Rotorblätter kann aber nicht direkt erfasst werden und das Abtauverhalten kann nicht oder nur sehr ungenau bestimmt werden. Für das De-Icing ist das Erkennen des eisfreien Zustands von hoher Bedeutung. Rotorblattbasierte Systeme sind vor allem bei der "no ice" Messung deutlich genauer.

### 2.5.5 Anti-Icing Methoden

#### Passive Anti-Icing Methoden

- **Oberflächenbehandlung:** Das Ziel von antifreeze oder eisphoben Oberflächen ist es, das Gefrieren von Wasser an Oberfläche zu verzögern oder sogar zu verhindern. Die Funktionsweise dieser Oberflächen kann in zwei physikalische Prinzipien unterschieden werden. Das Prinzip der eisphoben Fläche beruht auf der Verringerung der Adhäsionskraft. Sind die einwirkenden Kräfte auf die Eismasse (Gravitationskraft, Zentrifugalkraft, Beschleunigungskräfte) größer als die Adhäsionskräfte, kann dies zur Enteisung führen. Das antifreeze Prinzip zielt darauf ab, das Anfrieren der Wassertröpfchen zu verhindern. Dies könnte beispielsweise erreicht werden, indem die Tröpfchen nach dem Aufprall nicht benetzen und dadurch mangels Haftung das Blatt verlassen [15]. Die Herstellung solcher Oberflächen kann im Werk durchgeführt werden oder auch vor Ort durch lackieren oder folieren. Erfahrungswerte

haben gezeigt, dass Abnutzungserscheinungen durch Feinstaub oder andere Partikel in der Luft auftreten und daher Beschichtungen regelmäßig erneuert werden müssen. Die technischen Oberflächen lassen sich gut mit anderen Eisschutzmaßnahmen kombinieren. Eine antifreeze-Beschichtung und ein beheiztes Rotorblatt ergänzen sich so, dass der Energiebedarf des Heizungssystems reduziert werden kann [24]. Eine präventive Verhinderung der Vereisung durch eine Oberflächenbehandlung, wurde durch unterschiedliche Ansätze erforscht und getestet, wobei keine dieser Technologien den kommerziellen Durchbruch geschafft hat [24]. In Kapitel 2.6 wird genauer auf Anti-Icing Oberflächen eingegangen.

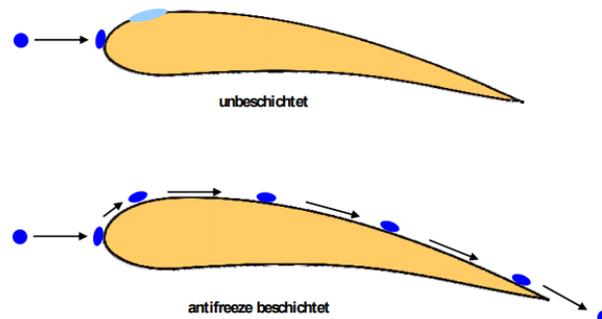


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Funktion einer antifreeze-Beschichtung am Beispiel eines Rotorblatts [15].

- **Schwarze Farbe:** Schwarze Oberflächen nehmen mehr Anteile des Sonnenlichtspektrums als hellere Oberflächen auf. Schwarz gefärbte Rotorblätter können deshalb mehr Sonnenenergie aufnehmen und durch Erhöhung der Oberflächentemperatur der Vereisung entgegenwirken. Bei Testversuchen in Yukon (Kanada) konnten mit dieser Methode unmittelbare Verbesserungen erzielt werden. Geeignet ist sie aber nur für Standorte mit nur leicht und selten auftretender Vereisung und mit hoher winterlichen Sonnenintensität. Generell gilt diese Methode aber nicht als ausreichend um Vereisung präventiv zu verhindern [27] [24].
- **Chemikalien:** Durch flüssige Chemikalien an der Oberfläche kann die Vereisung durch Herabsetzen des Gefrierpunktes verhindert werden. Die Flüssigkeit verbleibt nicht dauerhaft auf der Oberfläche, womit ein regelmäßiges Nachspritzen notwendig ist. Das Verfahren ist deshalb kostenintensiv und umweltschädlich. Wird vorwiegend zum Enteisen von Flugzeugen vor dem Startvorgang eingesetzt [24].

### Aktive Anti-Icing Methoden

- **Thermisch:** Die Beheizung vom Rotorblatt kann als De-Icing und als Anti-Icing eingesetzt werden. Durch Heizelemente im Rotorblatt oder durch eine thermische

Belüftung kann die Oberflächentemperatur konstant im positiven Bereich geregelt werden. Die Vereisung kann damit vollständig verhindert werden. Für das thermische Anti-Icing gibt es viele Varianten. Es kann beispielsweise nur die Vorderkante mit leistungsstarken Heizelementen ausgestattet werden. Diese erwärmen die Oberfläche auf mehr als 100 °C und bringen damit die auftreffenden Tröpfchen direkt zum Evaporieren. Wird die Vorderkante nur leicht erwärmt, kommt es zum Rückfluss und Vereisung der Wassertröpfchen am Blattrücken [28]. Thermische Anti-Icing Maßnahmen sind grundsätzlich sehr energieintensiv und können das Epoxidharz im Rotorblatt zusätzlich durch die Temperaturschwankungen ermüden [24].

- **Mikrowellen:** Die Rotorblätter werden durch Mikrowellen auf eine Temperatur von über 0 °C beheizt. Das Rotorblatt muss dafür mit entsprechenden reflektierenden Materialien ausgestattet sein. Eine Methode beruht auf der Beheizung der Rotorblätter durch einen Mikrowellenstrahler, der am Turm der WKA angebracht ist. Wenn die Rotorblätter vor dem Turm vorbeiziehen, werden sie durch den Strahler erwärmt. Die Beheizung der Rotorblätter konnte bereits erfolgreich getestet werden, ist aber noch nicht kommerziell verfügbar [29] [24].

### 2.5.6 De-Icing Methoden

#### Passive De-Icing Methoden

- **Änderung des Anstellwinkels:** Die Rotorblätter werden entlang ihrer Längsachse derart gedreht (pitch angle oder auch Anstellwinkel genannt), dass der Eisansatz an der Vorderkante von der Luftströmung einseitig belastet wird. Die resultierende turbulente Strömung erzeugt Kräfte, die das Eis abschütteln soll. Diese Methode wurde nicht wissenschaftlich untersucht und es besteht Gefahr, die Rotorblätter dabei zu beschädigen.

#### Aktive De-Icing Methoden

- **Thermisch durch Heizwiderstand:** Thermische De-Icing Systeme erwärmen die Oberfläche der Rotorblätter, sodass eine Wasserschicht zwischen Eis und der Oberfläche entsteht und das Eis die Haftung verliert. Elektrisch beheizte Folien mit Heizdrähten oder Kohlenstofffasern werden an der Vorderkante des Rotorblattes angebracht und üblicherweise für 15-30 min betrieben. An einer 600 kW Anlage wurde beispielsweise ein 15 kW Heizungssystem angebracht, welches, je nach Klimaverhältnisse, 1-4 % der Jahresstromproduktion verbraucht [30]. Derartige Heizfolien können generell an allen WKA angebracht werden und es existieren einige kommerzielle Produkte auf dem Markt, wovon aber keines ausgereift ist und in Serie produziert wird [31][24].
- **Thermisch durch Heißluft:** Es wird eine geschlossene Zirkulation von beheizter Luft im Rotorblattinneren erzeugt. Die warme Luft wird in der Blattwurzel zu-

geführt und durch Kanäle oder durch ein geteiltes Rotorblatt eine Zirkulation erzeugt. Das De-Icing kann damit im Betrieb und im Stillstand durchgeführt werden. Die Effizienz kann zusätzlich erhöht werden, indem die abgeführte Wärme der Generatoren in der Gondel genutzt wird. Im Gegensatz zu den beheizten Folien kann hier die gesamte Oberfläche des Rotorblattes erwärmt werden, womit ein erneutes Einfrieren der abfließenden, geschmolzenen Tröpfchen verhindert wird. Ein Prototyp an einer 850 kW WKA konnte mit einer 7 kW Heizanlage ausreichend beheizt werden. Der Energiebedarf konnte im Vergleich zu anderen thermischen De-Icing und Anti-Icing Systemen relativ geringgehalten werden. Es wurde rund 1 % der Jahres Stromproduktion konsumiert [32]. Dieses System eignet sich besonders für Temperaturen im Bereich von 0 °C. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten und tiefen Temperaturen steigt der Energiebedarf stärker als bei anderen thermischen Verfahren. [24]

- **Pneumatische Enteisungsvorrichtung:** An der Rotorblatt-Vorderkante werden flexible und pneumatisch aufblasbare Enteisungsmatten angebracht. Durch die Volumenänderung wird die Eisschicht mechanisch zertrümmert. Weitere äußere Einflüsse wie die Zentrifugalkraft, Erdbeschleunigung oder der Wind entfernen die verbleibenden Eisfragmente vom Rotorblatt. Testungen an einer 1.5 MW Anlage haben durchaus gute Ergebnisse gezeigt. Klareis konnte bis -10 °C und Raueis bis zu -20 °C entfernt werden [33]. Als Nachteil gilt die Gefährdung durch Eiswurf und die gestörte Aerodynamik durch die Enteisungsmatten. [24]
- **Elektromagnetische Impulse:** Durch elektromagnetische Spulen hinter der Rotorblattoberfläche werden Wirbelströme induziert und Kräfte zwischen Spule und Metalloberfläche erzeugt. Diese leiten Schwingungen an die Rotorblattoberfläche und können dadurch die Eisschicht zerbrechen und entfernen. Es ist ein sehr effizientes, umweltfreundliches und energiesparendes Verfahren, welches mit relativ geringem Aufwand installiert werden kann. Ursprünglich wurde es für die Luftfahrt entwickelt und wird nun auf WKA übertragen. Die Technik befindet sich deshalb noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase. [24]

### 2.6 Nanostrukturierte Oberflächen

Die Nanowissenschaft befasst sich mit Materialien, die bis auf Abmessungen im Nanometerbereich erforscht werden. Die Materialforschung in dieser Größenordnung beinhaltet Cluster, Moleküle und sogar Atome die nicht nur sichtbar gemacht werden, sondern auch mit speziellen Nano-Werkzeugen bewegt werden können [34]. Mit der Modifikation der Nanopartikel in ihrer Größe, Form und Verteilung sollen gewünschte Materialeigenschaften hervorgerufen werden. Dies gilt für den Herstellungsprozess von Strukturen aber auch besonders für die Modifikation von technischen Oberflächen. Durch das Vordringen in immer kleineren Dimensionen mit neu entwickelten Verfahren zur Beschichtung, Modifikation und Charakterisierung von Oberflächen, wurde in diesem Gebiet die Forschung stark vorangetrieben. Durch nanostrukturierte Oberflächen können einzigartige

physikalische und chemische Eigenschaften erzeugt werden, die nicht nur im klassischen Maschinenbau wie in der Automobil- und Energietechnik Anwendung finden, sondern auch in der Elektronik, Displaytechnik und in der Medizintechnik [35]. Die Herstellungsverfahren solcher Oberflächen bedienen sich unterschiedlichen physikalischen Prinzipien und befinden sich zum großen Teil noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase [34]. Dieser Abschnitt befasst sich mit der Herstellung von Nanostrukturen im sub- $\mu\text{m}$  Bereich unter Einsatz eines UKPL und mit den daraus entstehenden Eigenschaften der strukturierten Oberflächen.

### 2.6.1 Lasertechnische Grundlagen

Gemäß DIN 8580 wird Abtragen als das Trennen und Formen von Stoffteilchen durch physikalische und chemische Wirkprinzipien in Form von elektrischer Energie, thermischer Energie, chemischen Reaktionen und deren Kombinationen zur Oberflächenbehandlung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen definiert [36]. Die Strukturierung von Oberflächen mittels eines UKPL fällt dabei in die Kategorie des thermischen Abtragens. Dazu gehören das Abtragen durch Gas (Brennhobeln, Brennschneiden), durch Funkenentladung (Erodieren) und durch Strahl (Licht, Laser, Elektronen) [37]. Gemäß DIN 8590 wird thermisches Abtragen mit einem Laserstrahl (Laserablation) wie folgt definiert: „Abtragen, bei dem die an der Wirkstelle erforderliche Wärme durch Energieumsetzung beim Auftreffen eines Laserstrahles am Werkstück entsteht“. Der Laserstrahl dient aus fertigungstechnischer Sicht als Energiequelle, dessen großer Vorteil die hochpräzise zeitliche und örtliche Energiezufuhr ist. Im Gegensatz zu vergleichbaren Fertigungsverfahren wird die thermische Energie, die dem Prozess zugeführt wird, sehr effizient genutzt. Außerhalb der Wechselwirkungszone geht wenig Energie verloren, was zu einer sehr hohen Qualität und Geschwindigkeit des Prozesses führt [38].

#### Erzeugung eines Laserstrahls

Für die Erzeugung eines Laserstrahles wird die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie genutzt. Wird ein Lasermedium angeregt, so nehmen die Atome oder Moleküle einen Zustand höherer Energie an (Besetzungsinversion). Die Elektronen der Atome im festen, flüssigen oder gasförmigen laseraktiven Medium wechseln auf ein höheres Energieniveau. Dieser angeregte Zustand ist nicht stabil, womit die Elektronen nach charakteristischen Verweilzeiten von  $10^{-7}$  s bis  $10^{-8}$  s wieder auf das niedrige Energieniveau wechseln [39]. Dabei wird elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge entsprechend der Energiedifferenz der involvierten Energieniveaus emittiert. Dieser Vorgang nennt sich spontane Emission. Einstein erkannte bereits im Jahr 1916, dass diese Emission gezielt eingeleitet werden kann [40]. Bei der stimulierten Emission wird ein bereits angeregtes Atom von einem Photon getroffen. Dieses steigt nun nicht um ein weiteres Energieniveau auf, sondern wird stimuliert oder angeregt, um auf den Zustand geringerer Energie zu wechseln. Die dabei entstehende Energiedifferenz wird zusätzlich zu dem eingefallenen Photon als ein weiteres Photon abgestrahlt. Die emittierte Strahlung weist dabei die gleichen Eigenschaften (Ausbreitungsrichtung, Phase,

Frequenz) auf, wie die einfallende. Die Teilchen agieren damit wie ein Verstärker der einfallenden Strahlung. Wenn ausreichend viele angeregte Teilchen vorhanden sind, kann die stimulierte Emission zu einer lawinenartigen Verstärkung der Strahlung führen. Diese zeichnet sich durch die gleiche Ausbreitungsrichtung (geringe Divergenz), Wellenlänge (Monochromasie), Polarisation und Phasenlage (Kohärenz) aus [39].

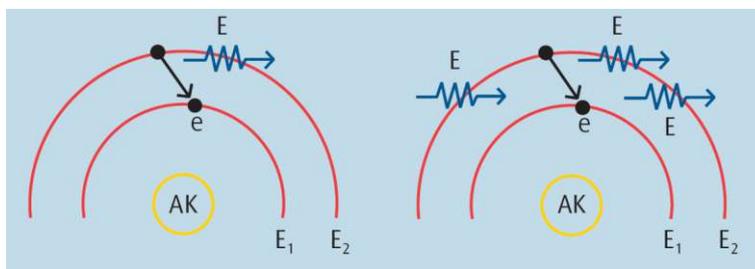


Abbildung 2.9: Links spontane Emission, rechts stimulierte Emission [39].

### Aufbau einer Laserstrahlquelle

Die wesentlichen Elemente eines Lasers sind das Lasermedium, der Resonator und die Anregung. Laser werden typischerweise nach ihrem Lasermedium kategorisiert, da dieses die wesentlichen Eigenschaften wie Wellenlänge, erreichbare Leistung und die Emissionscharakteristik bestimmt. Allgemein kann das Medium im Laser fest, flüssig oder gasförmig vorliegen (Festkörperlaser, Flüssigstofflaser und Gaslaser). Das aktive Medium befindet sich bei der Laserstrahlerzeugung üblicherweise im Resonator. Der im klassischen Laseraufbau verwendete optische Resonator ist ein Resonanzraum für elektromagnetische Wellen. Er besteht aus einer Anordnung von Spiegeln, die das Licht derart reflektieren, dass es durch stimulierte Emission verstärkt wird. Über einen teildurchlässigen Spiegel (Auskopplungsspiegel) kann das Licht vom Resonator ausgekoppelt werden. Optische Resonatoren müssen sehr fein abgestimmt werden, um die erwünschte Strahlungsleistung und Strahlungsqualität zu erreichen. Dem laseraktiven Medium wird im Resonator durch Anregung (Pumpen) Energie zugeführt. Dabei wird eine Besetzungsinversion erzeugt, welche anschließend eine stimulierte Emission ermöglicht. Das Medium kann durch unterschiedliche Energieformen wie z.B. elektrische Energie, Photonen oder chemische Reaktionen angeregt werden. Bei  $CO_2$  Gaslaser kann die Energie beispielsweise mittels Gleichstromspannung zwischen zwei Elektroden direkt in das laseraktive Medium eingeleitet werden. Bei Festkörperlasern erfolgt das Pumpen über intensive Lichtquellen wie z.B. Blitzlampen oder Laserdioden [39].

### Betriebsarten eines Lasers

Lasers können kontinuierlich oder gepulst betrieben werden. Beim kontinuierlichen oder cw-Betrieb (cw = continuous wave) wird ein gleichbleibender Laserstrahl emittiert. In der Industrie werden solche Laser meist für die Materialbearbeitung eingesetzt. Sie können bis zu einigen kW an Leistung erreichen und werden hauptsächlich zum Schneiden und

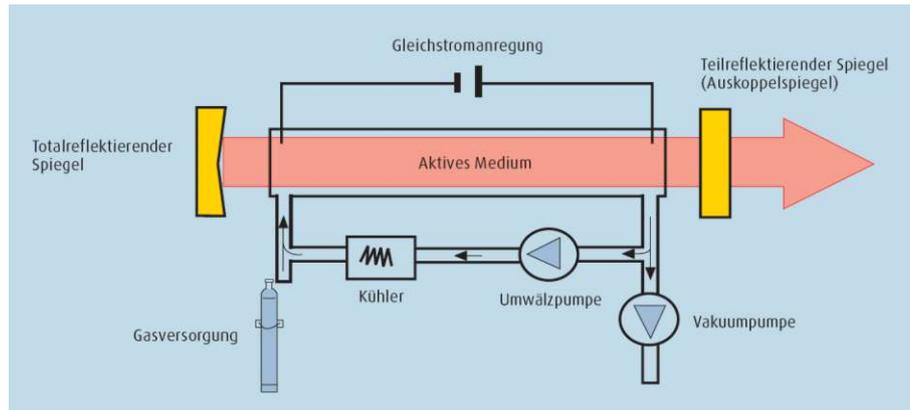


Abbildung 2.10: Prinzipieller Aufbau eines Resonators ( $CO_2$ -Laser) [39].

Schweißen in der Makrobearbeitung eingesetzt [38]. Wird der Laserstrahl in Form von Lichtimpulsen emittiert, so spricht man vom gepulsten Laserbetrieb. Die Pulslänge kann bis hin zu Attosekunden ( $10^{-18}$  s) reduziert werden. Für die Erzeugung solcher Lichtpulse gibt es verschiedene Techniken wie Pulsbetrieb der Pumpquelle (Blitzlampe) ( $10^{-6}$  s), Güteschalter (Q-Switch) ( $10^{-9}$  s) und Modenkopplung ( $10^{-15}$  s) [41]. Die Pulsdauer und Intensität sind dabei entscheidend für die thermische Einwirkung in das Material. Im kontinuierlichen und gepulsten Betrieb im Mikro- und Nanosekundenbereich erfolgt der Materialabtrag bzw. die Umformung in der Regel durch die thermische Einwirkung in das absorbierende Material, wodurch es schmilzt und umgeformt oder verdampft wird. Wird eine Pulsdauer im Bereich von Piko- und Femtosekunden mit entsprechend hoher Intensität erreicht, so erfolgt der Phasenübergang direkt vom festen in den gasförmigen Zustand (Sublimation). Laser, die Pulslängen im Bereich von Piko- und Femtosekunden erzeugen können, werden Ultrakurzpulslaser (UKPL) genannt.

### Ultrakurzpulslaser

UKPL emittieren die Lichtenergie zeitlich und räumlich komprimiert, wodurch Intensitäten von einigen Petawatt pro Quadratzentimeter erreicht werden können. Ermöglicht werden die ultrakurzen Lichtimpulse durch das Prinzip der Modenkopplung. Die im Laser schwingenden Energiezustände (longitudinale Moden) sind im freilaufenden Betrieb unabhängig voneinander, wodurch es zu konstruktiven und destruktiven Überlagerungen kommt. Gelingt es, durch die Synchronisierung der Moden, eine konstante Phasenbeziehung herzustellen, kommt es zu einer konstruktiven Interferenz die einen sehr kurzen und intensiven Laserimpuls erzeugt. Die hohe Photonendichte dieser Laserpulse führt zu einer sogenannten Multi-Photonen-Absorption, wodurch nahezu jedes Material abgetragen werden kann [42]. Die hohe Energiezufuhr kann nicht vom umgebenden Material abgeführt werden, wodurch ein thermisches Ungleichgewicht entsteht und eine Sublimation stattfindet. Das Material geht sofort in den gasförmigen Aggregatzustand über. Die besondere Wirkung von UKPL beruht darauf, dass die Dauer des Laserpulses kürzer ist,

als die für die Wärmediffusion benötigte Zeit [43].

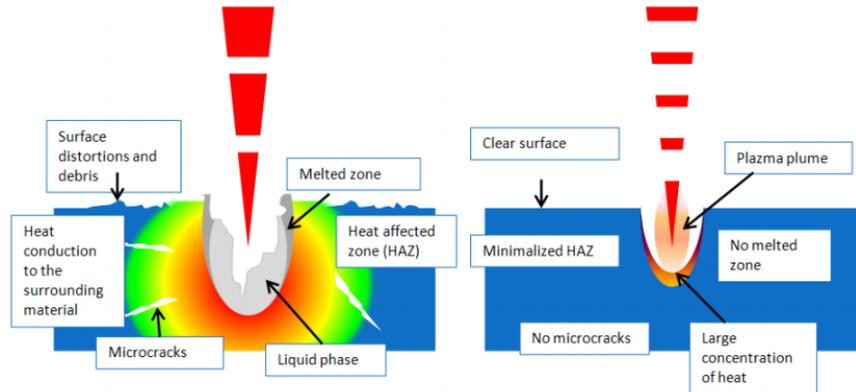


Abbildung 2.11: Vergleich von Nanosekundenlaser (links) und UKPL (rechts) bei der Licht/Materie-Interaktion [44].

Die UKPL haben dadurch einen wesentlichen Vorteil in der Präzision. Außerhalb der Wechselwirkungszone wird kaum thermische Energie eingeleitet, womit das umliegende Material von Spannungen, Rissen, Aufschmelzungen und Graten verschont bleibt. Damit ist eine sehr saubere und filigrane Schnittkante wie in Abbildung 2.12 möglich. Die geringe Materialabtragung bei kurzen Pulsen, führt allerdings zu einer geringen Bearbeitungsgeschwindigkeit. In der Praxis werden UKP Laser zum Bohren und Schneiden von Mikrostrukturen eingesetzt. Es können beispielsweise Bohrungen mit 10 Mikrometer Durchmesser und einer Tiefe von 2 mm erzeugt werden. Solche Präzisionsbohrungen können unter anderem für Einspritzdüsen oder für die Kühlung von Turbinenschaufeln eingesetzt werden [42]. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Herstellung von funktionalen Oberflächen. Mit den ultrakurzen Laserpulsen kann die Oberfläche mit Mikro- und Nanostrukturen versehen werden, wodurch Eigenschaften wie Benetzbarkeit, Verschleißverhalten, Reibungswiderstand oder Strukturfarbe verändert werden können.

### 2.6.2 Laser induzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS)

Durch hochenergetische Laserpulse können auf einer festen Oberfläche periodische Strukturen ausgebildet werden. Diese wurden erstmals im Jahr 1965 von M. Birnbaum auf einer kristallinen Germanium-Oberfläche entdeckt, welche mit einem Rubinlaser bestrahlt wurde [46]. Das Auftreten für diese wellenartigen Muster wurde seither durch unterschiedliche Erklärungsmodelle begründet. Eines dieser Modelle besagt, dass der einwirkende Laserimpuls eine Reaktion auslöst, die zu einer Selbstorganisation führt. Die Oberfläche wird angeregt und geht in einem energetischen Übergangszustand über, welcher anschließend im günstigsten Zustand der LIPSS zerfällt [47]. Die Periodizität, die Ausrichtung und die Amplituden der Wellen sind von Laser (Wellenlänge, Polarisation des Laserstrahles, Brennweite der Fokussierlinse) und Material (Materialart, Oberflächenbeschaffenheit) bezogen Parametern abhängig [47]. LIPSS (auch Ripples genannt) werden

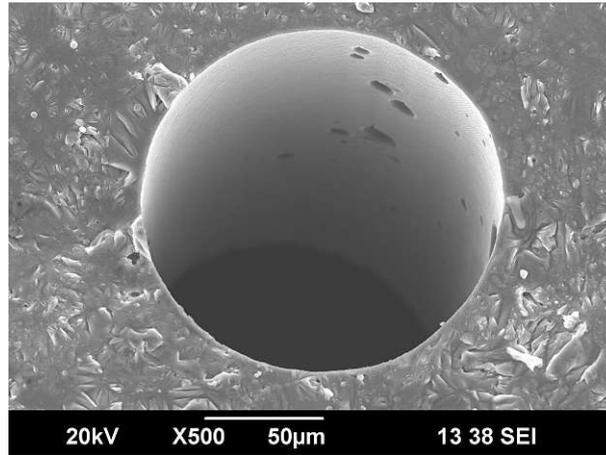


Abbildung 2.12: Die Abbildung zeigt eine von der Firma LightPuls LASER PRECISION durchgeführte Bohrung auf eine additiv hergestellte Probe aus AlSi10Mg mit einem UKP Laser [45].

in der Literatur grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt. Ist die Ortsperiode der strukturierten Oberfläche annähernd jener der eintreffenden Laserstrahlung, so werden diese LSFL (Low Spatial Frequency LIPSS) genannt. Die Orientierung dieser Ripples ist von der Polarisation der eintreffenden Strahlung und der Absorptionsfähigkeit des Materials abhängig [48]. Die zweite Kategorie wird HSFL (High Spatial Frequency LIPSS) genannt und weist eine signifikant kleinere Periodenlänge als die einfallende Laserstrahlung auf. Die Ausrichtung ist material- und polarisationsabhängig und kann entweder senkrecht oder parallel zur Polarisation der Strahlung sein [49].

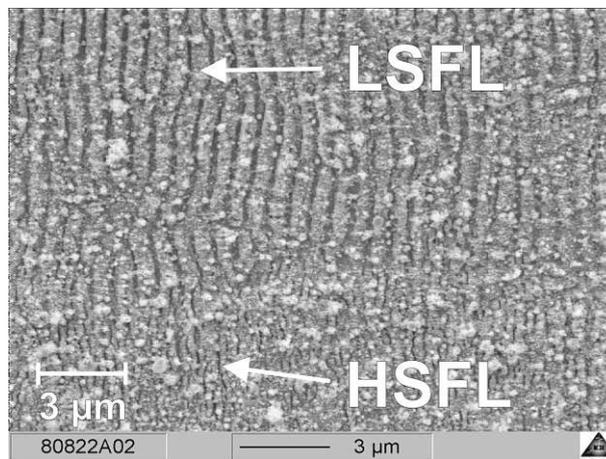


Abbildung 2.13: LSFL im zentralen Bereich und HSFL im unteren Bereich (Material: ZnO, Femtosekunden Laser) [50].

Die Eigenschaften der LIPSS gewinnen zunehmend an praktischer Bedeutung. In diesem

Abschnitt soll ein Überblick der Oberflächenfunktionalisierung durch LIPSS gegeben werden:

- **Strukturfarben:** Durch die wellenartige Oberfläche der LIPSS lassen sich Oberflächen ohne Einsatz von Fremdstoffen einfärben. An der nanostrukturierten Oberfläche bildet sich ein Beugungsgitter, an dem das einfallende Licht abhängig von der Periodizität der LIPSS und des Einfallwinkels unterschiedliche Wellenlängen reflektiert. Dabei kann unter geeigneten Beleuchtungsbedingungen ein Farbeffekt hervorgerufen werden. Dieser Effekt kann zur starken Absorption oder zur Verringerung der Reflexion des eintreffenden Lichtes verwendet werden [51].
- **Tribologie:** Die Modifikation der Reibungseigenschaften von Festkörpern ist für die Industrie von hoher Bedeutung. Durch die erhöhte Rauigkeit im Mikrobereich der LIPSS kann die Haft- und Gleitreibung signifikant reduziert werden. Mittels "oszillierender Gleitreibung" konnte in einer Studie eine Reduktion der Reibungskoeffizienten an der LIPSS gegenüber einer Referenzoberfläche erzielt werden [52].
- **Zellwachstum:** In der Biomedizin wird an Nanostrukturen geforscht, welche das Zellwachstum fördern [51].
- **Hydrophobie:** Die Benetzungseigenschaften einer Oberfläche lassen sich mit LIPSS gezielt manipulieren. Die Forschungen rund um UKP Laser beschäftigt sich bereits seit Jahren mit der Herstellung von superhydrophoben Oberflächen. Bereits im Jahr 2009 wurde eine kontrollierte Methode, für die Herstellung von superhydrophoben LIPSS auf Edelstahl präsentiert [53]. In der Studie wurden mittels fs-Laserpulsen hergestellte Oberflächen durch Messung des Kontaktwinkels<sup>2</sup> (Abbildung 2.14) auf die Benetzbarkeit untersucht. Als Referenzprobe wurde eine polierte und nicht strukturierte Oberfläche verwendet, welche einen Kontaktwinkel von rund 100° hatte. Die getesteten nanostrukturierten und periodischen Oberflächen, wiesen alle einen Kontaktwinkel von mehr als 150° auf. Es konnte zudem ein Anstieg des Kontaktwinkels in Abhängigkeit der Laserstrahl Intensität (Laser fluence  $J/(cm)^2$ ) festgestellt werden.

## 2.7 Hydrophobe Eigenschaften von strukturierten Oberflächen

### 2.7.1 Benetzungseigenschaften

Die Benetzungseigenschaft einer Oberfläche beschreibt das Verhalten einer Flüssigkeit, wenn sie in Kontakt mit einem Festkörper kommt. Breitet sich die Flüssigkeit aus, überwiegen die Adhäsionskräfte gegenüber den Kohäsionskräften. Überwiegen hingegen die Kohäsionskräfte, dann hat die Oberfläche eine abweisende Wirkung gegenüber der Flüssigkeit. Oberflächen, die eine abweisende Wirkung gegenüber Wasser aufweisen, werden

---

<sup>2</sup>Der Kontaktwinkel ist ein Maß für die Benetzbarkeit einer Oberfläche. Er ergibt sich aus der Form, die ein Tropfen auf einer Oberfläche annimmt. Der Kontaktwinkel wird am Dreiphasenpunkt zwischen Grenzfläche fest / gasförmig und der Tangente der Grenzfläche flüssig / gasförmig gemessen.

als hydrophob bezeichnet. Für viele Anwendungen ist die gezielte Herstellung einer wasserabweisenden Oberfläche von großer Bedeutung. Vorbild für die Herstellung hydrophober Oberflächen ist der wasserabweisende und selbstreinigende Effekt der Lotuspflanze. Der nach ihr benannte Lotus-Effekt sorgt dafür, dass Wasser auf den Blättern abprallt und dabei Schmutzpartikel aufsammelt und abtransportiert. Bei der Lotuspflanze beruht dieser Effekt im Wesentlichen auf der Minimierung der Kontaktfläche zwischen fester und flüssiger Oberfläche. Auf der Oberfläche der Pflanze befindet sich eine zweilagige hydrophobe Hautschicht namens Cuticula. Diese hat eine noppenartige Oberflächenstruktur im Mikrometerbereich, auf welcher sich wiederum eine zweite Struktur aus Wachskristallen im Nanometerbereich befindet [54] [55]. Diese Strukturierung der Oberfläche verringert die Kontaktfläche dermaßen, dass die Adhäsionskräfte nicht ausreichen, um die Blattoberfläche zu benetzen. Das Wasser nimmt stattdessen aufgrund der Oberflächenspannung eine kugelförmige Gestalt an und vergrößert damit den Kontaktwinkel.

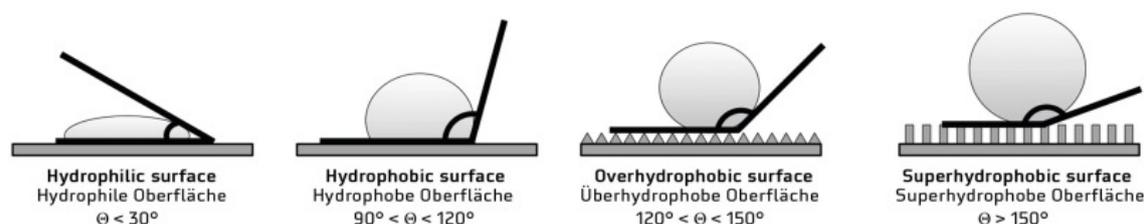


Abbildung 2.14: Kontaktwinkel bei unterschiedliche Benetzungsverhalten [56].

Ist der Kontaktwinkel kleiner als  $30^\circ$ , so wird die Fläche als hydrophil bezeichnet. Oberflächen mit einem Kontaktwinkel größer als  $90^\circ$  werden als hydrophob bezeichnet. Von superhydrophoben (SHO) Oberflächen spricht man, wenn der Kontaktwinkel größer als  $150^\circ$  ist. Ein weiteres Maß für die Hydrophobie ist der Abrollwinkel von Wassertropfen auf einer geneigten Oberfläche. Wassertropfen bilden auf SHO Oberflächen, eine nahezu sphärische Form und fließen bereits bei Neigungen von unter  $10^\circ$  ohne Rückstände ab. Die außerordentlichen antiadhäsiven Eigenschaften von SHO Oberflächen bieten viele Möglichkeiten in der Technik. Ähnlich wie das Lotusblatt sind Photovoltaikanlagen dazu ausgelegt, möglichst viel Sonneneinstrahlung aufzunehmen. Durch hydrophobe Beschichtung der Glasoberfläche lässt sich damit die Effizienz der Anlagen erhöhen. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind Scheiben an Brillen, Smartphones oder Fahrzeugen aber auch Fassaden oder funktionelle Bekleidung.

### 2.7.2 Vereisungseigenschaften von strukturierten hydrophoben Oberflächen

Die Herstellung von Anti-Icing und De-Icing Oberflächen liegt im Interesse vieler Industriezweige, weshalb die Forschung in diesem Gebiet auch stark vorangetrieben wird. Wie bereits im Kapitel 2.5.5 erwähnt wurde, kann die Herangehensweise die Oberfläche vor Vereisung zu schützen in zwei strategischen Prinzipien unterschieden werden: Antifreeze und Eisphobie. Ersteres verzögert das Anfrieren der Flüssigkeit und zweiteres verringert die Adhäsionskräfte der angefrorenen Teilchen. Ein erster Ansatz legt nahe, dass hy-

drophobe oder superhydrophobe Oberflächen auch eine abweisende Wirkung gegenüber Eis besitzen. Meuler et al. haben hydrophobe Oberflächen mit geringer Oberflächenenergie auf einen Zusammenhang mit der Eis Adhäsion untersucht. Dabei wurde die Scherfestigkeit von Eis auf den mit Polymer POSS<sup>3</sup> beschichteten Oberfläche gemessen und auf einen Zusammenhang mit hydrophoben Parametern untersucht. Anders als bei strukturierten Oberflächen handelt es sich hierbei um eine sehr glatte Oberfläche. Ein Großteil dieser Beschichtungen konnten die Scherkräfte gegenüber der blanken Stahloberfläche verringern. Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen den Kontaktwinkel und den Scherkräften der besagte Oberflächenbeschichtung gefunden werden [57].

Superhydrophobe strukturierte Oberflächen haben im Kontaktbereich zwischen Wasser und der Oberfläche Luftpolster eingeschlossen. Die Töpfchen liegen auf Spitzen, Kuppen oder ähnlichen Strukturen auf, daher wird dies in der Literatur auch als "Fakir"<sup>4</sup> Zustand bezeichnet. Das Minimieren der Kontaktfläche zwischen Wasser und fester Oberflächen, bewirkt eine Verringerung der Adhäsionskräfte, wodurch die Tröpfchen mit sehr geringem Widerstand an der Oberfläche entlang gleiten können. Die Luftschicht könnte ähnlich wie beim Leidenfrost-Effekt<sup>5</sup> eine thermische Barriere zwischen fester und flüssiger Oberfläche erzeugen. Die isolierende Wirkung ist dabei abhängig von der Höhe der Luftschicht, welche bei SHO von der Höhe bzw. Tiefe der Strukturierung resultiert. Untersuchungen der Kontaktfläche zwischen Wassertröpfchen und fester Oberfläche ergaben, dass der Flächenanteil zwischen Wasser und Luft deutlich höher (um den Faktor 10-100) ist, als jener zwischen Wasser und fester Oberfläche [58] [59], wodurch die Annahme der isolierenden Luftschicht unterstützt wird. Treffen nun Tröpfchen auf einer unterkühlten Oberfläche auf, so könnte die Luftschicht das Einfrieren der Tröpfchen verzögern. Quéré et al. konnten durch eine Simulation von abfließenden Regentröpfchen auf einer SHO zeigen, dass durch die thermische Barriere eine verzögerte Vereisung der abfließenden Regentröpfchen erzielt werden konnte, wodurch die Ansammlung von Eis verhindern wurde [60]. Diese dokumentierten antifreeze-Eigenschaften der SHO beruhen aber auf der Grundlage, dass die Vereisung aufgrund der Wärmeübertragung zwischen fester und flüssiger Oberfläche stattfindet. Trifft ein unterkühltes Tröpfchen auf eine Oberfläche, wird die Kristallisation durch den Kontakt mit der Oberfläche ausgelöst. Die Luftpolster zwischen Oberfläche und Tröpfchen könnten die Grundlage eines weiteren dynamischen Effektes der SHO sein. Trifft ein Wassertröpfchen bei Raumtemperatur auf eine SHO auf, so verhält es sich ähnlich, wie eine Spiralfeder, die auf eine Oberfläche auftrifft und wieder abspringt. Die Umwandlung von kinetischer in potenzielle Energie geschieht, indem das Wassertröpfchen sich zunächst auf der Oberfläche ausbreitet, aber durch die Kohäsionskraft sich nicht auftrennt. In weiterer Folge, baut das Tröpfchen

<sup>3</sup>POSS (Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane) ist eine nanostrukturierte Chemikalie, die eine Verbindung zwischen chemischen und organischen Materialien herstellt und unter bestimmten Zusammensetzungen hydrophob sein kann.

<sup>4</sup>Fakir wurde in Europa durch das Fakirbett bekannt. Dieses besteht aus einer mit Zimmermannsnägel gepflasterten Liegefläche.

<sup>5</sup>Ein Wassertröpfchen auf einer heißen Oberfläche mit einer Temperatur oberhalb der Siedetemperatur, erzeugt im Kontaktbereich eine Dampfschicht die eine isolierende Wirkung hat. Das Tröpfchen liegt auf einem Dampfpolster auf, welcher den Wärmefluss wesentlich reduziert. Wurde 1756 von Johann Gottlob Leidenfrost entdeckt.

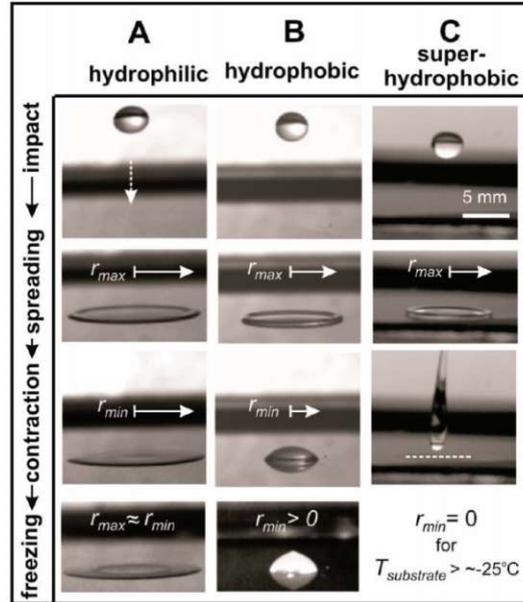


Abbildung 2.15: Wassertröpfchen trifft auf eine unterkühlte Oberfläche [61].

wieder kinetische Energie auf, in dem es sich wieder zusammenzieht und von der Oberfläche abspringt [62]. Dieses Verhalten ist in Abbildung 2.15 in der Spalte C dargestellt. Mishchenko et al. haben das dynamisch Verhalten eines unterkühlten Wassertröpfchens beim Aufprall auf eine nano- und mikrostrukturierte Oberfläche untersucht. Dabei wurde der Mechanismus beim Einfrieren auf SHO Oberflächen mit variierenden Temperaturen untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die unterkühlten Tröpfchen, unter bestimmten Versuchsparametern erst kristallisieren, sobald sie von der Oberfläche wieder abspringen [61]. Der Mechanismus ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Tröpfchen mit einem Volumen von rund  $10 \mu\text{l}$  unter den gegebenen Bedingungen an der hydrophilen und der hydrophoben Oberflächen festfrieren, aber an der SHO nicht. Die Versuchsreihe konnte aufzeigen, dass unterkühlte Tröpfchen  $T_{\text{Tropfen}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  oberhalb einer Oberflächentemperatur von rund  $T_{\text{Substrat}} = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ , durch den Aufprallmechanismus nicht anhafteten. Bei tieferen Oberflächentemperaturen sind die Tröpfchen an der Oberfläche gefroren, wiesen aber vergleichsweise geringe Adhäsionskräfte auf [61]. Quéré et al. haben die Physik hinter dem Aufprallmechanismus genauer untersucht und sind dabei zu folgender Aussage gekommen: Ein Tropfen springt von einer SHO nach dem Aufprall wieder ab, wenn die kinetische Energie ( $\rho R^3 V^2$ ) vor dem Aufprall größer ist als die gespeicherte Oberflächenenergie  $\sigma R^2 \Delta \cos(\Theta)$  (mit R Tropfenradius, V Geschwindigkeit vor dem Aufprall,  $\rho$  Dichte,  $\sigma$  Oberflächenspannung,  $\Theta$  mittlerer Kontaktwinkel) [63]. Demzufolge müssen die Tröpfchen einen vom Tropfenradius abhängigen Geschwindigkeitswert vor dem Aufprall überschreiten, um den gewünschten antifreeze Effekt zu erreichen. Zudem ist der Kontaktwinkel der SHO ein entscheidender Parameter in der Gleichung. Weitere Versuche der besagten Studie haben gezeigt, dass bei einer

Geschwindigkeit des Tropfens von  $V = 1 \text{ m/s}$  ein Tropfenradius von  $100 \text{ }\mu\text{m}$  notwendig ist, um ein elastisches wieder Abspringen zu ermöglichen [63].

Die hydrophoben Eigenschaften der nanostrukturierten Oberfläche sind wesentlich von den Luftkissen zwischen Wassertropfen und fester Oberflächen abhängig. Werden diese Luftkissen mit Wasser befüllt, so tritt die Benetzung der Oberfläche ein. Allgemein wird vom Wenzel-Modell bei nicht benetzter Oberfläche und Cassie-Baxter-Modell bei benetzter Oberfläche gesprochen (Abbildung 2.16). In der Literatur wird der dynamische Vorgang, der bei der Benetzung durch ein eintreffendes Tröpfchen geschieht, durch ein Gleichgewichtsmodell beschrieben. Trifft ein Tröpfchen auf die Oberfläche auf, so entsteht der Druck  $P_d = 0.5\rho V^2$  (mit  $\rho$  Dicht Wassertropfen,  $V$  Geschwindigkeit vor dem Auftreffen) auf der Oberfläche bzw. auf die Luftpolster der von der kinetischen Energie des eintreffenden Tröpfchens abhängig ist. Zudem begünstigt der Wasserdruckstoß (water hammer)  $P_{WH} = k_{WH}\rho CV$  (mit  $C$  Schallgeschwindigkeit Wasser und  $k_{WH}$  den water hammer Koeffizient) den Druck auf der Oberfläche und somit die Benetzung. Das Gegengewicht in dem besagten Modell bildet der Kapillardruck  $P_C = -((4\phi)/(a_0(1-\phi))\gamma\cos(\theta_A))$  (mit  $\phi$  Feststoffanteil pro Flächeneinheit siehe [64] und  $a_0$  der Durchmesser der Mikrosäulen,  $\gamma$  die Oberflächenspannung) der aus der nagelbrettartigen Oberfläche resultiert. Benetzung tritt ein, wenn der Kapillardruck durch den Druck des eintreffenden Tröpfchens überwunden wird [64] [65]. Der Aufprall der Tröpfchen kann durch die dimensionslose Weber-Zahl charakterisiert werden. Die Weber-Zahl ist wie folgt definiert:

$$We_e = \rho V^2 D_0 / \gamma \quad (2.1)$$

wobei  $D_0$  der Tröpfchendurchmesser ist. Poulikakos et al. konnten bei der untersuchten Oberfläche feststellen, dass in einem Bereich von  $We_e \approx 100$ , der Übergang vom abprallenden Tropfen zum Benetzen der Oberfläche stattfand. Dabei wird nicht die gesamte Aufprallfläche benetzt, sondern nur ein partieller, meist ringförmiger, Teil. Mit steigender We-Zahl steigt auch der Anteil der nach Wenzel-Modell benetzten Oberfläche [64]. Wie hoch die kritische Weber-Zahl  $We_e$  liegt, ist abhängig von der Oberflächenstrukturierung. Hierarchische SHO konnten einen höheren  $We_e$ -Wert erreichen als mikro- oder nanostrukturierte SHO. Das beste Ergebnis erzielte eine hierarchische Struktur, welche ein Abprallen der Tropfen bei einer Weber-Zahl von  $We = 227$  erreichte [64].

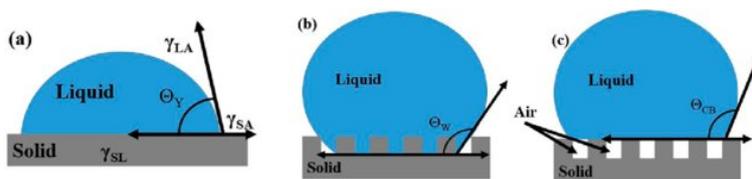


Abbildung 2.16: Benetzungsverhalten: (a) Young's Modell, (b) Wenzel Modell und (c) Cassie-Baxter Modell. [66]

Durch die Literaturrecherche konnte aufgezeigt werden, dass SHO antifreeze und eisphobe Eigenschaften haben können. Die Untersuchung des dynamischen Aufprallverhaltens

## 2 Grundlagen

in unterkühlten Bedingungen konnte aufzeigen, dass es einen Bereich gibt, indem Tröpfchen auf SHO abprallen und nicht anfrieren. Dabei darf die kinetische Energie vor dem Aufprall nicht zu gering sein, damit genügend Energie für das wieder abspringen vorhanden ist, aber auch nicht zu hoch, damit keine Benetzung der Oberfläche aufgrund des erhöhten Druckes eintritt. Gelingt es, das Fenster für die antifreeze Eigenschaften durch verbesserte SHO Oberflächen zu vergrößern oder für spezifische Bedingungen anzupassen, wäre eine Untersuchung im Zusammenhang mit der Vereisung von WKA von Interesse.

Das dynamische Aufprallverhalten von Tröpfchen auf Rotorblätter führt gegenüber den Laborbedingungen zu einigen zusätzlichen Parametern. Die Relativgeschwindigkeit des Rotorblattes gegenüber dem Tropfen sorgt zwar für eine hohe Aufprallgeschwindigkeit, beeinflusst aber das dynamische Verhalten beim Wiederabspringen. Das Rotorblatt folgt dem Tröpfchen und es könnte zu einem weiteren Kontakt kommen. Zudem leistet der Wind dem Tropfen einen Widerstand beim Wiederabspringen, womit dem zuvor beschriebenen dynamischen Prozess ein zusätzlicher Störfaktor eingeleitet wird. Wie die Vereisung der SHO in einer Regensimulation bzw. Eisregen verhält, lässt sich nur schwer von Verhalten einzelner Tröpfchen unter idealisierten Laborbedingungen ableiten.

## 3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der Entstehungsprozess des Versuchsaufbaus von der Ideenfindung bis hin zum fertigen Prüfstand beschrieben. Die dabei entstandenen Aufgabenstellungen und deren Lösungen wurden nachvollziehbar dokumentiert.

### 3.1 Planung

#### 3.1.1 Aufgabenstellung

In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellungen und die Anforderungen an dem Versuchsaufbau definiert. Diese bilden die Grundlage für die Konzeptausarbeitung und den Entwurf.

Der Versuchsaufbau soll die meteorologischen Bedingungen, welche zur Vereisung von WKA führen, möglichst realitätsnahe und reproduzierbar nachbilden können. Untersucht werden dabei quadratische Proben (50 mm x 50 mm x 2 mm) aus Stahl mit laserstrukturierten Oberflächen. Die Probe sollte Strömungsverhältnissen ausgesetzt sein, welche den Bedingungen an der Vorderkante der Rotorblätter nahekommen. Die Temperatur, die Windgeschwindigkeit, der Anströmungswinkel auf die Probenoberfläche, sind dabei wichtige und variable Versuchsparameter. Die Vereisung der Probe soll durch unterkühlte Wassertröpfchen in einer realitätsnahen Größe und Verteilung gezielt und möglichst reproduzierbar eingeleitet werden können. Kern der Untersuchungen werden die Anti-Icing Eigenschaften der strukturierten Oberfläche sein. Der Vereisungsprozess der Probe soll dabei gut ersichtlich sein und mit Foto- und Videoaufnahmen festgehalten werden können. Es sollen die Voraussetzungen für die Bewertung des Vereisungszustands durch quantifizierbare Methoden geschaffen werden.

#### 3.1.2 Ableitung der Anforderungen

##### Ermittlung der Strömungsverhältnisse an der Rotorblattvorderkante

Die Anströmungsgeschwindigkeit wird nach der Vorlage aus dem Artikel „Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen“ von Henry Seifert berechnet [20]. Die Anströmungsgeschwindigkeit  $v_A$  an der Vorderkante der Rotorblätter setzt sich aus der Geschwindigkeit vom Wind  $v_W$  und aus der Geschwindigkeit des Rotorblattes am Bezugspunkt  $v_{RB}$  zusammen.

Die Windgeschwindigkeit  $v_W$  wird zur Vereinfachung als waagrecht angenommen:

$$\vec{v}_W \approx \vec{v}_{WH}$$

### 3 Versuchsaufbau

Die Geschwindigkeit des Rotorblattes am Bezugspunkt ist abhängig von der Winkelgeschwindigkeit des Rotors  $\omega_R$  und vom örtlichen Radius  $R_B$ :

$$\vec{v}_{RB} = \vec{\omega}_R \times \vec{R}_B$$

Mit den getroffenen Annahmen ergibt sich die Anströmungsgeschwindigkeit  $v_A$  zu:

$$\vec{v}_A = \vec{v}_W + \vec{v}_{RB} = \vec{v}_{WH} + \vec{\omega}_R \times \vec{R}_B \quad (3.1)$$

Als Anhaltspunkt wird die Anströmungsgeschwindigkeit an einer Enercon E-115 3.000 WKA berechnet. Die verwendeten Kennwerte entsprechen dem Nennbetrieb und sind dem Herstellerdatenblatt entnommen [67]. Das Datenblatt gibt eine Nennwindgeschwindigkeit von  $11.5 \frac{m}{s}$  und einen Rotorblattdurchmesser von  $115.7 m$  an. Die Anströmungsgeschwindigkeit wird an drei Punkten berechnet. Die Drehzahl liegt im Bereich von  $4 - 12.8 \frac{U}{min}$ . Für die Berechnung wird ein Wert nahe dem Mittelwert verwendet ( $\approx 8 \frac{U}{min}$ ). Damit ergeben sich folgende Eingabewerte:

Windgeschwindigkeit:	$v_{WH_{E115}} = 11.5 \frac{m}{s}$
Blattwurzel:	$R_{B1} = 7 m$
Blattmitte:	$R_{B2} = 30 m$
Blattspitze:	$R_{B3} = 57.5 m$
Winkelgeschwindigkeit:	$\omega_{R_{E115}} = 8 \frac{U}{min} \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} = 0.837 \frac{rad}{s}$

Der Betrag der Anströmungsgeschwindigkeit wird nach der Formel 3.1 berechnet und ergibt sich zu:

$$|\vec{v}_{A_{R115}}| = \sqrt{v_W^2 + v_{RB}^2} = \sqrt{v_{WH}^2 + (\omega_{R_{E115}} \cdot \vec{R}_B)^2} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} |\vec{v}_{A_{R115|B3}}| &= \sqrt{(11.5 \frac{m}{s})^2 + (0.837 \frac{rad}{s} \cdot 57.5 m)^2} = 49.48 \frac{m}{s} \\ |\vec{v}_{A_{R115|B2}}| &= \dots = 27.6 \frac{m}{s} \\ |\vec{v}_{A_{R115|B1}}| &= \dots = 12.9 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse zeigen, dass unter normalen Betriebsbedingungen bei einer Enercon E-115 entlang der Vorderkante Anströmungsgeschwindigkeiten von  $10 \frac{m}{s}$  bis  $50 \frac{m}{s}$  herrschen. Aus dem Kapitel 2.5.1 ist bekannt, dass die Vereisung mit zunehmenden Blattradius und der damit einhergehenden Erhöhung der Anströmungsgeschwindigkeit zunimmt. Für die Dimensionierung des Versuchsaufbaus wird die Anströmungsgeschwindigkeit an der Blattspitze als Richtwert angestrebt. Es wird daher als Anforderung der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal  $50 \frac{m}{s}$  festgelegt.

#### Ermittlung der Temperaturen für die Bildung von Klareis und Raureif

Für die Bildung von Klareis ist eine nasse Vereisung Voraussetzung und diese kann bei Niederschlag und bei In-Cloud Icing zustande kommen. Gemäß der Tabelle 2.3 findet

bei Niederschlag die Bildung von Klareis bei Temperaturen von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  statt. Beim In-Cloud Icing sind die entstehenden Eistypen stark von der Windgeschwindigkeit abhängig. Die Bildung von Raureif erfordert eine trockene Vereisung. Diese wird durch tiefe Temperaturen und geringer Wasserzufuhr erreicht. Dem Diagramm der Abbildung 2.2 kann entnommen werden, dass bei hoher Windgeschwindigkeit die Bildung von Klareis gefördert wird und bei geringer die Bildung von Raureif, wobei auch eine Abhängigkeit zur Temperatur gegeben ist. In-Cloud Icing bei WKA führt häufig zur Bildung von Raureif. Bei Niederschlag kommt es zur Bildung von Raureif, wenn die Niederschlagselemente vor dem Auftreffen frieren (Eisregen).

Das Aufprallverhalten kann mit großen Wassertröpfchen aufgrund der besseren Sichtbarkeit bei Video- und Fotoaufnahmen besser dargestellt und analysiert werden. Es wird daher angestrebt, die Parameter für die Vereisung bei Niederschlag nachzubilden.

Zur Herstellung von unterkühltem Niederschlag ist gemäß Tabelle 2.3 eine Umgebungstemperatur im Bereich von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  notwendig. Angelehnt an diesen Temperaturbereich wird im Versuchsaufbau als Anforderung eine Temperatur von mindestens  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  definiert.

Eine weitere Maßnahme, mit der die Vereisung gefördert werden kann, ist eine lokale Kühlung der Probe.

#### **Größe und Verteilung der Wassertröpfchen**

Gemäß der Tabelle 2.2 kann Niederschlag einen Tröpfchendurchmesser von  $0.4\text{ mm}$  bis  $5\text{ mm}$  haben. Kondensierte Tröpfchen in Wolken liegen im Bereich von  $0.02\text{ mm}$  bis  $0.1\text{ mm}$ . Kennwerte für die Größe und Masse der Tröpfchen sind der MVD und der LWC welche in Kapitel 2.5.2 beschreiben wurden.

#### **Unterkühlung der Wassertröpfchen**

Ziel ist es, unterkühlte Tröpfchen herzustellen, welche auf die Probe auftreffen und dabei schlagartig vereisen. Die Unterkühlung von Wasser ist möglich, wenn keine Eiskeime zur Verfügung stehen, daher wird destilliertes Wasser verwendet. Eine möglichst lange Flugphase und eine möglichst hohe Temperaturdifferenz zwischen Tröpfchen und Umgebung fördern die Unterkühlung. Ein weiterer Parameter der die Unterkühlung beeinflusst ist die Tröpfchengröße. Mit steigender Masse, steigt auch der Wärmefluss, der vom Tröpfchen an die Umgebung abgegeben werden muss, um die Temperatur der Wassertröpfchen unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu senken. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen, könnte eine Einspritzung, welche eine variable Tröpfchengröße erzeugen kann, von Vorteil sein.

### **3.2 Konzept**

Die Ideenfindungsphase führte zu einem Klima-Windkanal im Labormaßstab, dessen Konzept im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

### 3 Versuchsaufbau

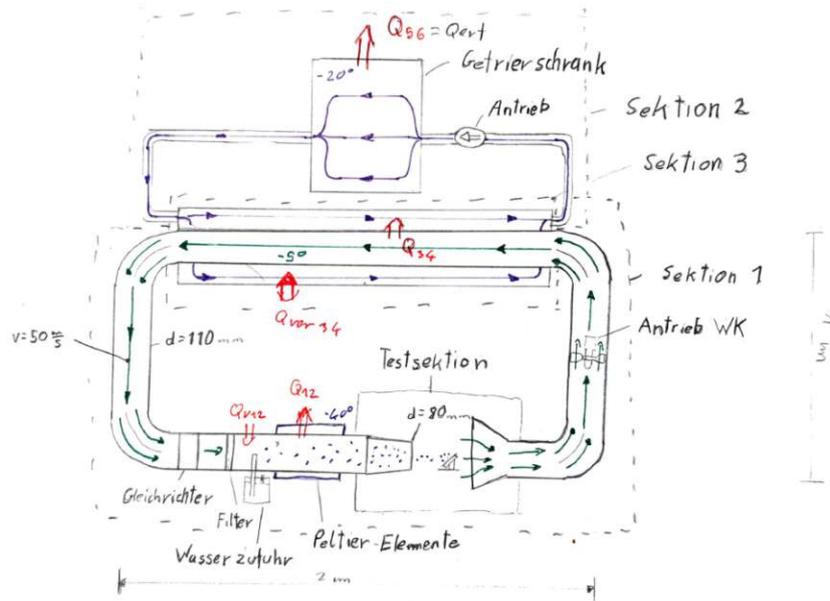


Abbildung 3.1: Grafische Darstellung der ersten Konzeptausarbeitung des Klima-Windkanals.

#### 3.2.1 Kanalführung

Aus thermischen und kinematischen Gründen ist es von Vorteil einen Kreislauf zu erzeugen. Dieser wird horizontal geführt und hat eine rechteckige Form. Er besteht aus vier geraden Abschnitten und vier rechtwinkligen Bögen. Die Probe befindet sich in einer quaderförmigen Testsektion, welche die runde Kanalisierung unterbricht.

#### 3.2.2 Kühlung

Die Kühlung des Klima-Windkanals erfolgt durch eine Wärmepumpe in Form eines mit Kompressor betriebenen Gefrierschranks. Die Kühlleistung des Gefrierschranks wird dem Windkanal durch einen Wärmetauscher (WT) zugeführt. Dafür wird ein zweiter Kreislauf erzeugt, der in weiterer Folge Kühlkanal (KK) genannt wird. Dieser wird durch den Gefrierschrank (GS) geleitet und mit dem Wärmetauscher verbunden. Der Wärmetauscher wird durch die Umhüllung des Windkanals (über einen Teilabschnitt) mit dem Kühlkanal erzeugt. Es entsteht ein Ringspalt, durch welchen die gekühlte Luft aus dem Gefrierschrank geleitet wird und damit dem Windkanal die Wärme entzieht. Die gesamte Außenhülle des Klima-Windkanal wird von der Umgebung thermisch isoliert.

#### 3.2.3 Probenhalterung

Die Probenhalterung wird zentral in der Testsektion auf Höhe der Strömungslinie positioniert. Die Höhe und der Anströmungswinkel der Proben können dabei durch eine herstellbaren Halterung variiert werden. In dieser Halterung ist ein Kühlelement verbaut, welches die Probe lokal kühlen kann. Die Probe ist in der Probenhalterung so befestigt, dass sie bei der Versuchsdurchführung einfach entnommen werden kann,

#### 3.2.4 Einspritzung

Die Erzeugung unterkühlter Wassertröpfchen, ist aufgrund der kurzen Flugphase bis zum Auftreffen auf die Probe, eine Herausforderung. Die Einspritzung wird so konstruiert, dass die Unterkühlung der Tröpfchen möglichst gefördert wird. Bevor das destillierte Wasser in den Windkanal eingeführt wird, wird es möglichst nahe an  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Die Tröpfchenerzeugung wird mit einer Ein- oder Zwei-Stoff Zerstäubungsdüse ermöglicht, welche im Windkanal so positioniert wird, dass eine möglichst lange Flugphase der Tröpfchen bis zum Auftreffen auf die Probe entsteht. Die Zweistoff-Düse kann gegenüber der Einstoff-Düse kleinere Tröpfchen erzeugen, welche aufgrund der geringeren Masse schneller unterkühlen.

#### 3.2.5 Steuerung und Datenaufnahme

Ein wichtiger Bestandteil einer experimentellen Untersuchung ist die Reproduzierbarkeit der Versuchsparameter. Die wesentlichen Parameter für den Klima-Windkanal sind die Temperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und die Einspritzung. Mit einer zentralen Steuereinheit können Messdaten aufgenommen werden und Komponenten wie das Kühlsystem, der Antrieb im Windkanal und das elektromagnetische Ventil der Einspritzung angesteuert werden. Die Steuereinheit wird aus einem Arduino MEGA<sup>1</sup> sowie aus verschiedenen elektrotechnischen Bauelementen aufgebaut. Die Interaktion wird über mehrere Eingabelemente sowie mit einem Ausgabeelement in Form eines Displays ermöglicht.

### 3.3 Entwurf

In diesem Abschnitt wird die Ausarbeitung des Konzeptes zum Entwurf beschrieben. Dafür wurde ein 3D-CAD Modell erstellt, aus welchem geeignete Komponenten und technische Zeichnungen abgeleitet werden konnten. Mit Hilfe einer thermischen Berechnung konnten die wichtigsten thermischen Parameter abgeschätzt werden.

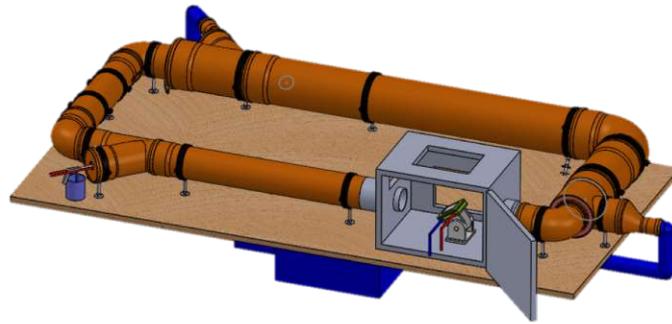


Abbildung 3.2: 3D-CAD Modell Klima-Windkanal-Vorderansicht von oben.

### 3.3.1 Erstellung eines 3D-Modells

Die Modellierung erfolgte mittels dem 3D-CAD Programm SolidWorks. Der Windkanal wird auf einer Grundplatte aus Holz mit den Abmessungen 2.2 m x 1.25 m aufgebaut. Die Kanalisierung des Windkanals erfolgt mit Kanalgrundrohren mit einem Außendurchmesser von 110 mm und einer Wandstärke von 3.2 mm. Für den Kreislauf werden vier Bögen mit  $87.5^\circ$ , vier gerade Rohre sowie ein Rohr mit Einfachabzweigung benötigt. Diese werden mittels Rohrschellen an die Grundplatte befestigt. Der Ringspalt für den Wärmetauscher wird durch die Umhüllung der DN 110 mm mit DN 160 mm Kanalrohren realisiert. Die Umhüllung zieht sich über einen Bogen und zwei gerade Abschnitte des Windkanals. Für den Wärmetauscher wird ein Bogen mit  $87.5^\circ$ , zwei gerade Rohre und zwei Einfachabzweigungen benötigt. Die Befestigung der DN 110 mm Rohre in den DN 160 mm Rohren erfolgt durch Kreisringe aus Styropor. Damit die Luft weiterhin durch den Ringspalt fließen kann, werden diese Kreisringe mit Bohrungen versehen. Der Aus- und Eingang zum WT wird mittels Einfachabzweigungen realisiert. Der Luftfluss vom Gefrierschrank zum WT wird durch DN 50 mm Kanalgrundrohre und mit entsprechenden Reduzierungen ermöglicht. Die Durchströmung des Gefrierschranks erfolgt durch den Eingang seitlich unten und den Ausgang gegenüberliegend oben.

Die quaderförmige Testsektion mit den Abmessungen 40 cm x 40 cm x 60 cm wird aus 1 cm starken Siebdruckplatten aufgebaut. Die Kanalführung wird vor dem Eintritt in die Testsektion auf einen Durchmesser von 75 mm reduziert, womit die Strömungsgeschwindigkeit erhöht wird. Am Ausgang der Testsektion wird die verwirbelte Luft durch ein 125 mm Rohr wieder gebündelt. An der Vorderseite der Testsektion wird eine Öffnungsmöglichkeit für die Probenentnahme eingebaut und die Testsektion wird mit zumindest

<sup>1</sup>Arduino ist eine aus Soft- und Hardware bestehende Physical-Computing-Plattform. Die Hardware besteht aus einem einfachen E/A-Board mit einem Mikrocontroller und analogen und digitalen Ein- und Ausgängen. Die Entwicklungsumgebung basiert auf Processing. Die Programmierung selbst erfolgt in einer C- bzw. C++-ähnlichen Programmiersprache.

### 3 Versuchsaufbau

zwei Fensteröffnungen für Video- und Fotoaufnahmen versehen. Die Probenhalterung wird über ein Gelenk und ein Streben-Profil (BOSCH Rexroth) so gelagert, dass die Höhe und der Anströmungswinkel verstellt werden können. Die Kühlung der Probe erfolgt über ein Peltier-Element das einseitig von einem Wärmetauscher gekühlt wird. Der Wärmetauscher besteht aus einer Aluminium-Platte, welche über diverse Bohrungen und einer Zu- und Abfuhr an ein Wasserkühlaggregat angeschlossen wird. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten am Peltier-Element ist abhängig von dem geometrischen Aufbau des Elements und vom zugeführten elektrischen Strom, kann aber einen hohen zweistelligen Kelvin Bereich erreichen. Die kalte Seite des Peltier-Elementes führt über eine Aluminiumplatte mit Ausfräsung zu einem Kupferblock (Probenaufsatz) an welchem die Probe mittels doppelseitigem Klebeband befestigt wird. Die Probe und der Probenaufsatz können als Ganzes einfach von der restlichen Probenhalterung entfernt werden. Unter Berücksichtigung des gesamten thermischen Systems im Windkanal, ist es wichtig, die warme Seite des Peltier-Elementes gegen die Umgebung in der Testsektion thermisch zu isolieren.

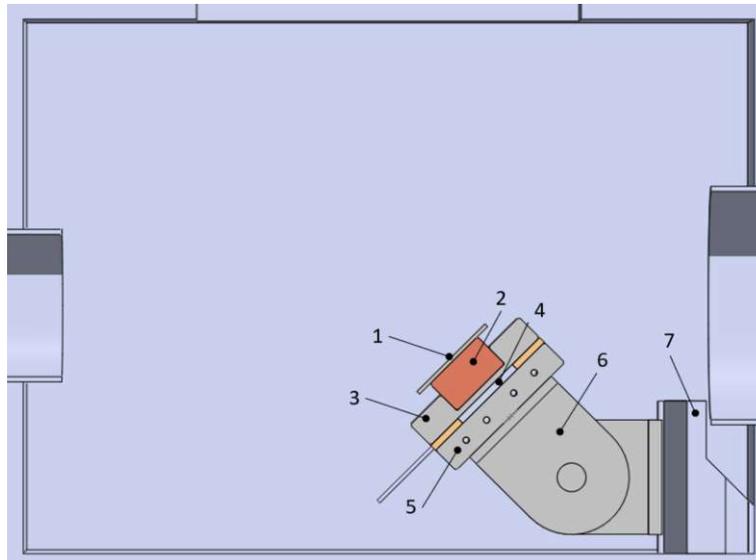


Abbildung 3.3: Schnittdarstellung der Testsektion mit der Probenhalterung. (1) Probe, (2) Probenaufsatz, (3) Aufnahme Probenaufsatz, (4) Peltier-Element, (5) Wärmetauscher, (6) Bosch Rexroth Aluminium Gelenkverbinder, (7) Bosch Rexroth Aluminium Profil

Die Strömung im Windkanal wird von einem Impeller mit leistungsstarkem Antrieb erzeugt. Dieser wird für die bessere Zugänglichkeit außerhalb des Wärmetauschers und vor der Einspritzung positioniert. Damit wird eine Zerstäubung der Wassertropfen und eine Vereisung des Impellers verhindert. Die Einspritzung wird unmittelbar nach dem Bogen vor der Testsektion eingebaut (Abbildung 3.4). Die Anordnung der Einspritzung in der Abbildung 3.4 bietet den Vorteil, dass zwischen Bogen und Einspritzung ein Strömungsgleichrichter angebracht werden kann, um die turbulente Strömung nach dem

### 3 Versuchsaufbau

Bogen zu beruhigen. Der Strömungsgleichrichter kann aufgrund einer möglichen Vereisung nicht nach der Einspritzung eingebaut werden. Die Positionierung der Einspritzung erfolgt hier seitlich durch eine 30° Abzweigung. Für die Wasserzufuhr sind zwei Varianten zum Testen angedacht. Die erste Variante besteht aus einer Druckluftspritzpistole und einer Zweistoffdüse. Das Wasser wird dabei mittels Druckluft von einem Saugbecher angesaugt und über eine Zweistoffdüse zerstäubt. Die zweite Variante besteht aus einer Pumpe, einem Ventil und einer Zerstäubungsdüse (Einstoff). Mit der Wasserpumpe wird Druck aufgebaut, um das Wasser durch die Einstoff-Düse zu befördern und zu zerstäuben. Das elektromagnetische Ventil ermöglicht eine zeitlich exakte Schaltung der Einspritzung.

Der Klima-Windkanal wird mit Temperatursensoren, einem Luftfeuchtigkeitssensor und einem Windgeschwindigkeitssensor ausgestattet. Im Kühlkanal werden jeweils am Ein- und Ausgang vom Wärmetauscher und Gefrierschrank Temperatursensoren installiert. Ein Temperatursensor und ein Luftfeuchtigkeitssensor werden in der Testsektion angebracht. Diese sind für die Versuchsdurchführung und für die Regelung der Kühlungstemperatur ausschlaggebend. Ein weiterer Temperatursensor wird in der Probenhalterung integriert, womit die Probenkühlung geregelt wird.

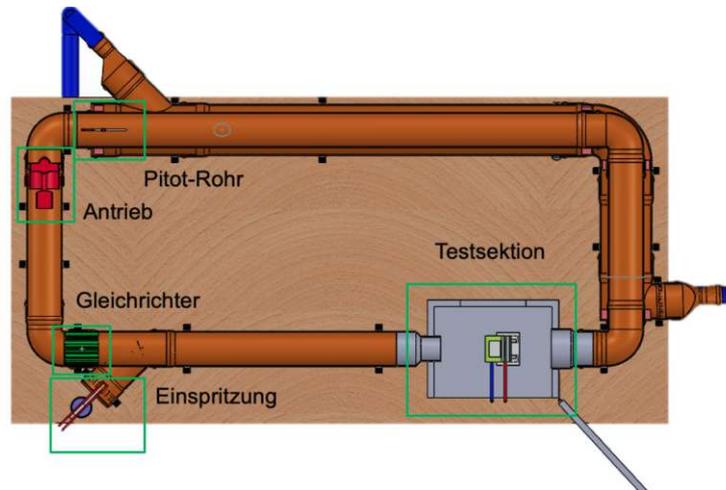


Abbildung 3.4: 3D-CAD Modell Klima-Windkanal- Schnittdarstellung von oben mit Benennung der Komponenten.

#### 3.3.2 Komponenten

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Komponenten für den Klima-Windkanal aufgelistet und beschrieben.

**Gefrierschrank 1:** Gefrierschrank von Hersteller Indesit

Abmessungen ca. 90 cm x 50 cm x 50 cm

### 3 Versuchsaufbau

Bezeichnung Kompressor: ACC HVY67AA

Thermische Leistung: 57 W bei  $-30^{\circ}\text{C}$  Verdampfungstemperatur nach CECOMAF

**Gefrierschrank 2:** Gefrierschrank von Hersteller Bauknecht

Abmessungen ca. 90 cm x 50 cm x 50 cm

Bezeichnung Kompressor: Dannfoss TL 5 A

Thermische Leistung: 56 W bei  $-35^{\circ}\text{C}$  Verdampfungstemperatur nach CECOMAF

**Antrieb Windkanal:** Impeller mit leistungsstarken Antrieb (für RC-Flugmodelle)

Rotordurchmesser: 90 mm

Maximaler Schub: 36 N

Spannung: Ausgelegt für 22.2 V

Maximaler Strom: 110 A

Maximale elektrische Leistung: 2.44 kW

Berechnung der maximal erreichbaren Strömungsgeschwindigkeit durch den vom Hersteller-Datenblatt angegebenen maximalen Schub:

Gemäß Definition ist der Schub eine Kraft, die quantitativ durch das zweite und dritte Newtonsche Axiom beschrieben wird. Ein System, das in eine Richtung Masse verdrängt bzw. beschleunigt übt eine Kraft mit gleichem Betrag in die gegengleiche Richtung aus. Mit dem Impulserhaltungssatz kann folgender Zusammenhang hergestellt werden [68]:

$$F_S = \dot{m}_{aus} * v_{aus} - \dot{m}_{ein} * v_{ein} \quad (3.3)$$

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Eingangsgeschwindigkeit  $v_{ein}$  gleich null ist. Damit entfällt der zweite Term. Der Widerstand, der durch die Rohrströmung geleistet wird, wird damit vernachlässigt. Der Massenstrom  $\dot{m}_{aus}$  am Ausgang des Impellers ergibt sich aus der Luftdichte  $\rho_{luft}$ , der Querschnittsfläche unmittelbar nach dem Rotor  $A_I$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $v_{aus}$ :

$$\dot{m}_{aus} = v_{aus} * A_I * \rho_{luft} \quad (3.4)$$

Die Querschnittsfläche  $A_I$  ergibt sich aus dem Innen- und Außendurchmesser des Rotors:

$$A_I = (D_{Ra}^2 - D_{Ri}^2) \frac{\pi}{4} = 58.7 \text{ cm}^2 \quad (3.5)$$

Rotor Außendurchmesser:  $D_{Ra} = 90 \text{ mm}$

Rotor Innendurchmesser:  $D_{Ri} = 25 \text{ mm}$

Damit kann der Schub  $F_S$  wie folgt ausgedrückt werden:

$$F_S = v_{aus}^2 * A_I * \rho_{luft} \quad (3.6)$$

Mit dem Zusammenhang kann auf die Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Rotor geschlossen werden.

$$v_{aus} = \sqrt{\frac{F_S}{A_I * \rho_{luft}}} = 68.9 \frac{m}{s} \quad (3.7)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal bei 110 mm Durchmesser kann über den Volumenstrom ermittelt werden. Der Volumenstrom bei voller Last ergibt sich aus der Strömungsgeschwindigkeit und der Querschnittsfläche im Rotor:

$$V_I = v_{aus} * A_I = 0.4 \frac{m^3}{s} \quad (3.8)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit bei  $D = 110$  mm ergibt sich aus:

$$v_{D110} = \frac{V_I}{A_{D110}} = 47.1 \frac{m}{s} \quad (3.9)$$

#### **Geschwindigkeitssensor:** Pitot-Rohr mit Differentialdrucksensor

Das Pitot-Rohr ist eine Staudrucksonde, die bei Flugzeugen und Rennfahrzeugen für die Geschwindigkeitsmessung Anwendung findet. Die geometrische Form des Rohres ermöglicht es, den Staudruck und den statischen Druck zu erfassen. Die frontale Öffnung des Rohres führt in eine von zwei Messkammern eines Differentialdrucksensors. Die seitlichen Öffnungen entlang des Pitot-Rohrs führen in die zweite Messkammer. Zwischen den Messkammern ist eine Membran, deren Auslenkung den Differentialdruck liefert. Für ein Fluidteilchen der Masse  $m$  mit der Strömungsgeschwindigkeit  $v$  gilt gemäß der Bernoullischen Gleichung an jedem Punkt einer Stromlinie [68]:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} + m \cdot g \cdot h + p \cdot \frac{m}{\rho} = E_{ges} = const. \quad (3.10)$$

Der dynamische Druck ergibt sich aus der Differenz von Staudruck (Gesamtdruck) und statischem Druck [68].

$$p_{dyn} = p_{ges} - p_{stat} \quad (3.11)$$

Durch Anwendung der Bernoullischen Gleichung ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des dynamischen Drucks [68].

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{p_{dyn}}{\rho}} \quad (3.12)$$

Der Differentialdrucksensor ist vom Hersteller Freescale und vom Typ MPXV7002. Der Sensor verfügt über einen Druckbereich von  $-2$  kPa bis  $kPa$  mit einer Genauigkeit von

$2.5\%V_{FSS}^2$ .

#### **Thermoelektrische Kühlung der Probe:** Peltier-Element TEC1-127080

Ein Peltier-Element ist ein thermoelektrischer Wandler, der auf dem Peltier-Effekt beruht. Er besteht aus elektrisch seriell geschalteten p- und n-Leitern, die zwischen zwei Metallplatten montiert sind. Bei Stromdurchfluss wird eine Temperaturdifferenz zwischen den zwei Seiten erzeugt. Wie das Peltier-Element in der Probenkühlung eingesetzt wurde, ist in den technischen Zeichnung im Anhang A zu entnehmen.

Technische Daten:

Typ: TEC1-127080

Abmessungen: 40 mm x 40 mm x 3.3 mm

Kennwerte bei 25 °C an der warmen Seite:

Leitung:  $Q_{max} = 72 \text{ W}$

Temperatur Differenz:  $\Delta T_{max} = 67 \text{ °C}$

Strom:  $I_{max} = 8.5 \text{ A}$

Spannung:  $V_{max}(\text{Volts}) = 15.4 \text{ V}$

Widerstand:  $Module \text{ Resistance} = 1.54 \text{ } \Omega$

#### **Temperatursensoren:** Wasserdichte Temperatursensoren aus Edelstahl

Typ: DS18B20

Temperaturbereich:  $-55 \text{ °C} < T < 125 \text{ °C}$

Abweichung:  $\pm 0.5 \text{ °C}$  bei  $-10 \text{ °C} < T < 85 \text{ °C}$

Betriebsspannung: 3 V bis 5.5 V

#### **Frostschutz für die Einspritzung:** Heizkabel/Rohrbegleitheizung

Länge: 1 m

Leistung: 16 W

### **3.3.3 Thermische Berechnung der Kühlanlage und Interpretation der Ergebnisse**

Die Konstruktion des Klima-Windkanals erforderte die Bestimmung der thermischen Parameter wie Kühlleistung, Dämmung und Antriebsleistung im Wind- und Kühlkanal. Durch eine thermische Berechnung konnte eine Abschätzung der genannten Parameter gefunden werden. Die Grundlagen der Berechnungen wurden dem Buch „Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis 7. Auflage“ von Peter von Böckh und Thomas Wetzel entnommen. Der Klima-Windkanal wurde dafür in der Abbildung 3.5 schematisch mit den thermischen relevanten Größen dargestellt. Die Berechnung baut auf einer be-

<sup>2</sup>Full Scale Span ( $V_{FSS}$ ) ist definiert als die Differenz zwischen der Ausgangsspannung bei vollem und bei minimalem Nenndruck.

### 3 Versuchsaufbau

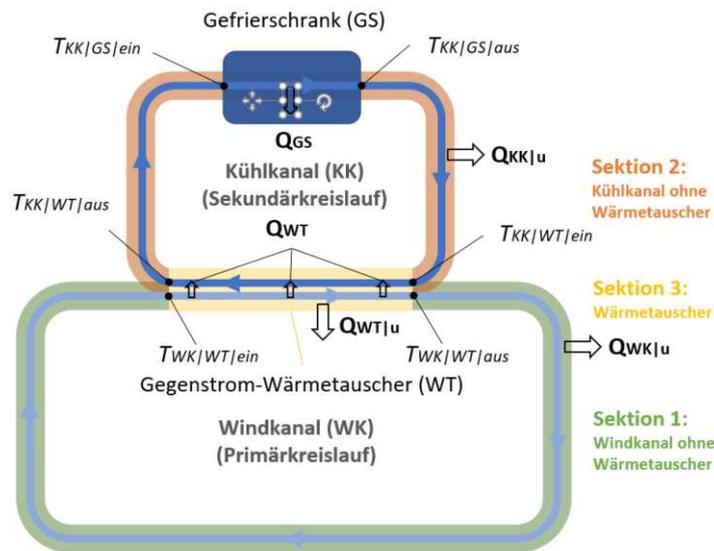


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des thermischen Aufbaus des Klima-Windkanals.

kannten Ausgangstemperatur am Gefrierschrank ( $T_{KK|GS|aus}$ ) auf. Durch Ermittlung der Nußelt-Zahl, kann unter Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit, der Temperatur und der geometrischen Abmessungen, die Wärmedurchgangszahl ermittelt werden. Durch ein iteratives Verfahren kann mit den Wärmestrom von der Umgebung und mit der angenommenen Temperatur ( $T_{KK|GS|aus}$ ) auf die Eingangstemperatur im Wärmetauscher ( $T_{KK|WT|ein}$ ) geschlossen werden. Die Ausgangstemperatur vom Wärmetauscher des primären Kreislaufs (Windkanal)  $T_{WK|WT|aus}$  wird als Temperatur im Windkanal betrachtet. Ziel ist es, dass  $T_{WK|WT|aus} -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht. Die Eingangstemperatur in den Wärmetauscher vom primären Kreislauf  $T_{WK|WT|ein}$ , wird über die angenommene Temperatur  $T_{WK|WT|aus}$  und den Wärmestrom von der Umgebung  $Q_{WK|u}$  iterativ ermittelt. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal ist die Temperaturdifferenz vom Ein- und Ausgang gering. Damit ist die Eingangs Die Ausgangstemperatur am Wärmetauscher vom sekundären Kreislauf (Kühlkanal)  $T_{KK|WT|aus}$  ist die verbleibende unbekannte Temperatur im System des Wärmetauschers und kann durch den Wärmeübergang im Ringspalt iterativ ermittelt werden. Im Ringspalt findet ein Wärmestrom vom primären zum sekundären Kreislauf  $Q_{WT}$  und von der Umgebung zum sekundären Kreislauf  $Q_{WT|u}$  statt. Ist die Ausgangstemperatur des Wärmetauschers  $T_{KK|WT|aus}$  bekannt, kann wiederum auf die Eingangstemperatur des Gefrierschranks  $T_{KK|GS|ein}$  geschlossen werden. Mit bekannter Ein- und Ausgangstemperatur im Gefrierschrank und mit dem Massenstrom kann die notwendige Kühlleistung ermittelt werden. Der insgesamt aufgenommene Wärmestrom von der Umgebung wird als  $Q_u$  bezeichnet und setzt sich aus  $Q_u = Q_{WT|u} + Q_{WK|u} + Q_{KK|u}$  zusammen. Die gesamte Berechnung mit angepassten Eingabeparametern befindet sich im Anhang H.

Mit den getroffenen Annahmen und Parametern wurden folgende Ergebnisse berechnet:

#### Annahmen

- Temperatur im Windkanal (primärer Kreislauf)  $T_{WK|WT|aus} = -5 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Austrittstemperatur Gefrierschrank  $T_{KK|GS|aus} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Kein Luftaustausch mit der Umgebung
- Keine Wärmeabgabe der Antriebe im Wind- und Kühlkanal
- Thermoelektrische Kühlung der Probe wird vernachlässigt

#### Parameter angelehnt an das 3D-CAD Modell

- Volumenstrom Kühlkanal nach Herstellerangabe Rohrlüfter  $V_{VENT} = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  wird aufgrund des Reibungswiderstands verringert:  $V_{KK} = 50 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
- Volumenstrom im Windkanal bei einer Strömungsgeschwindigkeit von rund  $40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bei  $110 \text{ mm}$  Durchmesser:  $V_{WK} = 1328 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
- Umgebungstemperatur:  $T_u = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Dämmstoffstärke:  $s_{iso} = 50 \text{ mm}$

#### Ergebnisse der thermischen Berechnung

Der Wärmestrom des gesamten Klima-Windkanals an die Umgebung ergibt sich aus der Summe der drei Sektionen:

$$Q_{WK|u} = 34.5 \text{ W}$$

$$Q_{KK|u} = 19 \text{ W}$$

$$Q_{WT|u} = 25.5 \text{ W}$$

$$Q_u = Q_{WK|u} + Q_{KK|u} + Q_{WT|u} = 80 \text{ W}$$

Der errechnete Temperaturverlauf im Kühlkanal kann der Tabelle 3.1 entnommen werden.

Mit der Ein- und Ausgangstemperatur, dem Massenstrom und der spezifischen Wärmekapazität der Luft kann auf die notwendige thermische Kühlleistung des Gefrierschranks geschlossen werden:  $Q_{GS} = 65 \text{ W}$

Die Differenz zwischen dem Wärmestrom vom gesamten Windkanal an die Umgebung  $Q_u$  und der Kühlleistung des Gefrierschranks  $Q_{GS}$  zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen, das System nicht im Gleichgewicht ist und sich die Temperaturen auf ein anderes Niveau einpendeln werden. Wird die Windkanal Temperatur  $T_{WK} = \frac{T_{WK|ein} + T_{WK|aus}}{2}$  variiert, kann ein Gleichgewichtspunkt angenähert werden. Bei  $T_{WK} = -7.62 \text{ } ^\circ\text{C}$  werden

Sektion	Eingangstemperatur	Ausgangstemperatur	Differenz
GS-WT	$T_{KK GS aus} = -20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{KK WT ein} = -19.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{GS-WT Dif} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$
WT	$T_{KK WT ein} = -19.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{KK WT aus} = -16.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{WT Dif} = 2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$
WT-GS	$T_{KK WT ein} = -16.9 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{KK GS aus} = -16.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{WT-GS Dif} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tabelle 3.1: Temperaturverlauf im Kühlkanal gemäß den Ergebnissen der thermischen Berechnung mit den Parametern angelehnt an das konstruierte 3D-CAD Modell und den bekannten Komponenten.

mit  $Q_{GS} = 81.7 \text{ W}$  und  $Q_u = 82.7 \text{ W}$  plausible Ergebnisse errechnet. Das System kann durch weitere Parameter wie dem Volumenstrom des Kühlkreislaufs  $V_{KK}$ , der Umgebungstemperatur  $T_u$ , der Dämmstoffdicke  $s_{iso}$ , der Gefrierschrank-Ausgangstemperatur  $T_{KK|GS|aus}$  sowie von diversen thermischen Kennzahlen beeinflusst werden. Die hohe Anzahl an unbekanntem bzw. abgeschätzten Parametern zeigt, dass die Berechnung zu diesem Zeitpunkt lediglich einen Orientierungspunkt darstellte. Beim realen Aufbau sind abweichende Temperaturen zu erwarten. Für die weitere Entwicklung kann die Berechnung an Wert gewinnen, indem Messdaten gesammelt und die unbekanntem bzw. abgeschätzten Parameter bestimmt werden. Besteht eine Korrelation zwischen Berechnung und den tatsächlichen Temperaturen im Windkanal, können weitere Änderungen oder Anpassungen der thermischen Parameter durchgeführt werden. Die Auswirkung der thermischen Parameter auf die Windkanal-Temperatur kann untersucht werden und als Entscheidungshilfe für die Weiterentwicklung dienen.

Im Wärmetauscher wird, zufolge der Berechnung, ein Wärmestrom vom Windkanal an den Kühlkanal von  $Q_{WT} = 47 \text{ W}$  übertragen. Der Wärmestrom vom Windkanal an die Umgebung ergibt sich zu  $Q_{WK|u} = 35 \text{ W}$ . Daraus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass der Wärmetauscher den Windkanal ausreichend Wärme entzieht, wenn die Temperatur beim Eingang des Wärmetauschers im Kühlkanals  $T_{KK|WT|ein}$  ausreichend tief ist bzw. wenn die Kühlleistung des Gefrierschranks ausreichend ist. Die Dimensionierung des Wärmetauschers erfüllt gemäß den getroffenen Annahmen die Anforderungen und dient als Ausgangspunkt für den folgenden mechanischen Aufbau.

### 3.4 Ausarbeitung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung vom Entwurf über vier Ausbaustufen bis zum fertigen Prüfstand beschrieben.

#### 3.4.1 Versuchsaufbau 1

In diesen Abschnitt wird der erste Aufbau des Klima-Windkanals beschrieben und es werden die Ergebnisse der Temperaturmessungen unter verschiedenen Parametern zusammengefasst.

#### Aufbau des Klima-Windkanals

Grundlage für den Aufbau ist ein aus Aluminiumprofilen aufgebauter Tisch mit einer 210 mm x 125 mm großen Tischplatte aus Furnier-Sperrholz. Die DN 110 mm Kanalrohre für den Windkanal wurden gemäß dem Konstruktionsplan aufgebaut, wodurch sich ein rechteckförmiger Kreislauf mit den Abmessungen 75 cm x 170 cm ergeben hat. Die Rohrschellen wurden mit einer Gewindestange und jeweils zwei Beilagscheiben und Muttern an der Tischplatte befestigt. Der Impeller-Antrieb wurde in ein Stahlrohr eingespannt und mit einer Reduzierung von 110 mm auf 90 mm an das Windkanal-Rohr befestigt. Die Verbindungen wurden abgedichtet und der gesamte Abschnitt mit Rohrschellen an die Tischplatte befestigt (Abbildung 3.7). Die 26 cm x 26 cm x 38 cm große Testsektion besteht aus einer 8 mm starken Holzplatte und an der aufklappbaren Vorderseite und Oberseite befindet sich ein doppelt verglastes Fenster. Der Windkanal ohne Kühlanlage und ohne Dämmung ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

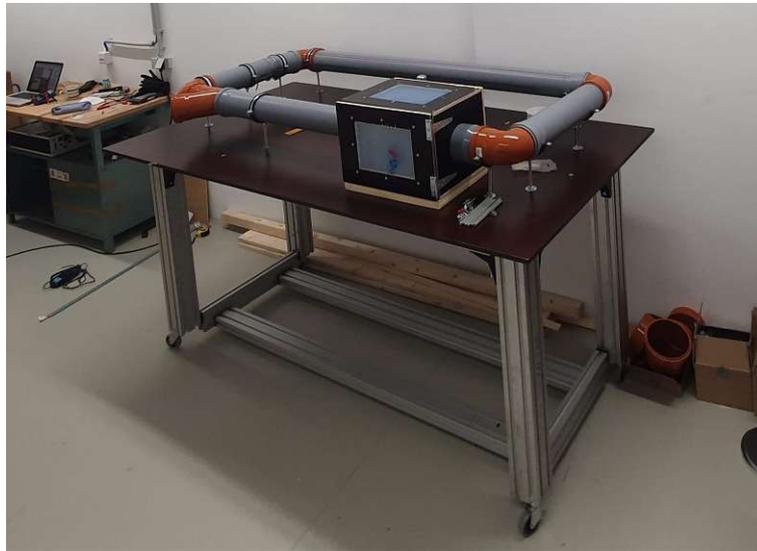


Abbildung 3.6: Der Versuchsaufbau 1 ohne Kühlanlage und ohne Dämmung.

### 3 Versuchsaufbau

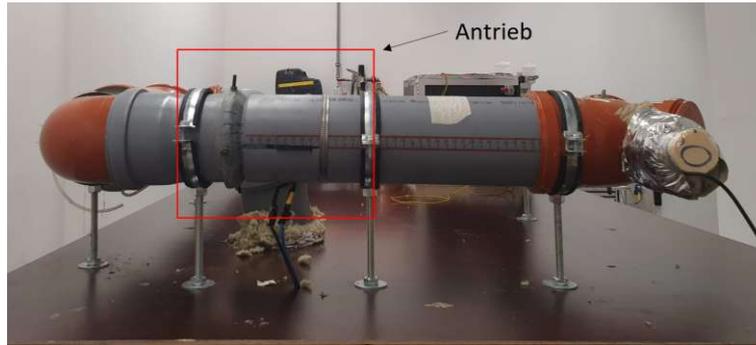


Abbildung 3.7: Versuchsaufbau 2 mit der Einbausituation des Impeller-Antriebs im Windkanal.

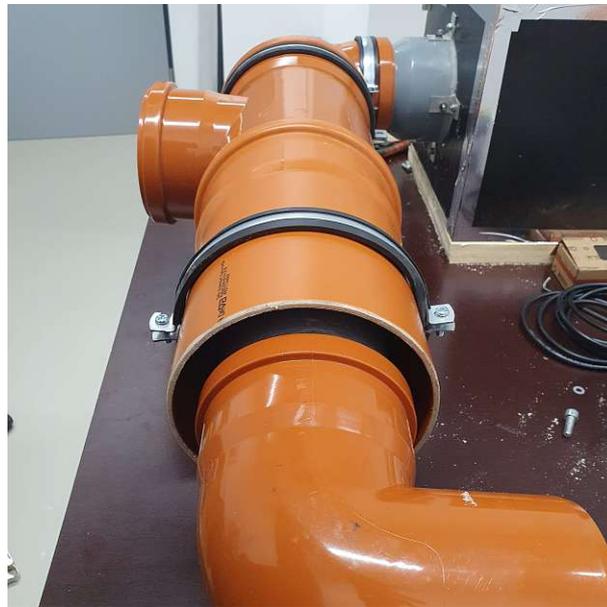


Abbildung 3.8: Der Versuchsaufbau 1 beim Zusammenbau des Wärmetauschers.

Der Impeller-Antrieb im Windkanal wird über ein Netzteil mit Gleichstrom versorgt und mithilfe eines Motorreglers und Potentiometers angesteuert. Erste Versuche zeigten einen sehr leistungsfähigen Antrieb, der einen spürbar starken Luftstrom erzeugte. Der Windkanal wurde bei laufendem Antrieb auf Dichtheit überprüft, wobei kein Luftaustritt festgestellt werden konnte.

Nachdem der Impeller-Antrieb eingebaut und der Windkanal auf Dichtheit überprüft wurde, konnte die Kühlanlage installiert werden. Der Wärmetauscher wurde planmäßig über eine Länge von rund 2.1 m aufgebaut und die vorgesehenen Verbindungsrohre ( $D = 50 \text{ mm}$ ) zum Gefrierschrank wurden über Abzweigungen und Reduzierungen mit dem Wärmetauscher verbunden und vorerst provisorisch befestigt. Die Abbildung

### 3 Versuchsaufbau

3.9 zeigt den Wärmetauscher während des Zusammenbaus. Der Lüfter im Kühlkanal (L1) wurde an der Abzweigung vom Wärmetauscher zum Gefrierschrank installiert. Der Kühlkanal wurde in den Gefrierschrank seitlich oben eingeleitet und auf der gegenüberliegenden Seite unten abgeführt. Zwischen Ein- und Ausgang wurde die durchströmende Luft mit Leitbleche so geführt, dass sie einen möglichst langen Weg zurücklegen musste. Mit zusätzlicher metallischer Masse im Gefrierschrank konnte ein Kältespeicher erzeugt werden, der Temperaturschwankungen im Gefrierschrank glätten soll. Die Regelung des Gefrierschranks wurde so manipuliert, dass durch einen Dauerbetrieb des Kompressors eine Temperatur von  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht wurde (ohne Zirkulation im KK). Der Kühlkanal wurde mit 4 Temperatursensoren ausgestattet, diese befinden sich jeweils am Ein- und Ausgang des Gefrierschranks und des Wärmetauschers. Der Kühl- und Windkanal wurde mit 50 mm dicken aluminiumkaschierten Steinwollmatten thermisch isoliert (Abbildung 3.9).



Abbildung 3.9: Versuchsaufbau 1 mit Kühlanlage und provisorisch angebrachten Steinwollmatten.

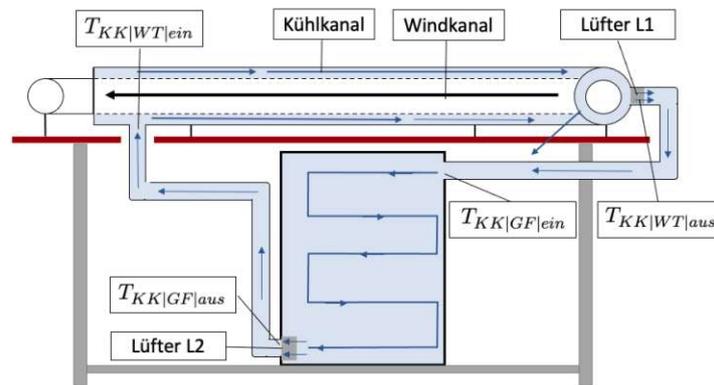


Abbildung 3.10: Graphische Darstellung des Kühlkanals im Versuchsaufbau 1 mit der Anordnung des Gefrierschranks und die Positionen der Lüfter und Temperatursensoren.

### Temperaturmessungen Versuchsaufbau 1

Es wurden Temperaturmessungen von mehreren Ausbaustufen des Versuchsaufbaus 1 durchgeführt. Die Parameter der Temperaturmessungen sind in Tabelle 3.2 und die erfassten Temperaturen in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Die Temperaturmessungen werden in diesem Abschnitt beschrieben und die Ergebnisse analysiert. Die Positionen der Temperatursensoren sind in Abbildung 3.10 dargestellt.

Im Versuchsaufbau 1 wurde nur die Zirkulation im Kühlkanal betrieben. Der Antrieb im Windkanal und die thermoelektrische Kühlung waren zu diesem Zeitpunkt nicht fertiggestellt.

Temperaturmessung	Antrieb WK	Antrieb KK	Dämmung	Betriebszeit
TM 1.1	Aus	L1	KK	3 h
TM 1.2	Aus	L1 + L2	KK	3 h
TM 1.3	Aus	L1 + L2	KK und WK	12 h
TM 1.4	Aus	L1 + L2	KK (zweilagig GS-WT) und WK	3 h

Tabelle 3.2: Parameter der Temperaturmessungen im Wind- und Kühlkanal von Versuchsaufbau 1.

Temperaturmessung	Kühlkanal				Windkanal
	$T_{KK GF aus}$	$T_{KK WT ein}$	$T_{KK WT aus}$	$T_{KK GF ein}$	$T_{WK}$
TM 1.1	$-13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	
TM 1.2	$-10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	
TM 1.3	$-11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
TM 1.4	$-11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabelle 3.3: Temperaturmessung im Wind- und Kühlkanal von Versuchsaufbau 1

**Temperaturmessung 1.1:** Bei der ersten Temperaturmessung (TM 1.1) war ausschließlich der Kühlkanal mit der Dämmung verkleidet, weshalb nur die Temperaturen im Kühlkanal von Interesse waren. Die Temperaturänderung über den gesamten Kühlkanalverlauf bzw. zwischen Ein- und Ausgang des Gefrierschanks betrug  $31.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{A|1.1}$ ) und die gemittelte Temperatur der vier Messpunkte im Kühlkanal  $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{M|1.1}$ ). Die stark abfallende Temperatur im Verlauf der Messpunkte im Kühlkanal, weist auf eine geringe Strömungsgeschwindigkeit hin, weshalb für die Messung TM 2.1 diese erhöht wurde.

**Temperaturmessung 1.2:** Es wurde ein zweiter Lüfter (L2) (siehe Abbildung 3.10) zusätzlich zum bereits eingebauten Lüfter L1 am Ausgang des Gefrierschanks eingebaut. Dieser erhöhte die Strömungsgeschwindigkeit, führte dem System aber durch Energieverluste des Elektromotors auch Wärme zu. Die erhöhte Zirkulationsgeschwindigkeit im Kühlkanal zeigte sich durch eine verringerte Temperaturdifferenz im Verlauf des Kühlkanals. Zwischen Ein- und Ausgang des Gefrierschanks betrug die Differenz  $23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{A|1.2}$ ) und die gemittelte Temperatur der vier Messpunkte lag bei  $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{M|1.2}$ ).

**Temperaturmessung 1.3:** Der Aufbau wurde vollständig mit der Dämmung verkleidet und es wurde ein Temperatursensor im Windkanal im Bereich der Einspritzung angebracht ( $T_{WK}$ ). Vor der Temperaturmessung wurde die Kühlung über Nacht für 12 h betrieben, wodurch der Kühlkanal insgesamt weiter Abkühlen konnte ( $T_{M|1.3} = 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aber die Temperaturdifferenz im Verlauf des Kühlkanals ( $T_{A|1.3} = 22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) war ähnlich wie bei der vorhergehenden Messung. Die Temperaturen im Kühlkanal konnten leicht abgesenkt werden, waren aber noch weit vom Ziel ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) entfernt.

**Temperaturmessung 1.4:** Für die Messung wurde die Dämmstoffstärke erhöht, um aufzuzeigen wie effektiv die verbesserte thermische Isolierung ist. Dazu wurden im Bereich zwischen Gefrierschrank und Wärmetauscher ( $T_{KK|GS|aus}$  und  $T_{WK|WT|ein}$ ) die Dämmstoffmatten zweilagig angebracht (100 mm). Die Temperaturänderung von  $T_{KK|GS|aus}$  zu  $T_{WK|WT|ein}$  war in Vergleich zur Messung TM 1.3 nach 8 Stunden Betrieb unverändert - sie stieg sogar um  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  an. Es konnte somit keine Verbesserung erzielt werden. Eine mögliche Erklärung dafür waren die provisorisch befestigten Dämmstoffmatten und die möglicherweise schwankende Kühlleistung des Gefrierschanks.

#### Erkenntnisse aus den Temperaturmessungen und Verbesserungsmaßnahmen

Die erfassten Temperaturen im Kühlkanal waren deutlich unter den Erwartungen. In der thermischen Berechnung wurde eine Ausgangstemperatur am Gefrierschank von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  angenommen. Um diese Temperatur zu erreichen, muss nicht nur die Kühlleistung erhöht, sondern auch die Effizienz des gesamten Systems verbessert werden. Der Temperaturanstieg im Kühlkanal zwischen Wärmetauscher und Gefrierschrank weist darauf hin, dass zu viel Wärme von der Umgebung aufgenommen wurde und dass die Strömungsgeschwindigkeit im Kühlkanal zu gering war. Folgende Verbesserungsmaßnahmen waren für den Versuchsaufbau 2 vorgesehen:

- 1) **Erhöhung der Kühlleistung:** Einbau eines zweiten Gefrierschranks.
- 2) **Verringerung des Strömungswiderstands im Kühlkanal:** Der Strömungswiderstand im Rohr ist vom Durchmesser abhängig. Durch Erhöhung des Rohrdurchmessers von 50 mm auf 110 mm im Kühlkanal kann der Volumenstrom bei gleichbleibender Antriebsleistung erhöht werden. Die ringförmigen Befestigungen im Ringspalt des Wärmetauschers (Innenrohr zum Außenrohr) wird durch mehrere kleine Abstandhalter ersetzt. Diese sind in der Abbildung 3.14 ersichtlich.
- 3) **Verkürzung des Kühlkanals:** Die Kanalführung zwischen Wärmetauscher und Gefrierschrank wird nicht mehr außen um die Tischplatte geleitet, sondern innen durch einen Ausschnitt in der Tischplatte. Die Länge des Kühlkanals wird damit verkürzt, woraus eine Reduzierung des Strömungswiderstandes und der Außenfläche resultiert.

#### 3.4.2 Versuchsaufbau 2

##### Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen

Die Verbesserungsmaßnahmen konnten erfolgreich umgesetzt werden. Durch den zweiten Gefrierschrank wurde der Weg zum Wärmetauscher deutlich verkürzt. Die Anordnung der Gefrierschränke und der Verlauf des Kühlkanals mit der Positionierung der Temperatursensoren ist in Abbildung graphisch 3.11 dargestellt. Der Versuchsaufbau ohne Dämmung ist in Abbildung 3.12 ersichtlich.

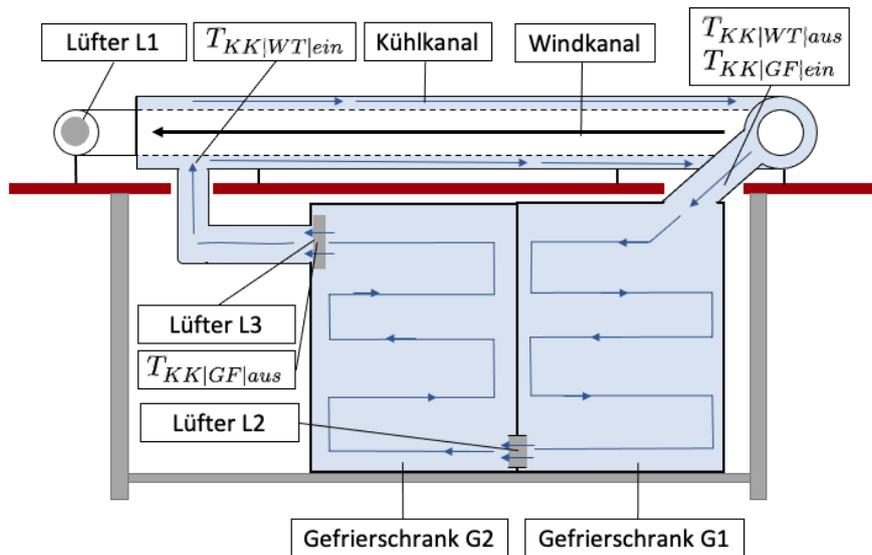


Abbildung 3.11: Graphische Darstellung des Kühlkanals im Versuchsaufbau 2 mit der Anordnung der Gefrierschränke und Positionen der Lüfter und Temperatursensoren.



Abbildung 3.12: Draufsicht des Klima-Windkanals (Versuchsaufbau 2) ohne Dämmung.

Der Lüfter L1 wurde durch einen leistungsstärkeren Lüfter (L3) ersetzt, wodurch die Lüfter L2 und L3 die Strömung im Kühlkanal erzeugten. Die Steuerung für den Impeller-Antrieb im Windkanal war zu diesem Zeitpunkt nicht fertiggestellt, weshalb der Lüfter L1 provisorisch für die Durchführung der Temperaturmessungen im Windkanal installiert wurde. Die Temperatursensoren am Ausgang des Wärmetauschers ( $T_{KK|WT|aus}$ )

### 3 Versuchsaufbau

und am Eingang des Gefrierschranks ( $T_{KK|GF|ein}$ ) wurden aufgrund des geringen Abstandes zu einem Sensor zusammengefasst (siehe Abbildung 3.11). Ein zusätzlicher Temperatursensor wurde in der Probenhalterung installiert, dessen genaue Position ist in der Abbildung 3.13 und in Anhang A dargestellt. Mit diesem kann die Auswirkung der Probenkühlung erfasst werden. Die Testsektion war für die Temperaturmessungen nur provisorisch mit Dämmstoffmatten verkleidet.

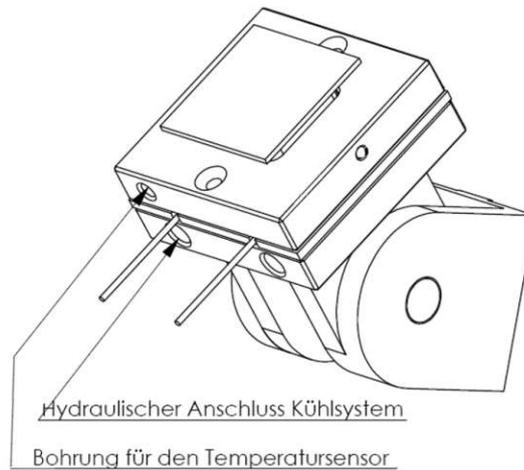


Abbildung 3.13: Technische Zeichnung der Probenhalterung in der isometrischen Ansicht.

#### Temperaturmessungen Versuchsaufbau 2

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Erste Versuche zeigten, dass der Betrieb im Kühlkanal mit den Lüftern L2 und L3 sich negativ auf die Temperatur auswirkte, weshalb für die Temperaturmessungen 2.1 und 2.2 nur der Lüfter L3 betrieben wurde.

Messungs- stufe	Kühlkanal			Windkanal		Betriebs- zeit
	$T_{KK GF aus}$	$T_{KK WT ein}$	$T_{KK WT aus}$ $T_{KK GF ein}$	$T_{WK}$	$T_{Probe}$	
TM 2.1	$-9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-9.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	5 h
TM 2.2	$-10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	1 h

Tabelle 3.4: Temperaturmessungen im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 2).  
TM 2.1 ohne Probenkühlung und TM 2.2 mit Probenkühlung.

**Temperaturmessung 2.1:** Die Temperaturmessung wurde nach 5 Stunden Betrieb und ohne Probenkühlung aufgenommen. Die Verbesserungsmaßnahmen von Versuchsaufbau 1 zu 2 spiegelten sich im Temperaturverlauf wider. Zwischen Gefrierschrank und Wärmetauscher wurde deutlich weniger Wärme von der Umgebung aufgenommen als beim Versuchsaufbau 1. Vom Ausgang des Gefrierschranks zum Eingang des Wärmetauschers stieg die Temperatur lediglich um  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zum Vergleich: Versuchsaufbau 1:  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die Temperaturänderung über den gesamten Verlauf des Kühlkanals bzw. zwischen Ein- und Ausgang der Gefrierschänke ( $T_{A|2.1}$ ) verringerte sich aufgrund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeit auf  $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zum Vergleich:  $T_{A|1.3} = 22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Durch die Lüfter (L1) im Windkanal konnte erstmals eine aussagekräftige Temperatur im Windkanal erfasst werden. Diese betrug im Bereich der Einspritzung  $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , womit eine Verbesserung im Vergleich zum Versuchsaufbau 1 erreicht wurde aber die Zieltemperatur ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) noch deutlich entfernt war. Der Sensor in der Probenhalterung erfasste eine Temperatur von  $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Differenz zwischen  $T_{WK}$  und  $T_{Probe}$  zeigte, dass im Abschnitt zwischen den zwei Sensoren viel Wärme aufgenommen wurde.

**Temperaturmessung 2.2:** Die Probenkühlung wurde für diese Messung erstmals betrieben. Das Peltier-Element wurde dafür an ein Netzteil angeschlossen und mit  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  kaltem Eiswasser für rund eine Stunde gekühlt. Der Sensor in der Probenhalterung hat eine Temperatur von  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen, womit die zusätzliche Kühlleistung erfasst werden konnte. Die Temperatur im Windkanal änderte sich aber trotz der zusätzlichen Kühlung nicht signifikant. Die warme Seite des Peltier-Elements und die Wasserkühlung haben dem Windkanal womöglich Wärme zugeführt und müssen daher bei der nächsten Ausbaustufe thermisch besser isoliert werden. Das Peltier-Element hatte Strom in Höhe von  $2\text{ A}$  verbraucht, was von der Herstellerangabe ( $I_{max} = 8.5\text{ A}$ ) deutlich abwich.

#### Erkenntnisse aus den Temperaturmessungen und Verbesserungsmaßnahmen

Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und Kühlleistung zeigten deutliche Verbesserungen in Vergleich zum Versuchsaufbau 1. Die durchschnittliche Temperatur der vier Messpunkte im Kühlkanal wurde weiter auf  $-5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{M|2.1}$ ) reduziert (zum Vergleich:  $T_{M|1.3} = 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die Zieltemperatur im Kühlkanal von rund  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und Windkanal von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  konnte nicht erreicht werden, weshalb weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Kühlanlage gesetzt wurden:

- 1) Thermische Isolierung der Testsektion:** Verkleidung der Testsektion mit  $8\text{ cm}$  starken Schaumstoffplatten.
- 2) Thermische Isolierung der thermoelektrischen Kühlung:** Die warme Seite des Peltier-Elements und der Wärmetauscher (Wasser gekühlte Aluminium-Block) fügten dem Windkanal Wärme zu. Alle Komponenten, die mit der Wasserkühlung in der Testsektion in Berührung kommen, werden daher thermisch isoliert.

**3) Einbau der Wasserkühlung in der Dämmschicht:** Von Seiten des Instituts (IFT) wurde eine Wasserkühlanlage zur Verfügung gestellt. Genaue Hersteller- oder Kenndaten sind nicht vorhanden. Die Kühlanlage konnte das Kühlwasser unter idealen Bedingungen auf eine Temperatur von  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  kühlen. Um die Kühlleistung des Wasserkühlers dem Windkanal zuzuführen, wird eine verringerte Umgebungstemperatur simuliert. Dazu wird der Kühl- und Windkanal zwischen zwei Dämmschichten mit einem vom Wasser gekühlten PVC-Pneumatikschlauch axial umwickelt.

**4) Verbesserung des Wärmeübergangs im Wärmetauscher:** Der Wärmeübergang im Wärmetauscher findet durch eine 3.2 mm starke Rohrwand aus Polypropylen (PP) statt. Die Wärmeleitfähigkeit von PP ist ähnlich wie die von PVC ( $0.15\text{ W/mK}$  [69]), womit beide Materialien schlechte Wärmeleiter sind. Der Austausch des Kanalgrundrohres durch ein Stahlrohr, welches eine höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt, soll den Wärmeübergang im Wärmetauscher verbessern.

#### 3.4.3 Versuchsaufbau 3

##### Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen

Der Klima-Windkanal wurde zum Teil demontiert, um die Verbesserungsmaßnahmen vorzunehmen. Im Wärmetauscher wurde ein Stahlrohr (Fallrohr für die Dachentwässerung) eingebaut. Dieses ist in Abbildung 3.14 ersichtlich. Die Testsektion und die Übergänge Kühlkanal-Gefrierschrank und Windkanal-Testsektion wurden abgedichtet. Als erste Dämmschicht wurde eine mehrmals umwickelte Luftpolsterfolie mit einer Stärke von ca. 3 cm angebracht. Luftpolsterfolie ist ein preisgünstiger und einfach erhältlicher Baustoff mit thermisch isolierenden Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit gemäß Hersteller:  $0.064\text{ W/mK}$  [70]). Die Luftpolsterfolie wurde mit einem PVC-Pneumatikschlauch mit 8 mm Durchmesser und 100 m Länge radial umwickelt und an das Wasserkühlagregat angeschlossen. Die äußerste Dämmschicht bestand aus den bereits eingesetzten 5 cm starken Steinwollematten (siehe Abbildung 3.15).

### 3 Versuchsaufbau



Abbildung 3.14: Versuchsaufbau 3 mit Stahlrohr im Wärmetauscher zur Verbesserung des Wärmeübergangs.



Abbildung 3.15: Fertiggestellter Versuchsaufbau 3.

Die Testsektion wurde innen mit 3 cm starken XPS-Hartschaumplatten und außen mit 8 cm starken EPS-Hartschaumplatten verkleidet. Die Bauteile, die in der Testsektion mit der Wasserkühlung in Berührung kommen, wurden mit einem Schaumstoffband und Aluklebeband thermisch isoliert. Die Testsektion ist in Abbildung 3.16 und 3.17 ersichtlich.

### 3 Versuchsaufbau



Abbildung 3.16: Vorderansicht der Testsektion (Versuchsaufbau 3).



Abbildung 3.17: Innenansicht der Testsektion (Versuchsaufbau 3). Probenhalterung mit Bildung von Raureif aufgrund der eingeschalteten Probenkühlung.

#### Temperaturmessungen Versuchsaufbau 3

Die Temperaturmessungen von Versuchsaufbau 3 wurden in 2 Abschnitte von TM 3.1 bis 3.4 und von TM 3.5 bis 3.10 unterteilt. Im ersten Abschnitt wurde die Auswirkung der Wasserkühlung in der Dämmschicht untersucht. Die Parameter und Ergebnisse von diesen Messungen sind in Tabelle 3.5 und 3.6 zusammengefasst. Im zweiten Abschnitt wurde die Steuerung für den Impeller-Antrieb und die Probenhalterung fertiggestellt.

### 3 Versuchsaufbau

Mit den TM 3.5 bis 3.10 wurden die Auswirkungen des Antriebs im Windkanal und der Probenkühlung untersucht. Die Parameter und Ergebnisse des zweiten Abschnitts sind in Tabelle 3.5 und 3.6 zu finden.

Ausbau- stufe	Antrieb WK	Antrieb KK	Proben- kühlung	Wasser- kühlung	Betriebszeit
TM 3.1	Lüfter (L1)	L2 + L3	Aus	Ein	18 h
TM 3.2	Lüfter (L1)	L2 + L3	Aus	Aus	3 h nach TM 3.1
TM 3.3	Lüfter (L1)	L3	Aus	Aus	18 h nach TM 3.2
TM 3.4	Lüfter (L1)	L3	Aus	Ein	6 h nach TM 3.3

Tabelle 3.5: Parameter der Temperaturmessungen 3.1 bis 3.4 (Versuchsaufbau 3).

Ausbau- stufe	Kühlkanal			Windkanal		$T_W$
	$T_{KK GF aus}$	$T_{KK WT ein}$	$T_{KK WT aus}$ $T_{KK GF ein}$	$T_{TS}$	$T_{Probe}$	
TM 3.1	$-8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$
TM 3.2	$-9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 3.3	$-16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-15.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 3.4	$-14.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabelle 3.6: Temperaturmessungen 3.1 bis 3.4 im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 3).

**Temperaturmessung 3.1:** Die Messung wurde nach 18 h Betrieb mit der Wasserkühlung in der Dämmschicht und mit zwei in Betrieb stehenden Lüfter im Kühlkanal aufgenommen. Die Temperatur im Windkanal hatte sich auf  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingependelt und war somit rund  $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiefer als beim Versuchsaufbau 2 (TM 2.1). Die Temperatursensoren  $T_{WK}$  und  $T_{Probe}$  befanden sich beide in der Testsektion, jedoch wiesen die gemessenen Temperaturen eine Differenz von  $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf. Der Grund dafür war die angeschlossene Wasserkühlung in der Probenhalterung. Durch das Kühlwasser ( $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in der Probenhalterung wurde dem Windkanal ( $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aufgrund des ausgeschalteten Peltier-Elements Wärme zugeführt.

**Temperaturmessung 3.2:** Die Messung wurde nach 3 Stunden Betrieb ohne Wasserkühlung aufgenommen. Die Temperaturen im Kühl- und Windkanal waren nahezu unverändert, nur  $T_{Probe}$  hat sich auf Grund der vorhin angesprochenen Thematik geändert. Die Temperaturdifferenz zwischen  $T_{WK}$  und  $T_{Probe}$  war mit  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  deutlich geringer. Die Ergebnisse deuten drauf hin, dass die Wasserkühlung in der Dämmung kaum Einfluss auf die Temperaturen im Kühl- und Windkanal hatte.

**Temperaturmessung 3.3:** Die Messung wurde mit einem Lüfter (L3) und ohne Wasserkühlung nach 18 h Betrieb aufgenommen. Die Temperaturen sind im Kühl- und

Windkanal deutlich gesunken. Im Windkanal wurden mit  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  erstmals Temperaturen im negativen Bereich erfasst. Am Ausgang des Gefrierschranks lag die Temperatur bei  $-16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  und war damit um  $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiefer als bei der vorhergehenden Messung. Der Betrieb mit nur einem Lüfter, konnte das Kühlsystem deutlich effizienter gestalten.

**Temperaturmessung 3.4:** Die Wasserkühlung wurde wieder eingeschaltet und für 6 h betrieben. Die Temperaturen im Verlauf des Kühlkanals sind um rund  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  und die in der Testsektion um rund  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  gestiegen. Die Temperaturdifferenz zwischen  $T_{Probe}$  und  $T_{WK}$  war, anders als bei TM 3.1, sehr gering. Die Wasserzufuhr in die Probenkühlung wurde durch vereiste Leitungen in der Testsektion unterbrochen, wodurch keine Zirkulation nach wieder Einschalten der Wasserkühlung möglich war.

#### **Erkenntnisse aus den Temperaturmessungen 3.1 bis 3.4:**

Der Betrieb im Kühlkanal mit nur einem Lüfter (L3) hat sich positiv auf die Temperaturen im Wind- und Kühlkanal ausgewirkt. Temperaturänderung im Verlauf des Kühlkanals war aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeit höher ( $T_{A|3.2} = 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{A|3.3} = 8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aber die gemittelte Temperatur der Messpunkte deutlich tiefer ( $T_{M|3.2} = -8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{M|3.3} = -12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die Abschaltung der Wasserkühlung von TM 3.1 zu 3.2 und die wieder Einschaltung von TM 3.3 zu 3.4 konnten aufzeigen, dass die Wasserkühlung in dieser Anordnung dem gesamten thermischen System des Klima-Windkanals eher wärme zuführte. Die Wassertemperatur von  $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  bzw.  $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  wiesen ebenfalls drauf hin (Kühlaggregat konnte im Idealfall  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreichen).

#### **Technische Änderungen für die TM 3.5 bis 3.10:**

Die Steuereinheit wurde nach den oben angeführten Temperaturmessungen fertiggestellt und installiert. Die Steuerung der Komponenten ermöglichte den vorgesehenen Impeller-Antrieb im Windkanal zu verwenden und die Antriebsleistung zu bestimmen (bisher wurde Lüfter L1 im Windkanal verwendet). Das mangelhafte Peltier-Element für die Probenkühlung wurde durch ein Neuwertiges ersetzt. Temperaturmessungen der Gefrierschränke haben gezeigt, dass der Gefrierschrank 1 (Indest) tiefere Temperaturen erreichen konnte als der Gefrierschrank 2 (Bauknecht). Die Strömungsrichtung im Kühlkanal wurde aufgrund dessen umgekehrt. Der Gefrierschrank 2 wurde nun vor dem Gefrierschrank 1 durchströmt.

Messung	Antrieb WK	Antriebs-KK	Probenkühlung (Strom)	Wasserkühlung	Betriebszeit
TM 3.5	Lüfter (L1)	L3	Aus	Aus	16 h
TM 3.6	Impeller	L3	Aus	Aus	2 h nach TM 3.5
TM 3.7	Impeller	L3 + L2	Aus	Aus	3 h nach TM 3.6
TM 3.8	Lüfter (L1)	L3	Ein (4A)	Aus	18 h
TM 3.9	Lüfter (L1)	L3	Ein (2A)	Aus	3 h nach TM 3.7
TM 3.10	Impeller	L3	Ein (2A)	Aus	3 h nach TM 3.8

Tabelle 3.7: Parameter der Temperaturmessungen 3.5 bis 3.10 (Versuchsaufbau 3).

Ausbaustufe	Kühlkanal			Windkanal		$T_W$
	$T_{KK GF aus}$ $T_{KK WT ein}$	$T_{KK WT aus}$	$T_{KK GF ein}$	$T_{TS}$	$T_{Probe}$	
TM 3.5	$-18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 3.6	$-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 3.7	$-13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 3.8	$-16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
TM 3.9	$-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	n.B.
TM 3.10	$-16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-9.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	n.B.

Tabelle 3.8: Temperaturmessungen 3.5 bis 3.10 im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 3).

**Temperaturmessung 3.5:** Die Messung wurde ohne Wasser- und Probenkühlung nach 16 Stunden Betrieb aufgenommen. Die Temperatur im Windkanal lag bei  $-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  und war damit um rund  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiefer als bei TM 3.3. Die TM 3.3 und 3.5 unterscheiden sich nur durch die veränderte Strömungsrichtung im Kühlkanal.

**Temperaturmessung 3.6:** Für diese Messung wurde der Lüfter im Windkanal durch den eigentlich vorgesehenen effizienteren Impeller-Antrieb ersetzt und mit 10 % Antriebsleistung bei einer Spannung von 14.8 V betrieben. Die Temperatur im Windkanal ist bereits nach 3 h Betrieb um weitere  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  gesunken.

**Temperaturmessung 3.7:** Die Messung wurde für die Bestätigung bereits bekannter Erkenntnisse durchgeführt. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Kühlkanal hatte auch in diesem Versuch keine positiven Auswirkungen.

**Temperaturmessung 3.8:** Für die Messung musste das für den Impeller-Antrieb vorgesehene Netzteil (N1) an das Peltier-Element angeschlossen werden, infolgedessen wurde der Lüfter (L1) erneut als Antrieb im Windkanal eingesetzt. Die Probenkühlung mit angeschlossener Wasserkühlung und dem Peltier-Element, welches einen Strom von 4 A

verbrauchte, konnte den Sensor in der Probenhalterung auf  $-20.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  abkühlen. Die Probenkühlung konnte sich aber nicht auf die Temperatur im Windkanal auswirken.

**Temperaturmessung 3.8:** Das Netzteil (N1) für das Peltier-Element wurde durch ein leistungsschwächeres (N2) mit einem maximalen Ausgangsstrom von 2 A ersetzt, womit der Impeller-Antrieb erneut an das Netzteil (N1) angeschlossen werden konnte. Die Messung TM 3.9 wurde mit 2 A Strom am Peltier-Element und mit dem Lüfter (L1) im Windkanal durchgeführt. Damit konnte das Leistungsdefizit am Peltier-Element aufgezeigt werden. Die Temperatur am Sensor in der Probenhalterung ist nach 3 h Betrieb um  $6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  gestiegen. Das Leistungsdefizit zeigt sich auch im Windkanal,  $T_{TS}$  ist von  $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  gestiegen.

**Temperaturmessung 3.10:** Für die Messung wurde der Impeller-Antrieb wieder verwendet und für 3 h betrieben. Die Strömungsgeschwindigkeit war spürbar höher, wodurch der Wärmeübergang zur Probenkühlung erhöht und die Kühlleistung besser ausgeschöpft wurde. Die Temperatur im Windkanal ist auf  $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  gesunken und die Temperatur am Sensor der Probenhalterung ist im Vergleich zu TM 3.9 um  $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  gestiegen. Insgesamt waren die gemessenen Temperaturen ohne Probenkühlung aber tiefer als jene mit Probenkühlung.

#### Erkenntnisse aus den Temperaturmessungen und Verbesserungsmaßnahmen

Mit dem Versuchsaufbau 3 konnte erstmals die Zieltemperatur im Windkanal von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht werden. Diese wurde bei 10 % Antriebsleistung und somit mit geringer Strömungsgeschwindigkeit erfasst. Mit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, stieg auch die Temperatur im Windkanal. Für den Versuchsaufbau 4 wurden weitere Maßnahmen getroffen, um Effizienz und Kühlleistung zu erhöhen:

1) **Wasserkühlung:** Die Wasserkühlung in der Dämmschicht konnte nicht den gewünschten Effekt erzielen. Eine mögliche Erklärung dafür war, dass die umwickelten PVC-Pneumatikschläuche zu nahe am Wind- bzw. Kühlkanalrohr waren. Betrachtet man eine 8 cm dicke Wand mit einer Außentemperatur von  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Innentemperatur von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , so wird bei einem linearen Temperaturanstieg die Temperatur der Wasserkühlung von  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  nach rund 3 cm erreicht. Die Dämmschicht zwischen Schlauch und Kanalrohr war im Versuchsaufbau 3 rund 3 cm dick, womit die Wasserkühlung, zufolge dem vereinfachten Modell, genau dort lag, wo die Temperatur aufgrund der Windkanalrohr-Temperatur ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bereits auf diesem Niveau lag. Sinkt die Kanalrohr-Temperatur weiter, wie es beim Kühlkanal der Fall war, dann führt die Wasserkühlung dem System Wärme zu. Die Lösung für dieses Problem, ist die Verlegung der PVC-Pneumatikschläuche zu einer weiter außen liegenden Dämmschicht. Beim Versuchsaufbau 4 wird die Reihenfolge der Dämmschichten neu angeordnet. Die angepasste Anordnung ist in Abbildung 3.18 zu sehen.



Abbildung 3.18: Schematische Darstellung der Dämmschichten von Versuchsaufbau 1 bis 4

2) **Kühlspirale:** Im Ringspalt des Wärmetauschers wird für einen Abschnitt von rund 1 m eine zylindrische Spirale bestehend aus einem 8 mm Kupfer-Rohr eingefügt. Diese wird an ein Kühlaggregat, welches von einem zusätzlichem Gefrierschrank stammt, angeschlossen und mit Kältemittel durchströmt. Die Spirale kann damit Temperaturen von bis zu  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreichen. Die zusätzliche Kühlleistung soll die Temperaturegelung agiler gestalten.

### 3.4.4 Versuchsaufbau 4

#### Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen

Für den Einbau der Kühlspirale und für die neue Positionierung der Wasserkühlung wurde der Klima-Windkanal teilweise zerlegt. Das Kupferrohr wurde von der Unterseite des Windkanals bzw. Kühlkanals in den Ringspalt eingeführt. Dort umwickelt es das Windkanalrohr im Ringspalt ähnlich einer Schraubenlinie für eine Länge von rund 1 m und tritt anschließend wieder an der Unterseite aus (siehe Abbildung 3.24). Das Kupferrohr wurde an das Kühlaggregat (Hersteller IRE, Typ L1046) über eine Lötverbindung angeschlossen. Für die Wasserkühlung wurden die Dämmschichten, wie in Abbildung 3.18 dargestellt, neu angeordnet. In der Abbildung 3.20 ist der Versuchsaufbau 4 ohne der äußersten Dämmschicht (Luftpolsterfolie) ersichtlich.



Abbildung 3.19: Einführung der Kühlspirale im Wärmetauscher (Versuchsaufbau 4).



Abbildung 3.20: Versuchsaufbau 4 ohne der äußersten Dämmschicht und mit dem PVC-Pneumatikschlauch für die Wasserkühlung.

#### Temperaturmessungen Versuchsaufbau 4

Der Tabelle 3.9 können die Parameter der Temperaturmessungen 4.1 bis 4.5 entnommen werden. Die Strömung im Windkanal wurde vom Impeller-Antrieb mit 15 % Antriebsleistung bei 14.8 V Nennspannung erzeugt und der Kühlkanal wurde mit Lüfter (L3) in der umgekehrten Strömungsrichtung betrieben. Die Ergebnisse der Temperaturmessungen sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

Messung	Antrieb WK	Gefrierschrank 1 und 2	Kühlspirale	Wasserkühlung (Hülle)	Probenkühlung	Fensterdämmung Testsektion
TM 4.1	15 %	Ein	Aus	Aus	Aus	Nein
TM 4.2	15 %	Ein	Ein	Aus	Aus	Nein
TM 4.3	15 %	Ein	Ein	Ein	Aus	Nein
TM 4.4	15 %	Ein	Ein	Ein	Ein (2A)	Nein
TM 4.5	6 %	Ein	Ein	Ein	Ein (2A)	Ja

Tabelle 3.9: Parameter der Temperaturmessungen 4.1 bis 4.5 (Versuchsaufbau 4).

Aufbau- stufe	Kühlkanal			Windkanal		$T_W$
	$T_{KK GF aus}$ $T_{KK WT ein}$	$T_{KK WT aus}$	$T_{KK GF ein}$	$T_{TS}$	$T_{Probe}$	
TM 4.1	$-19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 4.2	$-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-16.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-15.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	-
TM 4.3	$-20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-13.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$9\text{ }^{\circ}\text{C}$
TM 4.4	$-22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-12.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$	$8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
TM 4.5	$-23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-18.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$	unbekannt

Tabelle 3.10: Ergebnisse der Temperaturmessungen 4.1 bis 4.4 im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 4).

**Temperaturmessung 4.1:** Für die Messung wurden ausschließlich die zwei Gefrierschränke (G1+G2) betrieben. Die Temperatur im Windkanal lag bei  $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  und war damit ähnlich wie beim Versuchsaufbau 3 (TM 3.6). Die TM 3.6 und 4.1 unterscheiden sich durch die stärkere Dämmung (2-3 cm Luftpolsterfolie) und durch die höhere Antriebsleistung (15%) von Versuchsaufbau 4.

**Temperaturmessung 4.2:** Für die Messung wurde zu den zwei Gefrierschränken auch die Kühlspirale im Wärmetauscher betrieben. Die Temperatur in der Testsektion fiel im Vergleich zur TM 4.1 um  $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $-11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Einfluss der Kühlspirale war ebenfalls im Temperaturverlauf des Kühlkanals ersichtlich. Der Temperaturanstieg im Wärmetauscher betrug bei der Messung ohne Kühlspirale  $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  und mit  $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Am Ausgang des Gefrierschranks wurde eine Temperatur von  $-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  erfasst. Die Kühlaggregate waren damit bereits nahe an ihrer Leistungsgrenze, denn die Temperatur der durchströmenden Luft ( $-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) war nicht weit von der Verdampfungstemperatur des Kältemittels (ca.  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) entfernt. Weitere Kühlaggregate in Form von Gefrierschränken würden die thermische Leistung des Klima-Windkanals nur geringfügig verbessern.

**Temperaturmessung 4.3:** Für die Messung wurde zu den Gefrierschränken und der Kühlspirale auch das Kühlaggregat für die Wasserkühlung in der Dämmschicht betrieben. Die neue Positionierung des PVC-Pneumatikschlauchs, zeigte im geringen Ausmaß Wirkung. Die Temperatur im Windkanal lag bei  $-12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  und war damit um  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  tiefer als bei der Messung ohne Wasserkühlung. Die Temperaturen im Kühlkanal sind um  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefallen. Die hohe Kühlleistung des Wasserkühlaggregats konnte aber auch durch die neue Positionierung der PVC-Pneumatikschläuche nicht effizient eingesetzt werden.

Die ungewöhnliche Temperaturdifferenz im Vergleich zur vorhergehenden Messung (TM 4.2) von  $T_{TS}$  und  $T_{Probe}$  war womöglich defekten Temperatursensor im Windkanal ( $T_{TS}$ ) verschuldet. Dieser wurde nach der TM 4.4 durch einen hochwertigeren ersetzt.

**Temperaturmessung 4.4:** Für die Messung wurde zu den bereits aktiven Kühlungen auch die Probenkühlung zugeschaltet, womit alle Kühlsysteme im Betrieb waren. Das Peltier-Element wurde mit einem maximalen Strom von 2 A versorgt (maximaler Strom

des Peltier-Elements:  $I_{max} = 4A$ ). Die Temperatur in der Probenhalterung sank im Vergleich zur vorhergehenden Messung (TM 4.3) um  $2.7\text{ }^{\circ}C$ . Die Temperatur im Windkanal stieg minimal um  $0.2\text{ }^{\circ}C$ . Wie bereits in Kapitel 3.4.3 erwähnt wurde, führt die Probenkühlung auch mit der verbesserten Isolierung mehr Wärme zu als sie entziehen kann. Die Probenkühlung ist damit ein Instrument, um durch Kühlung der Probe die Vereisung lokal zu fördern, aber nicht um den Windkanal zu kühlen.

**Temperaturmessung 4.5:** Mit dieser Messung wurden die bisher tiefsten Temperaturen im Kühl- und Windkanal erreicht. Dafür wurde die Antriebsleistung auf 6 % reduziert und die Fensteröffnungen in der Testsektion mit zusätzlichem Dämmstoff ausgestattet. Mit den Maßnahmen konnte eine Temperatur im Windkanal von  $-14.7\text{ }^{\circ}C$  erreicht werden.

Die Anforderung von mindestens  $-5\text{ }^{\circ}C$  wurden mit dem Versuchsaufbau 4 erfüllt.

#### 3.4.5 Abhängigkeit der Temperatur im Windkanal von der Strömungsgeschwindigkeit

Bei den Temperaturmessungen hatte sich eine starke Abhängigkeit der Temperatur im Windkanal von der Strömungsgeschwindigkeit gezeigt. Diese ist einerseits durch die Wärmeabgabe des Antriebs und andererseits durch den Luftaustausch mit der Umgebung über undichte Stellen zu erklären. Der Anstieg der Temperatur mit steigender Antriebsleistung ist im Diagramm der Abbildung 3.21 ersichtlich. Der Klima-Windkanal wurde bei diesen Messungen von den zwei Gefrierschränken und von der Kühlspirale gekühlt (Parameter der TM 4.2). Die Temperaturen wurden immer dann festgehalten, wenn diese für rund 10 *min* konstant waren. Dies entsprach einer Zeit von rund 2 bis 3 h. Die Temperatur im Windkanal ist bei Erhöhung der Antriebsleistung um 10 % nahezu konstant um rund  $3\text{ }^{\circ}C$  angestiegen. Mit 30 % Antriebsleistung lag die Temperatur in der Testsektion bei  $-4.9\text{ }^{\circ}C$  und war damit knapp unterhalb der in den Anforderungen bestimmten Zieltemperatur ( $-5\text{ }^{\circ}C$ ). Die Strömungsgeschwindigkeit bei 30 % Antriebsleistung mit 14.8 V entspricht rund  $20\frac{m}{s}$ .

Die Differenz zwischen der Temperatur in der Testsektion und der Probenhalterung sinkte mit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von  $1.8\text{ }^{\circ}C$  bei 10 % auf  $1\text{ }^{\circ}C$  bei 40 %. Der Sensor für  $T_{Probe}$  liegt direkt im Luftstrom, der bei jedem Durchlauf im Wärmetauscher gekühlt wurde. Der Sensor für  $T_{WK}$  hingegen liegt oberhalb des Eingangs der Testsektion und wurde somit nicht direkt vom Luftstrom getroffen. Die Sensoren wurden bei Stillstand und Raumtemperatur verglichen und wiesen dabei eine Abweichung von  $0.2\text{ }^{\circ}C$  auf.

### 3 Versuchsaufbau

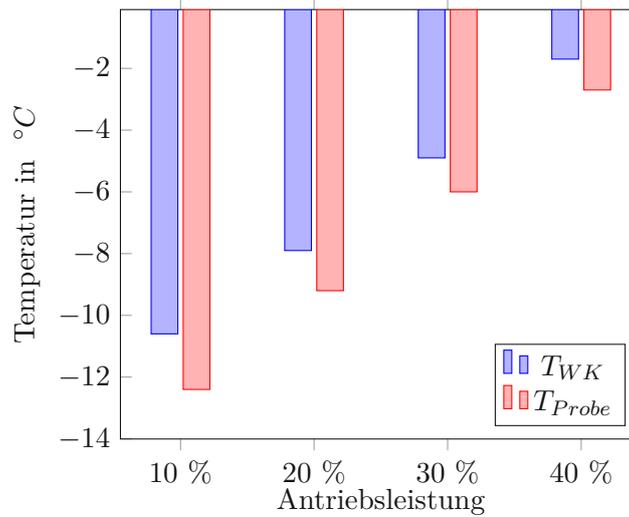


Abbildung 3.21: Diagramm mit der Temperatur in der Testsektion und Probe in Abhängigkeit der Antriebsleistung bei 14.8 V Nennspannung. (Parameter der TM 4.2).

Im Diagramm der Abbildung 3.22 ist der Temperaturverlauf von Wind- und Kühlkanal in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Für die Temperaturmessungen wurde die Antriebsleistung stufenweise im 30 Minuten-Takt um 10 % erhöht. Bei dem Versuch waren alle Kühlaggregate in Betrieb (Parameter der TM 4.4). Im Diagramm ist ersichtlich, wie die Temperaturen im Kühl- und Windkanal mit Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit anstiegen. Die stufenweise Erhöhung der Antriebsleistung ist auch im Temperaturverlauf ersichtlich. Die erste Temperaturmessung nach Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit hatte in der Regel die höchste Temperaturänderung. Der Verlauf flacht bei der zweiten und dritten Temperaturmessung nach Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit tendenziell etwas ab. Dies ist im Diagramm besonders bei 20 %, 30 % und 60 % zu erkennen. Die Temperaturdifferenz zwischen  $T_{Probe}$  und  $T_{WK}$  wurde mit steigender Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit höher. Die Temperatur in der Probenhalterung stieg aufgrund der Kühlung durch das Peltier-Elements weniger stark an, als die Temperatur im Windkanal. Die genaue Position des Temperatursensors in der Probenhalterung kann der Abbildung 3.13 und der technischen Zeichnung im Anhang A entnommen werden.

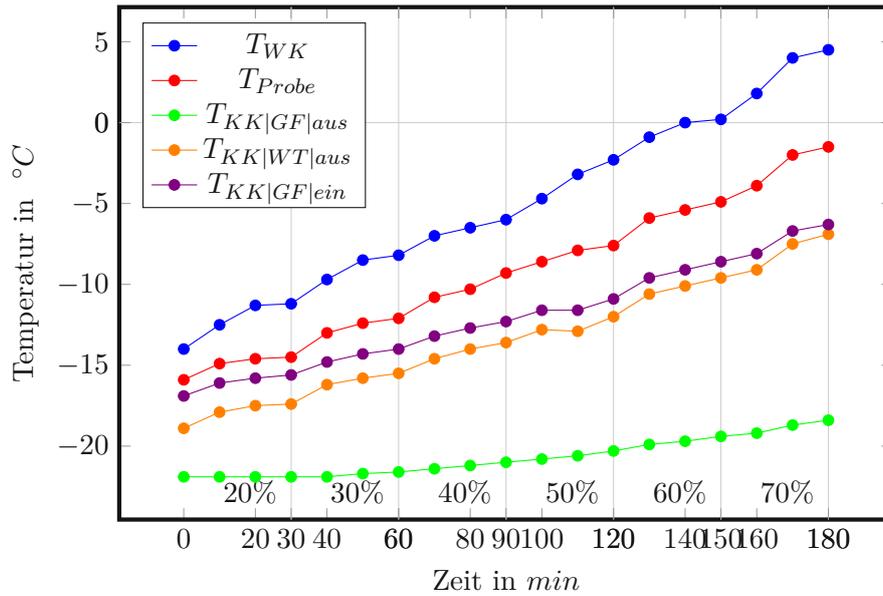


Abbildung 3.22: Diagramm mit dem Temperaturverlauf im Wind- und Kühlkanal bei stufenweiser Erhöhung der Antriebsleistung um 10 % im 30 Minuten-Takt. Temperaturmessung im 10 Minuten-Takt (Parameter der TM 4.4).

### 3.4.6 Einspritzung

Die Einspritzung besteht aus einem Wasserbehälter, einer Wasserpumpe, einem Ventil, einer Zerstäubungsdüse sowie aus diversen Verbindungsrohren und Verschraubungen. Der Aufbau der Einspritzung mit der Anordnung der Komponenten ist in Abbildung 3.23 dargestellt. Mit der Wasserpumpe wird Druck aufgebaut, um das Wasser durch die Zerstäubungsdüse zu befördern und Tröpfchen zu erzeugen. Das Ventil kann von der Steuereinheit zeitlich präzise geöffnet und geschlossen werden. Das waagrechte Rohr, durch welches Wasser zur Zerstäubungsdüse innerhalb des Windkanals geführt wird, wurde mit einem Heizkabel umwickelt um eine Vereisung zu verhindern. In Abbildung 3.24 ist die zeitliche Abfolge der Steuerung der Komponenten beim Einspritzvorgang durch ein Diagramm dargestellt.

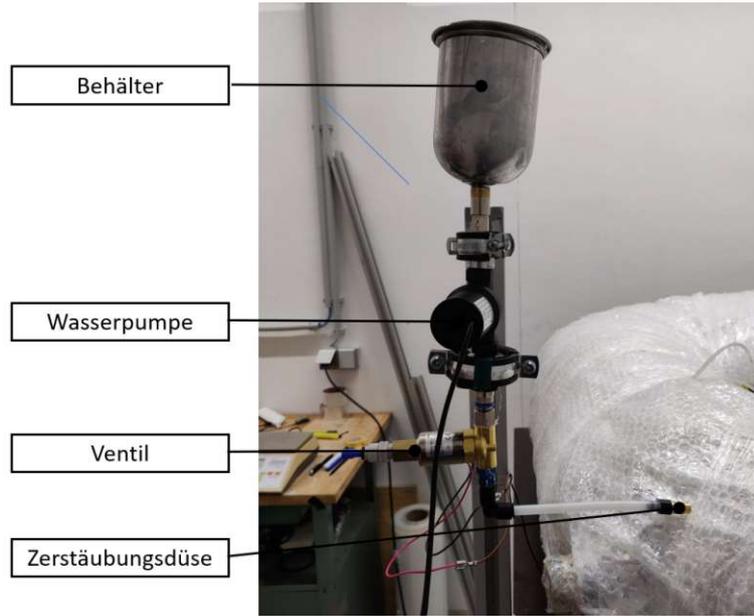


Abbildung 3.23: Aufbau der Einspritzung mit Beschriftung der Komponenten.

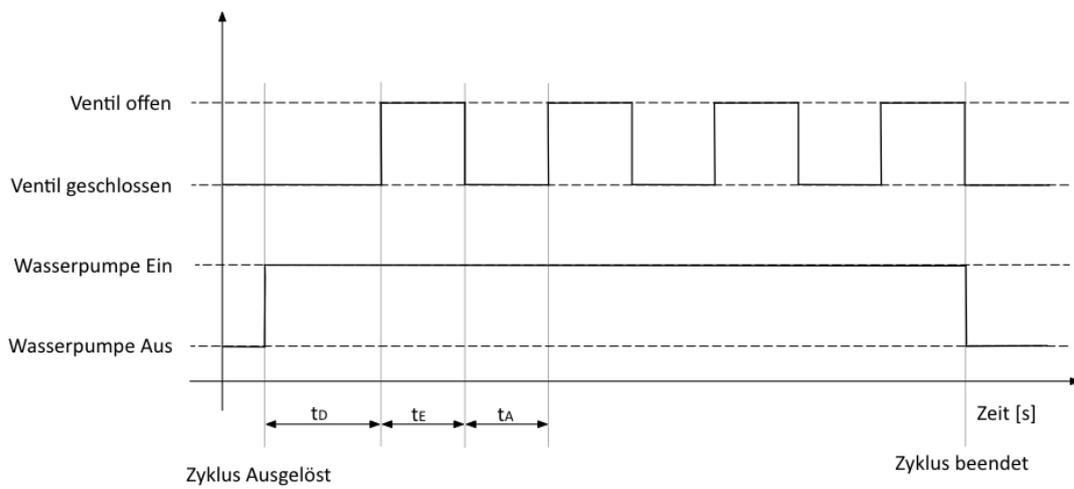


Abbildung 3.24: Zeitlicher Verlauf der Schaltung der Wasserpumpe und des Ventils für die Einspritzung. Nach der Betätigung des Auslösers wird die Wasserpumpe für den Zeitraum  $t_D$  betrieben.  $t_E$  ist der Zeitraum mit offener Ventilstellung und  $t_A$  mit geschlossener Ventilstellung.

#### Untersuchung der Tröpfchenbildung

Die Ein-Stoff-Zerstäubungsdüse nutzt kinetische Energie um Tröpfchen zu erzeugen. Ermöglicht wird dies, durch eine Druckdifferenz, welche eine Beschleunigung der Flüssigkeit zur Folge hat. Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit wird eine turbulente Strömung erzeugt, welche zu einer Zerstäubung der Flüssigkeit führt. Der Zerstäubungsgrad ist vom Bohrungsdurchmesser der Düse abhängig. Im durchgeführten Experiment wurden zur Untersuchung der Tröpfchenbildung folgende Bohrungsdurchmesser der Düse untersucht; 1.8 mm, 2.2 mm, 3.0 mm und 4.0 mm.

Die Düsen mit den Bohrungen 1.4 mm, 1.8 mm und 2.2 mm wiesen ein sehr gutes und gleichmäßig verteiltes Tröpfchenbild auf. Ein Einfluss des Bohrungsdurchmessers auf die Tröpfchengröße war mit freiem Auge nicht eindeutig zu erkennen aber ab dem Bohrungsdurchmesser von 3 mm bildete sich ein unsymmetrisches Zerstäubungsbild. Die Düsen mit einem Bohrungsdurchmesser von 3.0 mm und 4.0 mm sind für den Betrieb mit der Wasserpumpe ungeeignet aber Versuche haben gezeigt, dass nur durch die Schwerkraft regelmäßige vertikal abfallende Tröpfchen erzeugt wurden. Diese könnten möglicherweise unter den Strömungsverhältnissen im Windkanal ein gutes Zerstäubungsverhalten hervorrufen. Für die Bestimmung der Durchflussmenge und der werden folgende Düsen untersucht:

Düse 1: Bohrungsdurchmesser = 1.4 mm, Betrieb mit Wasserpumpe

Düse 2: Bohrungsdurchmesser = 2.2 mm, Betrieb mit Wasserpumpe

Düse 3: Bohrungsdurchmesser = 4.0 mm, Betrieb ohne Wasserpumpe

#### Bestimmung der Durchflussmenge

Die Einspritzung wurde derart positioniert, dass die durchströmende Flüssigkeit in einem Behälter auf einer Präzisionswaage aufgefangen wurde und die Massezunahme erfasst werden konnte. Mit der Durchflusszeit konnte dann auf den Massen- und Volumenstrom der Einspritzung in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers geschlossen werden. Die zeitlichen Parameter wurden über die Steuereinheit definiert.

Aufgrund der Strömungsverhältnisse und der damit verbundenen Druckänderungen im Windkanal kann die Durchflussmenge der Einspritzung im Windkanal von der erfassten Durchflussmenge im strömungsfreien Raum abweichen.

Die folgenden Messungen wurden zur Bestimmung der Durchflussmenge bei befülltem und geleertem Schlauchabschnitt zwischen Ventil und Zerstäubungsdüse durchgeführt. Wird die Einspritzung nach Trockenlegung das erste Mal betrieben, muss der Schlauch erst befüllt werden, bis die Flüssigkeit zur Zerstäubungsdüse gelangt. Dies kann eine Verzögerung hervorrufen, welche mit den folgenden Messungen erfasst werden soll. Der betroffene Schlauchabschnitt wurde vor jeder Einspritzung entleert, wobei Wassermasse im befüllten Schlauch beträgt 7 g. Die Einspritzung wurde für diese Messreihe für 3 s betrieben. Die Ergebnisse der Durchflussmessung sind in Tabelle 3.11 zu finden.

### 3 Versuchsaufbau

Schlauchabschnitt	befüllt	geleert
Messung 1	5 g	6 g
Messung 2	5 g	5 g
Messung 3	5 g	5 g
Mittelwert	5 g	5.33 g

Tabelle 3.11: Messung der Durchflussmenge bei geleertem und gefülltem Schlauchabschnitt zwischen Zerstäubungsdüse und Ventil. Messung erfolgte mit 3 s Durchflusszeit und mit Düse 1.

Mit dem befüllten Schlauchabschnitt wurde entgegen der Erwartung, im Durchschnitt 0.33 g weniger Wassermasse erfasst. Der geleerte Schlauchabschnitt hatte sich derart schnell gefüllt, dass andere Einflussparameter des Messverfahrens wie die Zeitschaltung des Ventils oder die möglicherweise schwankende Druckerzeugung der Wasserpumpe den größeren Einfluss auf die Durchflussmenge hatten.

Zur Bestimmung der Durchflussmenge in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers der Zerstäubungsdüse wurden weitere Messungen durchgeführt und erneut eine Durchflusszeit von 3 s gewählt. Die Ergebnisse der untersuchten Düsen 1, 2 und 3 sind in Tabelle 3.12 zusammengefasst. Die Ergebnisse von weiteren untersuchten Düsen sind im Anhang G zu finden.

	Düse 1	Düse 2	Düse 3
Düsenöffnung	1.4 mm	2.2 mm	4 mm
Wasserpumpe	Ein	Ein	Aus
Messung 1	5 g	8 g	3 g
Messung 2	5 g	8 g	3 g
Messung 3	5 g	8 g	3 g
Durchfluss	1.67 g/s	2.67 g/s	1 g/s

Tabelle 3.12: Messung der Durchflussmenge in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers der Zerstäubungsdüse mit/ohne Betrieb der Wasserpumpe.

#### Aufnahme der Tröpfchenverteilung

Die Aufnahme der Tröpfchenverteilung soll Aufschluss über die Größe, Anzahl und Verteilung der Wassertröpfchen in Abhängigkeit der verwendeten Zerstäubungsdüse und der Strömungsgeschwindigkeit geben. Für die Versuche wurde das Wasser mit blauer Lebensmittelfarbe eingefärbt. In der Testsektion wurde rund 8 cm von der Einströmdüse entfernt eine Halterung eingebaut, an der eine 100 mm x 100 mm x 4 mm PVC-Platte vertikal eingespannt werden konnte. Die Wassertröpfchen trafen in der Testsektion auf die weiße Fläche und erzeugten damit ein Abbild der Tröpfchenverteilung. Der Aufbau in der Testsektion ist in Abbildung 3.27 ersichtlich.

### 3 Versuchsaufbau

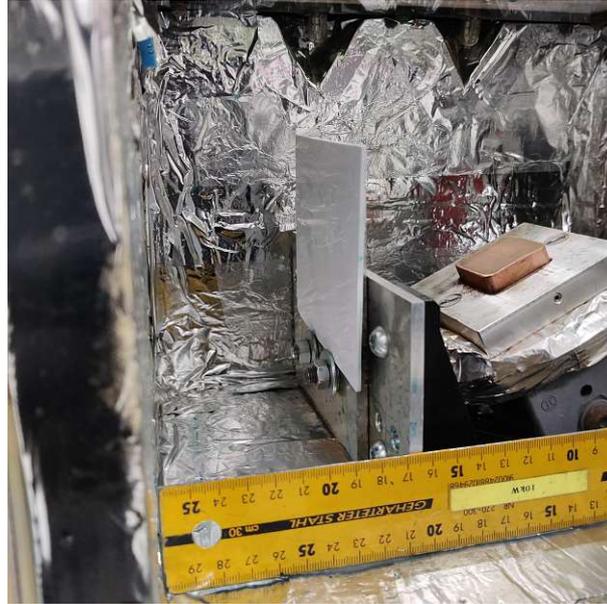


Abbildung 3.25: Aufbau der Testsektion mit der Halterung und der eingespannten Probe für die Aufnahme der Tröpfchenverteilung.

Für die Versuche wurde der Klima-Windkanal ohne Kühlung betrieben, womit im Windkanal Umgebungstemperatur ( $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) herrschte. Nach dem Einspannen der Probe wurde die Testsektion geschlossen, der Antrieb im Windkanal hochgefahren und die Einspritzung betätigt. Die Probe konnte nachdem das Tröpfchenbild erzeugt und der Antrieb abgestellt wurde aus der Testsektion entnommen werden. Mittels Smartphone-Kamera wurde eine Aufnahme unter konstanten Lichtverhältnissen und unveränderter Kameraposition getätigt. Die Aufnahmen wurden mit der Bildanalyse- und Bildbearbeitungssoftware "ImageJ" ausgewertet, indem mit der Funktion "Color Threshold" ein Filter für Farbe, Helligkeit und Kontrast eingesetzt wurde. Die blauen Wassertropfen auf der weißen Oberfläche konnten so von der Software erfasst werden. Die Auswertung durch die Funktion "Analyze Particles" ergab den Mittelwert und die Varianz des Tröpfchenradius sowie die Anzahl der Tröpfchen. Es wurde jeweils eine Aufnahme der Tröpfchenverteilung mit 25 %, 50 % und 75 % der Antriebsleistung bei 14.8 V Nennspannung aufgenommen. Dies entsprach einer Strömungsgeschwindigkeit am Eingang der Testsektion von  $17.5\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $25.9\frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $31\frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Es wurden Düse 1 mit einer Durchflusszeit von 3 s, Düse 2 mit 2 s und Düse 3 mit 5 s getestet. Mit jeder Düse wurde gemäß der Durchflussmessungen eine Wassermasse von 5 g in den Windkanal eingeleitet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.26 dargestellt.

### 3 Versuchsaufbau

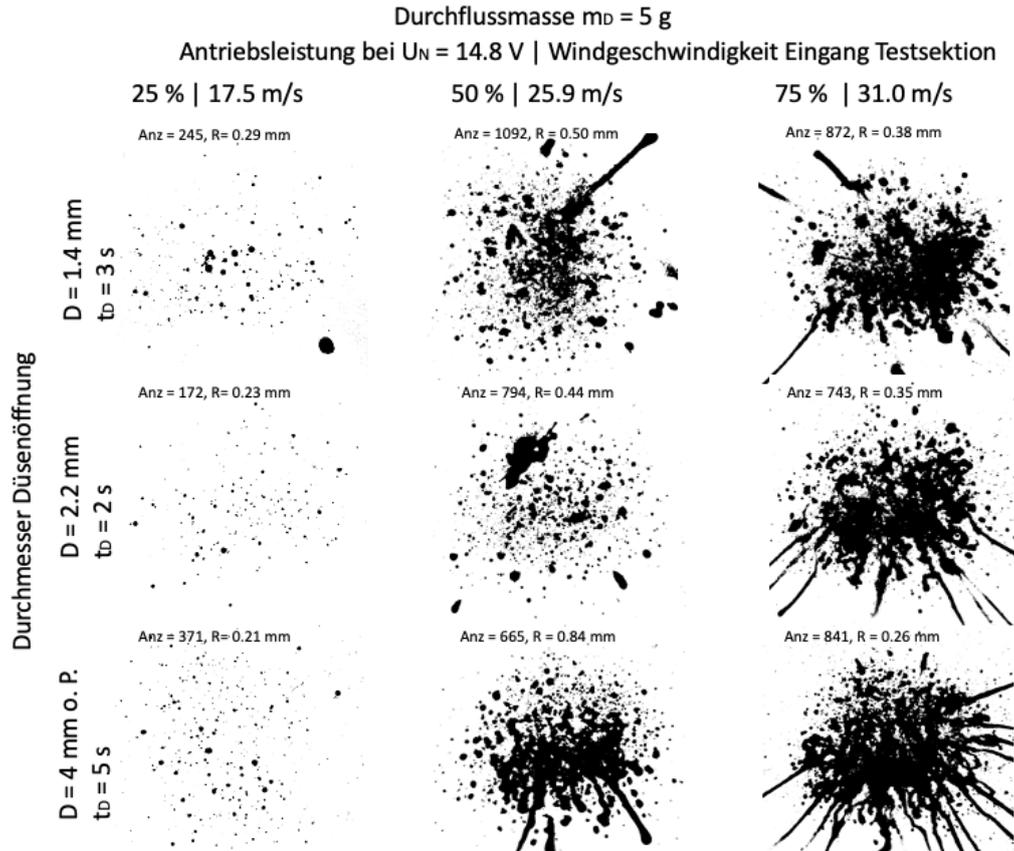


Abbildung 3.26: Tröpfchenverteilung in Abhängigkeit der Antriebsleistung und Öffnungsbohrung der Zerstäubungsdüse. Versuchsreihe mit einer eingespritzten Wassermasse von 5 g.

Betrachtet man die Matrix der Abbildung 3.26 mit den ausgewerteten Aufnahmen der Tröpfchenverteilung von links nach rechts, ist eine deutliche Steigerung der schwarzen Fläche ersichtlich. Erwartungsgemäß gelangen mit steigender Strömungsgeschwindigkeit mehr Tröpfchen von der Einspritzung bis in die Testsektion. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit verringert sich die Flugzeit der Tröpfchen, wodurch der vertikale Anteil der Flugbahn verringert wird.

Die Partikelanalyse ergab eine ähnliche Tendenz. Die erfasste Anzahl der Tröpfchen stieg von 25 % auf 50 % Antriebsleistung um das Zwei- bis Fünffache aber von 50 % auf 75 % wurden keine einheitliche Änderung der Tröpfchenanzahl erfasst. Damit ein Tröpfchen von der Software erfasst wird, ist eine runde oder elliptische Form notwendig. Durch die hohe Anzahl an Tröpfchen in Spalte zwei und drei waren diese teilweise zusammenhängend und ergaben damit keine runde oder elliptische Form. Ein Großteil der zusammenhängenden Tröpfchen wurde dadurch nicht erfasst und der Messfehler vergrößert. Der durchschnittliche Tröpfchenradius stieg ebenso von 25 % auf 50 % Antriebsleistung an, fiel dann aber wieder tendenziell bei 75 % ab. Dies ist ebenso der fehlerbehafteten Ana-

### 3 Versuchsaufbau

lyse verschuldet. Der Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Düsendurchmesser führte zu keinen eindeutigen Erkenntnisse. Die Anzahl der erfassten Tröpfchen war bei allen drei Bohrungen bei 25 % und 75 % Antriebsleistung ähnlich. Bei 50 % Antriebsleistung hatte die Probe mit  $D = 2.2 \text{ mm}$  weniger Flüssigkeit an der Oberfläche. Mit diesem Versuch konnte somit kein Einfluss der Düsenöffnung auf den Radius oder die Verteilung der Wassertröpfchen erfasst werden.

Es wurde eine weitere Versuchsreihe mit einer Einspritzzeit von 1 s mit alle drei Düsen durchgeführt. Durch die verringerte Wassermasse, sollte die Tröpfchenverteilung bei hoher Strömungsgeschwindigkeit besser abgebildet werden.

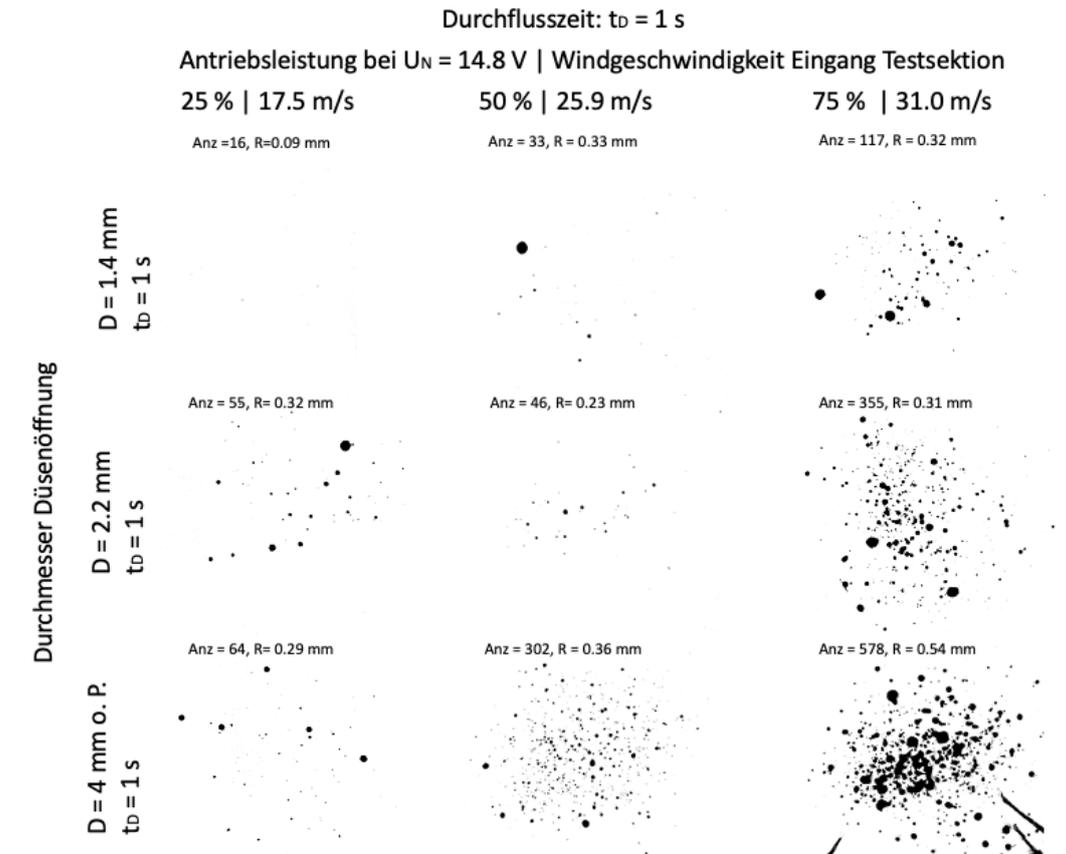


Abbildung 3.27: Tröpfchenverteilung in Abhängigkeit der Antriebsleistung und Öffnungsbohrung der Zerstäubungsdüse. Versuchsreihe mit einer Einspritzzeit von 1 s.

In Abbildung 3.27 sind Aufnahmen der Tröpfchenverteilung mit einer Einspritzzeit von 1 s dargestellt. Die Tröpfchen wurden durch die geringere Wassermasse besser abgebildet und die Auswertung mittels Bildanalyse führte zu plausibleren Ergebnissen. Es war erneut mit freiem Auge sichtbar, dass die Wassermenge und die Anzahl der Tröpfchen mit der Strömungsgeschwindigkeit stiegen. Die Ergebnisse der Bildanalyse bestätigten

diesen Trend. Der Tröpfchenradius und die Anzahl der Tröpfchen stiegen tendenziell von links nach rechts an. Der durchschnittliche Tröpfchenradius wurde von der Analyse zwischen 0.09 mm und 0.54 mm erfasst. In Abhängigkeit der Düsenöffnung oder der Antriebsleistung war kein charakteristisches Verhalten des Tröpfchen Radius zu erkennen. Vergleicht man die Spalten miteinander, ist bei  $D = 4$  mm (Einspritzung ohne Wasserpumpe) zu erkennen, dass mehr Wasser zur Probe gelangt ist als bei Düse 2 und 1. Dies ist auch an der durchschnittlich höchsten Anzahl der Tröpfchen bei  $D = 4$  mm von der Analyse erfasst worden. Die Ergebnisse der Durchflussmessung ergaben für diese Düse aber den geringsten Massenstrom. Die Durchflussmessungen wurden, im Gegensatz zur Positionierung im Windkanal, im strömungsfreien Raum durchgeführt. Aufgrund der Strömungsverhältnisse und dem dadurch verursachten Unterdruck unmittelbar an der Düsenöffnung, wurde Wasser aus der Zuleitung gesaugt und der Massenstrom erhöht.

#### 3.4.7 Steuereinheit

Die Steuerung des Klima-Windkanals wurde in einem Gehäusekasten nach dem Plan im Anhang B integriert. In diesem wurde ein 24 V Netzteil (1) installiert, welches den Arduino MEGA (2) über einen Gleichspannungswandler (3) mit 12 V Spannung versorgt. Das Netzteil wird über einen IEC-Steckverbinder mit Wippschalter (4) an das 230 V Stromnetz angeschlossen. Neben dem Arduino MEGA befindet sich eine Lochplatine (5), in welche diverse Widerstände, Kondensatoren und Steckverbindungen verlötet wurden. Die Eingabekomponenten an der Oberseite des Gehäusekastens, führen zur Lochplatine und von dieser zum Arduino MEGA. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein Relais-Modul (6), welches die angesteuerten Komponenten wie Einspritzung, Kühlung und Licht im Windkanal schaltet.

Am Deckel des Gehäusekastens wurden die Bedienelemente installiert. Die Eingabe erfolgt über vier Druckknopftasten, zwei Drehgeber und zwei Kippschalter. Die Ausgabe erfolgt über ein 3.5 Zoll LCD-Display. Mit dem Drehgeber und den Druckknopftasten links vom Display können die temperaturabhängigen Einstellungen vorgenommen werden und mit den Bedienelementen an der rechten Seite können, Einstellungen für die Einspritzung vorgenommen werden. Am Potentiometer unterhalb des Displays wird die Leistung des Impeller-Antriebs im Windkanal gesteuert. Die Kippschalter im unteren Bereich des Gehäusekastens schalten das Licht in der Testsektion und das Heizkabel für die Einspritzung.

### 3 Versuchsaufbau

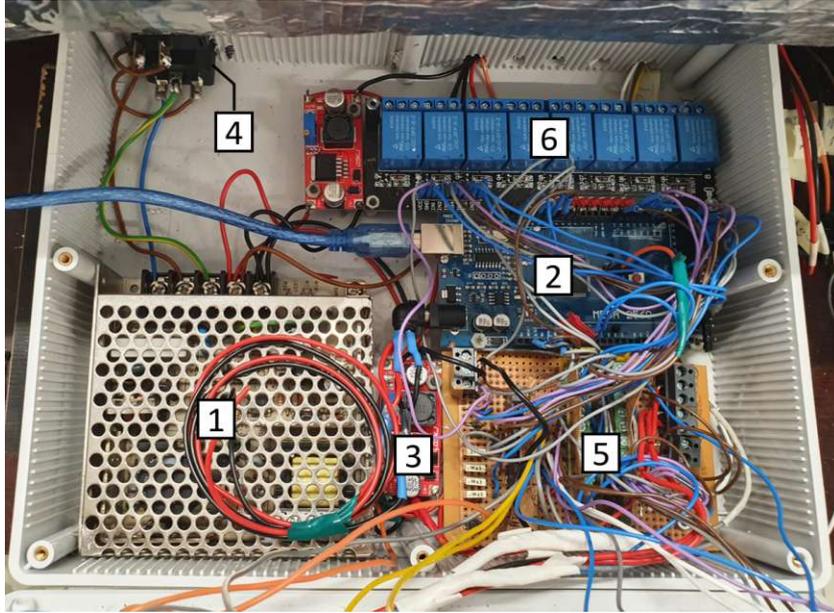


Abbildung 3.28: Gehäusekasten der Steuerung von Innen. Komponenten: (1) 24 V Netzteil, (2) Arduino MEGA, (3) Inverswandler, (4) IEC-Steckverbinder mit Wippschalter, (5) Lochplatine mit elektronischen Bauelementen, (6) Relais-Modul.

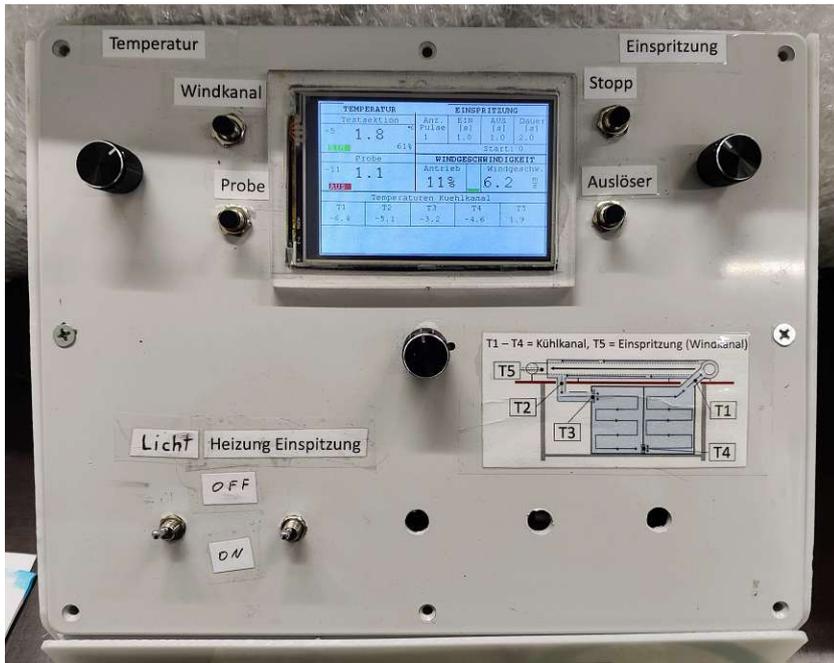


Abbildung 3.29: Gehäusekasten der Steuerung von außen mit den Ein- und Ausgabeelementen.

Am Display der Steuereinheit (3.30) können alle relevanten Informationen über Temperatur, Kühlung, Einspritzung und Antrieb vom Klima-Windkanal abgelesen werden. Im oberen linken Teil sind die Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit im Windkanal bzw. in der Testsektion und die Temperatur der Probenhalterung abzulesen. Im Abschnitt für die Testsektion können (bezogen auf die Momentaufnahme in Abbildung 4.29) drei Werte abgelesen werden. Der Wert rechts unten (71 %) beziffert die relative Luftfeuchtigkeit in der Testsektion, der zentrale Wert (-7.9) ist die gemessene Temperatur in der Testsektion und der Wert links oben (-7) ist die Regeltemperatur, welche über den Drehgeber links vom Display eingestellt werden kann. Unten links im Abschnitt der Testsektion ist noch die Information "AUTO" und "AUS" abgebildet. Mit "AUTO" wird der Kühlmodus beschrieben (automatische Temperaturregelung). Ist diese Funktion aktiviert, wird die Temperatur im Windkanal bzw. in der Testsektion nach der Regeltemperatur geregelt. Dies bedeutet, dass bei einer Regeltemperatur von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  wird die Kühlung bis  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  betrieben. Die Regelung funktioniert über das Ein- und Ausschalten des Relais, an dem die Kühlaggregate angeschlossen sind. Neben dem "AUTO" ist der Schriftzug "AUS" angeführt. Dieser gibt Auskunft über den Status der zur Regelung verwendeten Kühlaggregate (eingeschaltet oder ausgeschaltet). Der Kühlmodus kann des Weiteren noch auf "EIN" und "AUS" gestellt werden. Damit sind die Kühlaggregate dauerhaft ein- oder ausgeschaltet. Dieser Aufbau wiederholt sich (abgesehen von der relativen Luftfeuchtigkeit) im darunterliegenden Abschnitt für die Probe bzw. Probenkühlung. Die Regelung oder Steuerung der Kühlung kann über die Taster links vom Bildschirm bestimmt werden. Der obere Taster ist der Testsektion, der untere der Probe zugeordnet. Weiter unten im Display sind die Temperaturen im Kühlkanal und in der Einspritzung mit der Beschriftung T1 bis T5 abzulesen. An der rechten Seite werden oben die Parameter für die Einspritzung angegeben und rechts zentral sind jene Angaben zu finden, welche die Strömungsgeschwindigkeit bzw. den Antrieb betreffen. Die Einspritzung wird durch Öffnen und Schließen des elektromagnetischen Ventils gesteuert. Mit der Steuerung kann eingestellt werden, wie oft und in welchem Zeitabstand das Ventil geöffnet bzw. geschlossen wird. Im Display wird eine Öffnungs- und Schließperiode als Puls bezeichnet. Im linken oberen Feld kann die Anzahl der Pulse eingestellt werden. Rechts davon befindet sich das Feld mit der Beschriftung "EIN", in dem die Öffnungszeit des Ventils einer Periode bestimmt wird. Selbiges gilt für das rechts liegende Feld "AUS". Die Parameter der Einspritzung können über den Drehgeber rechts vom Display eingestellt werden. Der darunterliegende Abschnitt (rechts unten) für die Strömungsgeschwindigkeit gibt die abgerufene Leistung des Impeller-Antriebs in Prozent an und die mit Pitot-Rohr und den Differentialdrucksensor gemessene Strömungsgeschwindigkeit. Die Antriebsleistung wird mit dem Potentiometer, der sich unterhalb des Displays befindet, gesteuert.

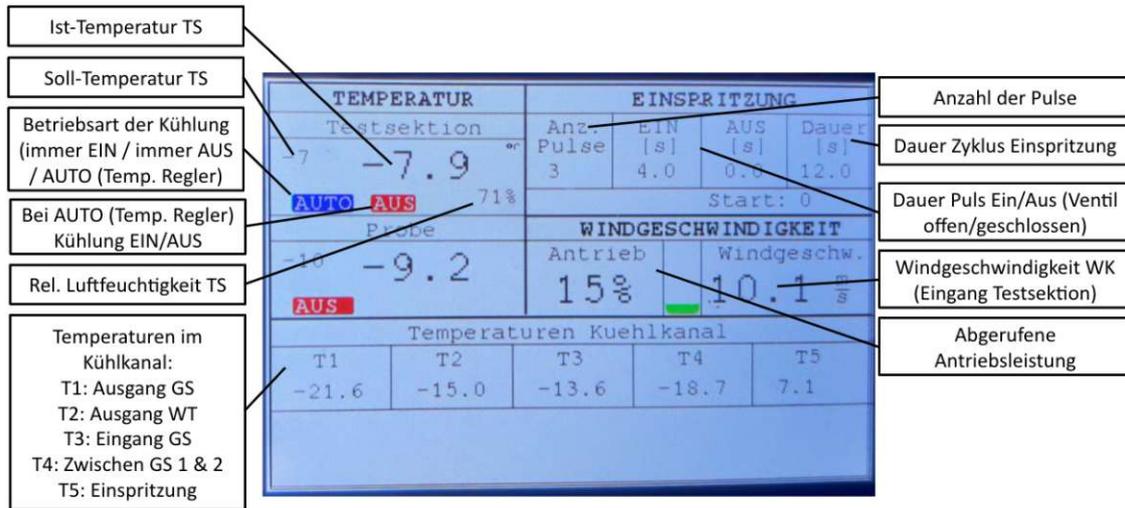


Abbildung 3.30: Display der Steuereinheit mit Informationen über die Temperaturen, die Luftfeuchtigkeit, die Leistung des Impeller Antriebes, die Strömungsgeschwindigkeit, den Status der Kühlung und über die Einspritzung.

### 3.4.8 Kalibrierung des Geschwindigkeitssensors

Der Differentialdrucksensor wird mit dem Arduino über die Funktion `analogRead()` ausgelesen. Die Eingangsspannungen zwischen 0 V und 5 V wird damit auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1023 interpoliert. Im Arduino Code wird die Eingangsspannung durch die im Datenblatt des Sensors angegebene Transferfunktion

$$V_{out} = V_S \cdot (0.2 \cdot P(kPa) + 0.5) \pm 6.25 \%V_{FSS} \quad (3.13)$$

mit  $V_S = 5.0 \text{ V}$  und  $\%V_{FSS} = 0$  auf den Druck  $P$  in  $kPa$  umgerechnet. Mit  $\%V_{FSS}$  wird in der Transferfunktion die mögliche Abweichung vom Mittelwert berücksichtigt. Dieser Term wird vernachlässigt da mögliche Abweichungen durch die Kalibrierung des Sensors berücksichtigt werden können. Mit dem Druck  $P$  kann über die Formel 3.12 auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Im Windkanal wurde das Pitot-Rohr zunächst vor dem Impeller-Antrieb positioniert. Die Messergebnisse waren dabei nicht nachvollziehbar. Mit steigender Antriebsleistung konnte nur eine sehr geringe Änderung im Differentialdruck gemessen werden. Eine mögliche Erklärung ist der Unterdruck, der vor Impeller-Antrieb erzeugt wurde. Eine neue Positionierung des Pitot-Rohrs nach dem Impeller-Antrieb konnte das Problem lösen.

Die vom Pitot-Rohr erfasste Strömungsgeschwindigkeit wurde mit einem Anemometer abgeglichen. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Testsektion wurde mit dem Anemometer an zwei Punkten gemessen - bei der Einströmdüse (Eingang der Testsektion) ( $D = 60 \text{ mm}$ ) und 8 cm nach der Einströmdüse (bei der Probe). Die Antriebsleistung wurde in 10 % Schritten von 10 % auf 100 % erhöht (bei 14.8 V Nennspannung). Die

erfassten Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 3.31 dargestellt.

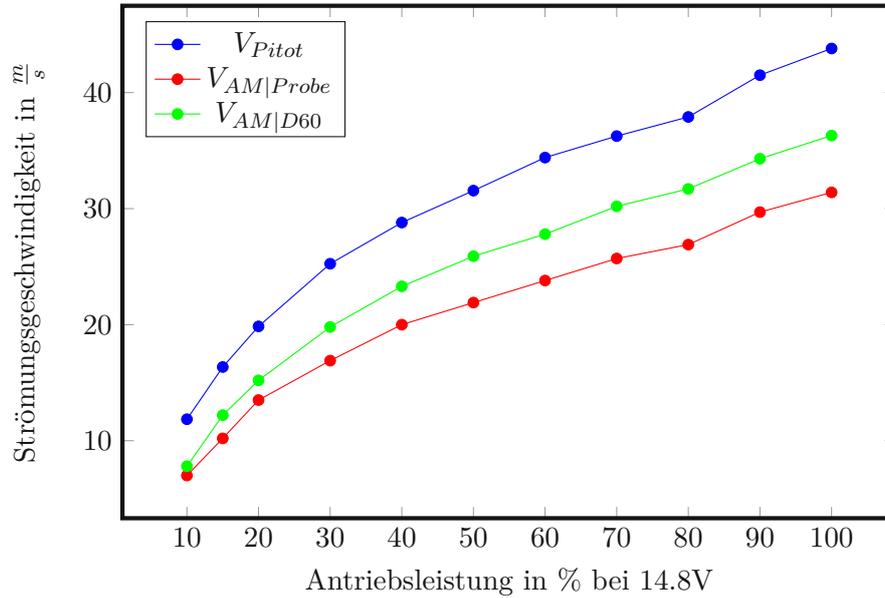


Abbildung 3.31: Diagramm mit der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Antriebsleistung bei 14.8 V Nennspannung.  $V_{Pitot}$  wurde mit dem Pitot-Rohr und  $V_{AM|Probe}$  und  $V_{AM|D60}$  wurden mit dem Anemometer gemessen. Bei  $V_{AM|D60}$  wurde das Anemometer unmittelbar nach der Einströmdüse (Eingang Testsektion) positioniert und bei  $V_{AM|Probe}$  es 8 cm nach der Einströmdüse (bei der Probe) positioniert.

Am Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit in der Abbildung 3.31 ist ersichtlich, dass mit dem Pitot-Rohr höhere Werte als mit dem Anemometer erfasst wurden. Die Abweichung der Messsysteme war einerseits auf die fehlende Kalibrierung des Pitot-Rohrs zurückzuführen aber auch auf die unterschiedliche Position im Windkanal. Für die weiteren Untersuchungen wurde die Strömungsgeschwindigkeit beim Eingang in die Testsektion ( $V_{AM|D60}$ ) als Referenz für das Pitot-Rohr verwendet. Die Abweichung der Messergebnisse von  $V_{Pitot}$  zu  $V_{AM|D60}$  war annähernd linear ansteigend. Es wurde daher die Differenz der zwei Messungen gebildet und mittels einer linearen Regression eine Funktion ermittelt, welche eine Annäherung der Abweichung darstellt. Die ermittelte Funktion  $V_{korr}(V_{Pitot})$  wird von  $V_{Pitot}$  subtrahiert. Die korrigierte Funktion der Strömungsgeschwindigkeit lautet wie folgt:

$$V_{Pitot|korr} = V_{Pitot} - V_{korr}(V_{Pitot}) = V_{Pitot} - (0.106 \cdot V_{Pitot} + 2.5706) \quad (3.14)$$

In der Abbildung 3.32 ist der Verlauf der korrigierten Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Die Abweichung zu  $V_{AM|D60}$  liegt zwischen  $-0.39 \frac{m}{s}$  und  $0.38 \frac{m}{s}$  und ist damit

### 3 Versuchsaufbau

akzeptabel. Die Genauigkeit des Anemometers liegt gemäß dem Hersteller bei  $\pm 3\%$ . Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $30 \frac{m}{s}$  kann demzufolge eine Abweichung von bis zu  $\pm 1 \frac{m}{s}$  auftreten. Detaillierte Messergebnisse der Strömungsgeschwindigkeit sind im Anhang D zu finden.

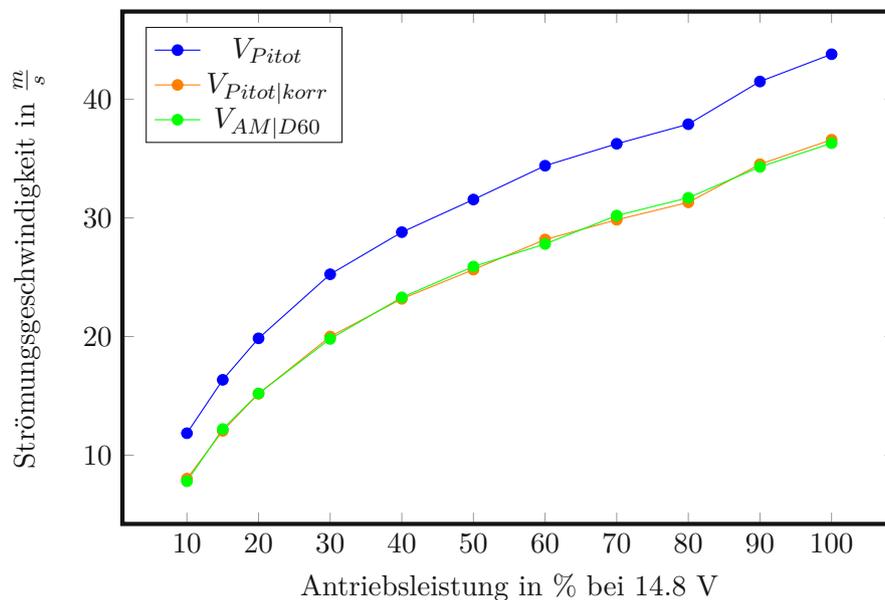


Abbildung 3.32: Mit dem Anemometer erfasste Strömungsgeschwindigkeit am Eingang der Testsektion  $V_{AM|D60}$ , mit dem Pitot-Rohr erfasste Strömungsgeschwindigkeiten  $V_{Pitot}$  und die mittels Korrekturfunktion angepasste Strömungsgeschwindigkeit  $V_{Pitot|korr}$ .

Nach Kalibrierung des Pitot-Rohrs wurde der Klima-Windkanal auf die maximal erreichbare Strömungsgeschwindigkeit getestet. Mit einer Nennspannung von 22.2 V und einer Stromstärke von 80 A, wurde mit dem Pitot-Rohr eine Strömungsgeschwindigkeit von  $52.4 \frac{m}{s}$  gemessen.

## 4 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird die Durchführung einer Versuchsreihe mit dem Klima-Windkanal zur Untersuchung der Anti-Icing Eigenschaften von zwei laserstrukturierten Oberflächen beschrieben und die Ergebnisse festgehalten. Die Versuche sollten aufzeigen, ob eine Vereisung der Oberfläche mit dem Klima-Windkanal möglich ist und wie diese bewertet werden könnte. Aufbauend auf den Ergebnissen könnte auf weitere Verbesserungsmaßnahmen der Versuchsdurchführung geschlossen werden.

### 4.1 Fertigung der strukturierten hydrophoben Oberflächen

Die Strukturierung der Proben erfolgte mit einem Ti:Saphir (Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Festkörperlaser (Femtopower Compact Pro). Dieser arbeitet mit einer Repetitionsrate von 1 kHz und emittiert dabei 30 fs-Pulse bei einer zentralen Wellenlänge von  $\lambda = 800 \text{ nm}$  und einer Bandbreite von 100 nm. Der Laser liefert eine Strahlung mit einer mittleren Ausgangsleistung von 800 mW und einer maximalen Einzelpulsenergie von 0.8 mJ. Aufgrund seines internen Aufbaus war die Ausgangsstrahlung linear polarisiert. Zur Einstellung der Laserfluenz auf der Probenoberfläche wurde ein variabler optischer Abschwächer verwendet. Die Fokussierung erfolgte mittels einer Linse mit einer Brennweite von  $f = 100 \text{ mm}$ . Die Bearbeitungsparameter der Laserstrukturierung sind in Tabelle 4.1 zu finden und eine Aufnahme während der Bearbeitung der Oberfläche ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

Benennung Probe	Oberflächenstruktur	Vorschub [mm/s]	Bahnabstand [ $\mu\text{m}$ ]	Mittlere Leistung [mW]	Fluenz [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	Pulszahl N	Fokussdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]
Probe 1	Geschliffen	-	-	-	-	-	-
Probe 2	LIPSS	8.3	160	200	0.41	30.12	250
Probe 3	Mikrostruktur	5	100	430	8.55	16	80

Tabelle 4.1: Parameter bei der Strukturierung der Probenoberflächen mit dem Ti:Saphir Femtosekundenlaser.

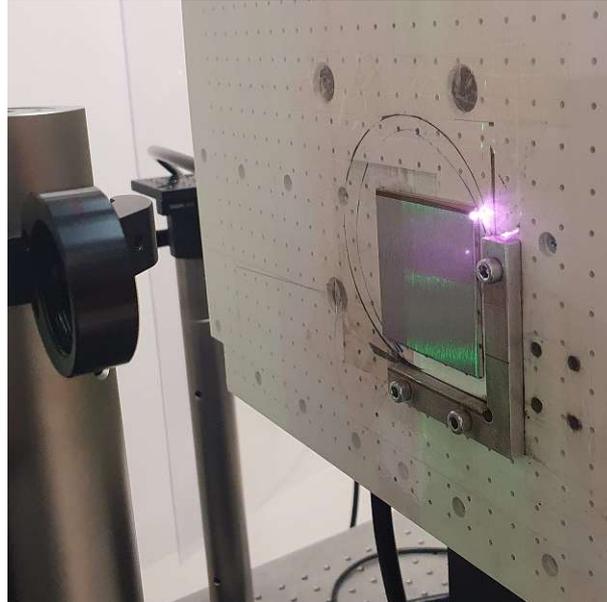


Abbildung 4.1: Aufnahmen während der Laserstrukturierung der Probenoberfläche mit dem Ti:Saphir Femtosekundenlaser.

## 4.2 Kontaktwinkelmessung der Probenoberfläche

An den Proben wurde zur Charakterisierung der Benetzbarkeit eine statische Kontaktwinkelmessung durchgeführt. In Abbildung 4.2 ist die Messung des Kontaktwinkels mit dem optischen Kontaktwinkelsonometer des Herstellers „DataPhysics Instruments GmbH“ ersichtlich. Mit einer Dosiervorrichtung wurde ein vordefiniertes Volumen an Wasser ( $10 \mu\text{l}$ ) auf die Probe aufgesetzt. Der auf der Probenoberfläche aufliegende Tropfen wurde mit einer Kamera erfasst und mit Hilfe einer Software wurde am Dreiphasenpunkt der Winkel zwischen der Probenoberfläche und der Tangente an der Tropfenoberfläche ermittelt. Die Messung wurde drei Mal pro Probe durchgeführt und die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst (detaillierte Messergebnisse sind im Anhang E). Die Oberfläche der strukturierten Proben 2 und 3 können mit einem Kontaktwinkel von ca.  $150^\circ$  als superhydrophob bezeichnet werden. An der geschliffenen Oberfläche der Probe 1 wurde ein Kontaktwinkel von  $82^\circ$  gemessen.

Messung	Probe 1 (geschliffen)	Probe 2 (LIPSS)	Probe 3 (Mikrostr.)
1	$81^\circ$	$151^\circ$	$149^\circ$
2	$81^\circ$	$153^\circ$	$135^\circ$
3	$85^\circ$	$153^\circ$	$150^\circ$
Mittelwert	$82^\circ$	$153^\circ$	$145^\circ$

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung.

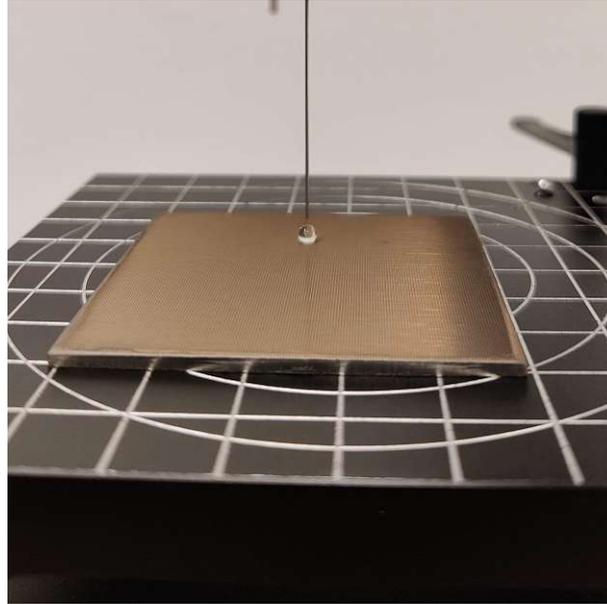


Abbildung 4.2: Aufnahmen der Kontaktwinkelmessung an Probe 2 mittels Kontaktwinkelsonometer.

### 4.3 Durchführung der Versuche

Für die Versuchsdurchführung wurde am Klima-Windkanal ein Setup aufgebaut, welches Aufnahmen mittels einer Highspeed-Kamera und gravimetrische Messungen der Proben ermöglichte. Es wurden 2 Versuchsreihen mit je 9 Versuchen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurde die Vereisung an der Oberfläche der Proben 1, 2 und 3 bei konstanten Parametern untersucht und in der zweiten wurde die Vereisung an der Oberfläche der Probe 3 mit steigender Einspritzdauer betrachtet.

#### Bestimmung der Versuchsparameter

Die Versuchsparameter wurden wie folgt gewählt:

Windgeschwindigkeit:  $33.4 \frac{m}{s}$  (75 % Antriebsleistung bei 14.8V)

Temperatur im Windkanal:  $-7 \text{ }^{\circ}C$  bis  $-8 \text{ }^{\circ}C$  zum Zeitpunkt der Einspritzung

Probenkühlung: Aus

Dauer der Einspritzung: 8 s (entspricht rund 13 g Wasser)

Düse der Einspritzung: Düse 1

Winkel der Probenoberfläche zur horizontalen Linie:  $27^{\circ}$

Wassertemperatur der Einspritzung:  $0 \text{ }^{\circ}C$  bis  $3 \text{ }^{\circ}C$

### 4.3.1 Ablauf der Versuchsdurchführung

#### Probenpräparation:

Die Proben wurden mittels doppelseitigem Klebeband auf den abnehmbaren Kupferblock (Probenaufsatz) angebracht. Zur Erfassung der Eismasse wurde eine Referenzmessung durchgeführt.

#### Präparation des Klima-Windkanals:

##### Ablauf des Versuches:

Schritt 1: Akklimatisierung der Probe in der Testsektion für 5 *min* bei  $T_{WK} = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $v_{WK} = 8\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Schritt 2: Enteisung der Einspritzung (Heizkabel)

Schritt 3: Erhöhung der Antriebsleistung (75 %), Start der Videoaufnahme, Auslösung der Einspritzung

Schritt 4: Vereisungsvorgang (8 s)

Schritt 5: Abschaltung des Antriebs, Ende der Videoaufnahme, Entnahme der Probe

Schritt 6: Erfassung der Masse auf der Präzisionswaage

Schritt 7: Fotoaufnahme der vereisten Oberfläche mittels Smartphone-Kamera

Schritt 8: Enteisung der Probe

### 4.3.2 Setup der Versuchsdurchführung

Der Klima-Windkanal wurde ohne Wasserkühlung der Dämmschicht und ohne Probenkühlung betrieben. Für die Highspeed-Kamera wurde eine Halterung aufgebaut, wodurch der Kamera normal auf die Oberfläche der Probe ausgerichtet war. Die Beleuchtung der Probe erfolgte mit einem leistungsstarken Studio Scheinwerfer, welcher durch das vordere Fenster seitlich auf die Probenoberfläche strahlte. Die Kamera wurde an einem Bildschirm angeschlossen, wodurch die Probe beobachtet werden konnte. In der Abbildung 4.3 ist der Klima-Windkanal mit dem beschriebenen Setup dargestellt.

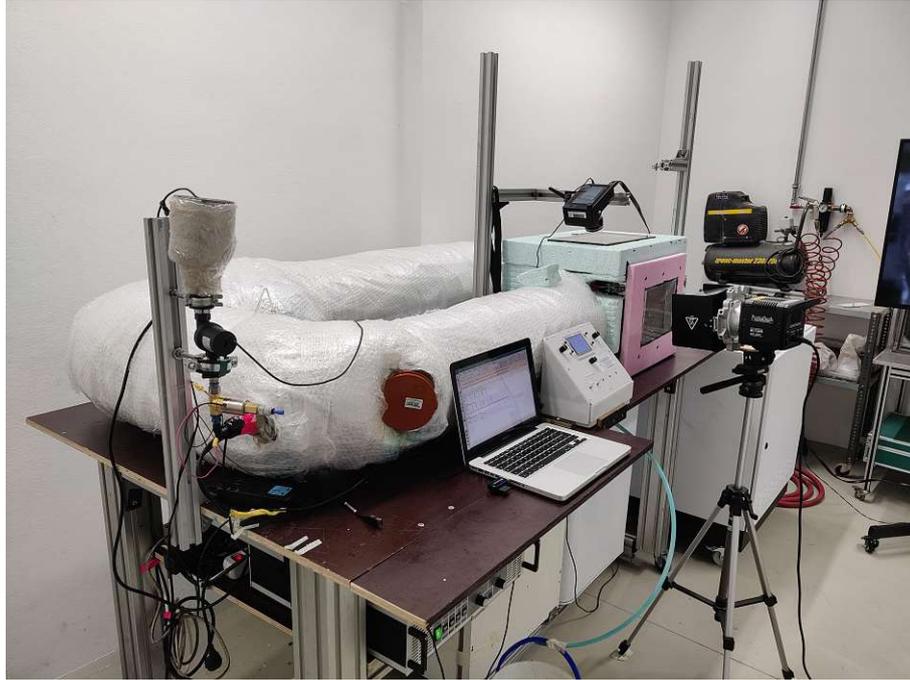


Abbildung 4.3: Versuchsaufbau mit dem Setup für die Versuchsdurchführung.

### 4.4 Ergebnisse der Versuche

#### 4.4.1 Gravimetrische Messungen

Die gravimetrischen Messungen wurden mit der Präzisionswaage vom Hersteller Sartorius vom Typ TE3102S und mit einer Auflösung von 0.01 g durchgeführt. Für die Versuchsreihe 1 wurden 3 Versuche je Probe durchgeführt. Die Ergebnisse der gravimetrischen Messungen sind in Tabelle 4.3 und im Anhang F zusammengefasst.

Bei der Probe 1 und 2 konnte nach der Vereisung im Schnitt eine Massezunahme von 40 mg gemessen werden. Die Probe 3 liegt mit 30 mg etwas darunter. Mit dieser Versuchsreihe konnte unter den gewählten Parameter kein Anti-Icing Effekt erfasst werden. Mit der Versuchsreihe 2 wurde die Vereisung der Probe 3 in Abhängigkeit der Einspritzdauer untersucht. Es wurden jeweils 3 Versuche mit 4 s und 12 s durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden zusammen mit dem Versuch aus Versuchsreihe 1 mit 8 s Einspritzdauer in Tabelle 4.4 und im Anhang F zusammengefasst.

Bei den Versuche mit 8 s Einspritzdauer wurde im Schnitt die höchste Eismasse (30 mg) erfasst. Mit 12 s Einspritzdauer konnte im Schnitt 17 mg und mit 4 s im Schnitt 10 mg Eismasse gemessen werden. Gegen die Erwartung ist die Eismasse nicht mit steigender Einspritzdauer angestiegen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Wassertröpfchen an der trockenen Oberfläche mehr Haftung als an der vereisten Oberfläche hatten. Dies würde erneut gegen den Anti-Icing Effekt der Oberfläche sprechen. Die Eisakkumulation wurde zudem durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit und den flachen Anströmungs-

#### 4 Versuchsdurchführung

	Gewicht vor der Vereisung [g]	Gewicht nach der Vereisung [g]	Gewichtszunahme (Eismasse) [g]	Temperatur WK bei der Einspitzung [°C]	Temperatur Wasser [°C]
Versuchsreihe 1, Probe 1, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246.29	246.33	0.04	-7.0	2.5
Versuch 2	246.29	246.33	0.04	-7.3	2.8
Versuch 3	246.29	246.33	0.04	-7.8	3.0
Versuchsreihe 1, Probe 2, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246.23	246.28	0.05	-7.3	1.2
Versuch 2	246.23	246.26	0.03	-7.5	1.6
Versuch 3	246.23	246.27	0.04	-7.6	1.2
Versuchsreihe 1, Probe 3, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246.20	246.24	0.04	-7.2	0.6
Versuch 3	246.20	246.23	0.03	-7.1	0.8
Versuch 2	246.20	246.22	0.02	-8.1	1.3

Tabelle 4.3: Ergebnisse der gravimetrischen Messung vor und nach Vereisung der Probe 1, 2 und 3. (Versuchsreihe 1)

	Gewicht vor der Vereisung [g]	Gewicht nach der Vereisung [g]	Gewichtszunahme (Eismasse) [g]	Temperatur WK bei der Einspitzung [°C]	Temperatur Wasser [°C]
Versuchsreihe 2, Probe 3, Einspritzdauer 4 s					
Versuch 1	246.20	246.22	0.02	-7.7	0.7
Versuch 2	246.20	246.20	0.00	-7.8	0.7
Versuch 3	246.20	246.21	0.01	-7.9	0.7
Versuchsreihe 2, Probe 3, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246.20	246.24	0.04	-7.2	0.6
Versuch 2	246.20	246.23	0.03	-7.1	0.8
Versuch 3	246.20	246.22	0.02	-8.1	1.3
Versuchsreihe 2, Probe 3, Einspritzdauer 12 s					
Versuch 1	246.20	246.22	0.02	-7.9	0.8
Versuch 3	246.20	246.22	0.02	-8.0	0.8
Versuch 2	246.20	246.21	0.01	-7.8	0.9

Tabelle 4.4: Ergebnisse der gravimetrischen Messung vor und nach der Vereisung der Probe 3 mit Variation der Einspritzdauer. (Versuchsreihe 2)

winkel der Probe nicht begünstigt.

Die Präzisionswaage konnte beim zweiten Versuch mit einer Einspritzdauer von 4 s keine zusätzliche Eismasse trotz sichtbarer Vereisung erfassen. Die Auflösung der verwendeten

Waage war für diese Untersuchung nicht ausreichend.

Die Messreihe mit einer Einspritzdauer von 8 s wurde im Zuge der Versuchsreihe 1 durchgeführt. Diese ergab eine deutliche Abweichung zu den Versuchen der Versuchsreihe 2 (Einspritzungsdauer 4 s und 12 s) welche an einem anderen Tag aufgenommen wurden. Eine mögliche Erklärung für die Abweichung könnte die Reproduzierbarkeit der Einspritzung und Präzisionswaage sein oder nicht berücksichtigten Parameter bei der Versuchsdurchführung.

### 4.4.2 Optische Bewertung des Vereisungszustandes der Probenoberflächen

Durch die Aufnahmen der Highspeed-Kamera konnten wenige Erkenntnisse über den Vereisungszustand der Probe gewonnen werden. Es ist eine zunehmende Vereisung der Probe im Videomaterial sichtbar. Eine optische Bewertung des Vereisungszustandes war aufgrund der mangelhaften Bildschärfe und Belichtung schwierig. Auch der Vergleich der Oberflächen war aufgrund der unterschiedlichen optischen Erscheinungsbilder nicht aussagekräftig. Das dynamische Aufprallverhalten der Wassertröpfchen auf die Probe war auf dem Videomaterial aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Tröpfchen und der Lichtverhältnisse nicht ersichtlich. Eine Bewertung des Aufprallverhaltens in Abhängigkeit der Oberfläche war daher nicht möglich. Durch einen besseren Kontrast zwischen Tröpfchen und Hintergrund sowie durch bessere Belichtung könnten die Aufnahmen aussagekräftiger werden.

Die Aufnahmen mit der Smartphone-Kamera sind aufgrund der besseren Lichtverhältnisse detailreicher geworden. Die Bilder wurden mittels Bildbearbeitungssoftware im Kontrast und in der Farbe so verändert, dass die Eismasse möglichst gut ersichtlich war (Abbildung 4.4). Die optische Auswertung der Aufnahmen mittels "ImageJ" konnte aufgrund der unterschiedlichen optischen Erscheinungsbilder der Oberflächen zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen führen. Mit den verwendeten Parametern und den zur Verfügung stehenden Methoden zur Bewertung des Vereisungszustandes der Proben, konnte an keiner der Oberflächen ein Anti-Icing Effekt erkannt werden.

#### 4 Versuchsdurchführung

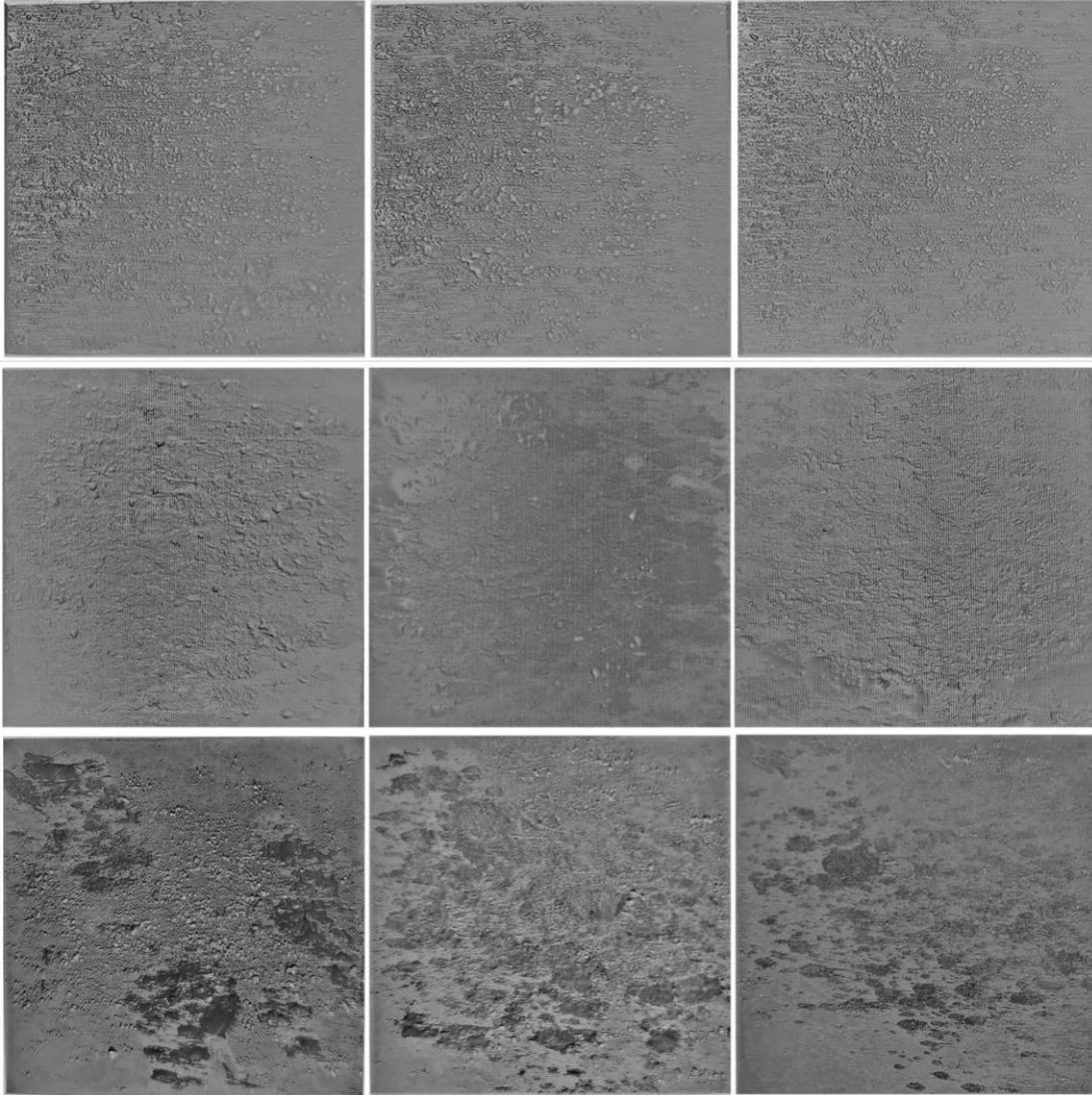


Abbildung 4.4: Aufnahme der vereisten Proben: Versuchsreihe 1 (Einspritzdauer 8 s), Reihe 1: Probe 1 (40 mg | 40 mg | 40 mg), Reihe 2: Probe 2 (50 mg | 30 mg | 40 mg), Reihe 3: Probe 3 (40 mg | 30 mg | 20 mg).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Klima-Windkanal zur Untersuchung der Vereisungseigenschaften von Proben mit strukturierten Oberflächen aufgebaut. Es wurde der Entstehungsprozess vom ersten Konzept bis zum finalen Aufbau und die erste Versuchsdurchführung dokumentiert. In der Konstruktionsphase wurde aus den zur Verfügung stehenden Mitteln ein Konzept entworfen, dessen Prinzip bis zum fertigen Aufbau beibehalten werden konnte. Es wurden Anforderungen bezüglich der Temperatur im Windkanal, der Strömungsgeschwindigkeit und der Tröpfchenerzeugung definiert und zum Großteil erfüllt.

Der Klima-Windkanal besteht aus Kanalgrundrohren aus denen zwei Kreisläufe (Windkanal und Kühlkanal) gebildet wurden. Der Kühlkanal wird von Kompressorgetriebenen Gefrierschränken gekühlt und entzieht dem Windkanal über einen Wärmetauscher die Wärme. Die Strömung im Windkanal wird von einem Impeller-Antrieb aus dem Flugzeug-Modellbau erzeugt und im Kühlkanal von einem Axiallüfter. Die Proben werden in einer mit Fenster ausgestatteten Testsektion auf einer Probenhalterung positioniert. Die Vereisung der Probe, wird durch eine Wasserzufuhr über eine Zerstäubungsdüse eingeleitet. Der Klima-Windkanal kann über eine zentrale Steuereinheit bedient werden, mit der Versuchsparameter wie Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Einspritzung reguliert werden können.

Die Weiterentwicklung des Klima-Windkanals wurde in vier Entwicklungsstufen aufgeteilt und mit Versuchsaufbau 1 bis 4 benannt. Der Versuchsaufbau 1 wurde mit einem Gefrierschrank betrieben. Die damit erreichte Temperatur von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  wich stark von der Zieltemperatur von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab. Im Zuge des Versuchsaufbaus 2 wurde ein weiterer Gefrierschrank installiert und der Strömungswiderstand im Kühlkanal reduziert. Mit den Maßnahmen konnte die Leistung der Kühlanlage erhöht und das thermische System effizienter gestaltet werden. Die Verbesserungen spiegelten sich durch die Absenkung der Temperatur im Windkanal auf  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  wider. Der Versuchsaufbau 3 wurde mit einer thermoelektrischen Kühlung der Probenhalterung, einer Wasserkühlung in der Dämmung und einem verbesserten Wärmeübergang im Wärmetauscher ausgestattet. Die Verbesserungsmaßnahmen konnte die Temperatur im Windkanal auf  $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduziert, womit die Zieltemperatur von  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht wurde. Für eine agilere Temperaturregelung wurden weitere Maßnahmen getroffen, um die Kühlanlage zu verbessern. Die Kühlung in der Dämmung wurde umgebaut und im Zuge dessen wurde die Dämmstoffstärke erhöht. Im Wärmetauscher wurde eine spiralförmige Kühlung, welche von einem zusätzlichem Gefrierschrank betrieben wurde, eingebaut. Mit einer Wärmebildkamera wurden thermisch ungünstige Stellen an der Oberfläche des Windkanals gefunden und behoben. Die Temperatur im Windkanal konnte durch diese Maßnahmen auf  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduziert

werden, wobei die Kühlspirale maßgeblich dazu beigetragen hat. In der Abbildung 5.1 sind die erzielten Temperaturen im Windkanal im Verlauf der Weiterentwicklung vom Versuchsaufbau 1 bis 4 durch ein Diagramm dargestellt.

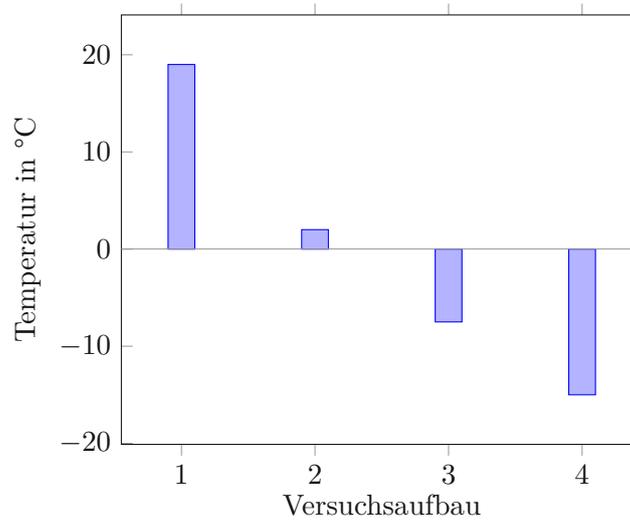


Abbildung 5.1: Erzielte Temperatur im Windkanal von Versuchsaufbau 1 bis 4.

Der Impeller-Antrieb konnte bei voller Antriebsleistung im Windkanal eine Strömungsgeschwindigkeit von  $52.4 \frac{m}{s}$  gemessen werden.

Die Erzeugung der Wassertröpfchen wurde mit einer Einspritzung, welche aus einer Wasserpumpe, einem elektromagnetischen Ventil und einer Zerstäubungsdüse aufgebaut wurde, ermöglicht. Die Einspritzung erfolgt mit destilliertem Wasser, welches möglichst nahe an  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  gekühlt wird, bevor es in den Windkanal eingeleitet wird. Die Unterkühlung der Tröpfchen, während der Flugphase, wird dadurch möglichst gefördert. Eine Untersuchung der Tröpfchenverteilung ergab einen mittleren Tröpfchendurchmesser von  $0.4 \text{ mm}$  bis  $1.6 \text{ mm}$ . Dies entspricht der Tröpfchengröße von Sprühregen bis leichten Regen.

Es wurde eine Versuchsreihe mit laserstrukturierten superhydrophoben Oberfläche durchgeführt. Dabei wurden die Anti-Icing Eigenschaften der Oberflächen mit einer Referenzprobe verglichen. Die Versuche wurden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $31 \frac{m}{s}$  und einer Temperatur von  $-7 \text{ } ^\circ\text{C}$  durchgeführt. Es konnte bei allen drei Oberflächen eine Eisschicht erzeugt werden. Die Bewertung der Vereisung erfolgte optisch durch eine Video- und Bildaufnahme und durch die Messung der vereisten Masse. Die Ergebnisse deuteten auf keine Anti-Icing Eigenschaften der superhydrophoben Oberfläche hin. Mit den Versuchen konnte aber gezeigt werden, dass mit dem Windkanal die Bedingungen für die Vereisung der Proben hergestellt werden konnten.

### 5.2 Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Grundlage für einen Prüfstand zur Untersuchung der Vereisungseigenschaften von Oberflächen geschaffen. Bevor mit dem Prüfstand repräsentative Ergebnisse erzeugt werden können, sollten zwei Punkte weiter untersucht und verbessert werden: Die Reproduzierbarkeit und die Quantifizierung der Vereisung.

Die Reproduzierbarkeit der Versuchsumgebung ist abhängig von der Stabilität der Parameter Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit sowie von der Einspritzung. Die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit können über Sensoren im Windkanal erfasst und geregelt werden. Die Einspritzung stellt hier eine größere Herausforderung dar, da die Durchflussmengen der Einspritzung im strömungsfreien Zustand gemessen wurden. Durch eine Messung im Windkanal bei repräsentativer Strömungsgeschwindigkeit könnte festgestellt werden, ob die eingeleitete Wassermenge konstant ist. Eine weitere Messung der Wassermenge, welche bis in die Testsektion gelangt, würde aufzeigen wie viel Wasser zwischen Einspritzung und Testsektion für das Experiment verloren geht. Um den nutzbaren Wasseranteil zu erhöhen, könnte die vertikale Position oder der Winkel der Einspritzung im Windkanalrohr angepasst werden. Eine Zweistoff-Zerstäubungsdüse könnte aufgrund der Bildung von kleineren Tröpfchen eine weitere Verbesserung darstellen.

Die Quantifizierung des Vereisungszustandes stellte in der durchgeführten Versuchsreihe eine Herausforderung dar. Die Messung der Massezunahme könnte durch eine Präzisionswaage mit höherer Genauigkeit verbessert werden. Die optische Auswertung könnte mit diversen Maßnahmen verbessert werden. Um die Tröpfchengröße und -Verteilung vor dem Auftreffen auf die Probe über eine Kamera zu detektieren, müssten die Lichtverhältnisse und der Kontrast in der Testsektion angepasst werden. Es könnte zudem außerhalb der Testsektion eine Vorrichtung aufgebaut werden, um hochauflösende Bilder in guten und konstanten Lichtverhältnissen zu erzeugen. Eine weitere Möglichkeit für die Quantifizierung der Vereisung, wäre die Erfassung der Eisschichtdicke durch Impedanzmessungen an der Oberfläche (siehe Kapitel 2.5.4) oder mittels 3D-Scanning. Mit einer Messung der Eisschichtdicke während des Vereisungsprozesses, könnte die Zunahme der Eismasse in Abhängigkeit der Zeit dargestellt werden.

Der Klima-Windkanal könnte auch für die Messung der De-Icing Eigenschaften verwendet werden. Gelingt es, eine konstante Eisschichtdicke zu erzeugen, könnte durch geregelte Erhöhung der Temperatur über den Gefrierpunkt die Zeit erfasst werden, bis die Eisschicht von der Strömung abgetragen wird.

Die Testprozedur könnte durch einen automatisierten Ablauf vereinfacht werden. Dabei könnte ein Programm für die Steuereinheit geschrieben werden, welches unter Eingabe der gewählten Parameter den Versuch automatisiert durchführt.

Die Einbindung einer Netzwerkschnittstelle (Arduino ESP8266 oder IoT Cloud) könnten Sensordaten remote ausgelesen und Steuerungsparameter angepasst werden.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Windkraftleistung in Österreich von 1994 bis 2019 mit Prognose 2020 [3].	3
2.2	Arten der Eisbildung zufolge von In-Cloud Icing. Eisbildung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit der Lufttemperatur gemäß ISO12494 (2001, S7). „Soft rime“ entspricht weichem Raureif und „Hard rime“ hartem Raureif bzw. Raueis und „Glaze“ Klareis [13]. . . . .	7
2.3	Grafische Darstellung der meteorologischen und instrumentellen Vereisung sowie der Inkubationszeit und Erholungszeit [14]. . . . .	9
2.4	Vereiste Rotorblätter [15] . . . . .	12
2.5	Typischer Eisansatz am Rotorblatt [19] . . . . .	12
2.6	Eisansatz an der Profilnase. Unterscheidung zwischen Leerlauf Betrieb (links) und Leistungsbetrieb (rechts) [20]. . . . .	13
2.7	Darstellung der Eisdetektion [26] . . . . .	16
2.8	Schematische Darstellung der Funktion einer antifreeze-Beschichtung am Beispiel eines Rotorblatts [15]. . . . .	18
2.9	Links spontane Emission, rechts stimulierte Emission [39]. . . . .	22
2.10	Prinzipieller Aufbau eines Resonators ( $CO_2$ -Laser) [39]. . . . .	23
2.11	Vergleich von Nanosekundenlaser (links) und UKPL (rechts) bei der Licht/Materie-Interaktion [44]. . . . .	24
2.12	Die Abbildung zeigt eine von der Firma LightPuls LASER PRECISION durchgeführte Bohrung auf eine additiv hergestellte Probe aus AlSi10Mg mit einem UKP Laser [45]. . . . .	25
2.13	LSFL im zentralen Bereich und HSFL im unteren Bereich (Material: ZnO, Femtosekunden Laser) [50]. . . . .	25
2.14	Kontaktwinkel bei unterschiedliche Benetzungsverhalten [56]. . . . .	27
2.15	Wassertröpfchen trifft auf eine unterkühlte Oberfläche [61]. . . . .	29
2.16	Benetzungsverhalten: (a) Young's Modell, (b) Wenzel Modell und (c) Cassie-Baxter Modell. [66] . . . . .	30
3.1	Grafische Darstellung der ersten Konzeptausarbeitung des Klima-Windkanals.	35
3.2	3D-CAD Modell Klima-Windkanal-Vorderansicht von oben. . . . .	37
3.3	Schnittdarstellung der Testsektion mit der Probenhalterung. (1) Probe, (2) Probenaufsatz, (3) Aufnahme Probenaufsatz, (4) Peltier-Element, (5) Wärmetauscher, (6) Bosch Rexroth Aluminium Gelenkverbinder, (7) Bosch Rexroth Aluminium Profil . . . . .	38
3.4	3D-CAD Modell Klima-Windkanal- Schnittdarstellung von oben mit Benennung der Komponenten. . . . .	39
3.5	Schematische Darstellung des thermischen Aufbaus des Klima-Windkanals.	43
3.6	Der Versuchsaufbau 1 ohne Kühlanlage und ohne Dämmung. . . . .	46

## Abbildungsverzeichnis

3.7	Versuchsaufbau 2 mit der Einbausituation des Impeller-Antriebs im Windkanal. . . . .	47
3.8	Der Versuchsaufbau 1 beim Zusammenbau des Wärmetauschers. . . . .	47
3.9	Versuchsaufbau 1 mit Kühlanlage und provisorisch angebrachten Steinwollmatten. . . . .	48
3.10	Graphische Darstellung des Kühlkanals im Versuchsaufbau 1 mit der Anordnung des Gefrierschranks und die Positionen der Lüfter und Temperatursensoren. . . . .	49
3.11	Graphische Darstellung des Kühlkanals im Versuchsaufbau 2 mit der Anordnung der Gefrierschränke und Positionen der Lüfter und Temperatursensoren. . . . .	52
3.12	Draufsicht des Klima-Windkanals (Versuchsaufbau 2) ohne Dämmung. . .	52
3.13	Technische Zeichnung der Probenhalterung in der isometrischen Ansicht. .	53
3.14	Versuchsaufbau 3 mit Stahlrohr im Wärmetauscher zur Verbesserung des Wärmeübergangs. . . . .	56
3.15	Fertiggestellter Versuchsaufbau 3. . . . .	56
3.16	Vorderansicht der Testsektion (Versuchsaufbau 3). . . . .	57
3.17	Innenansicht der Testsektion (Versuchsaufbau 3). Probenhalterung mit Bildung von Raureif aufgrund der eingeschalteten Probenkühlung. . . . .	57
3.18	Schematische Darstellung der Dämmschichten von Versuchsaufbau 1 bis 4	62
3.19	Einführung der Kühlspirale im Wärmetauscher (Versuchsaufbau 4). . . . .	62
3.20	Versuchsaufbau 4 ohne der äußersten Dämmschicht und mit dem PVC-Pneumatikschlauch für die Wasserkühlung. . . . .	63
3.21	Diagramm mit der Temperatur in der Testsektion und Probe in Abhängigkeit der Antriebsleistung bei 14.8 V Nennspannung. (Parameter der TM 4.2). . . . .	66
3.22	Diagramm mit dem Temperaturverlauf im Wind- und Kühlkanal bei stufenweiser Erhöhung der Antriebsleistung um 10 % im 30 Minuten-Takt. Temperaturmessung im 10 Minuten-Takt (Parameter der TM 4.4). . . . .	67
3.23	Aufbau der Einspritzung mit Beschriftung der Komponenten. . . . .	68
3.24	Zeitlicher Verlauf der Schaltung der Wasserpumpe und des Ventils für die Einspritzung. Nach der Betätigung des Auslösers wird die Wasserpumpe für den Zeitraum $t_D$ betrieben. $t_E$ ist der Zeitraum mit offener Ventilstellung und $t_A$ mit geschlossener Ventilstellung. . . . .	68
3.25	Aufbau der Testsektion mit der Halterung und der eingespannten Probe für die Aufnahme der Tröpfchenverteilung. . . . .	71
3.26	Tröpfchenverteilung in Abhängigkeit der Antriebsleistung und Öffnungsbohrung der Zerstäubungsdüse. Versuchsreihe mit einer eingespritzten Wassermasse von 5 g. . . . .	72
3.27	Tröpfchenverteilung in Abhängigkeit der Antriebsleistung und Öffnungsbohrung der Zerstäubungsdüse. Versuchsreihe mit einer Einspritzzeit von 1 s. . . . .	73

## Abbildungsverzeichnis

3.28	Gehäusekasten der Steuerung von Innen. Komponenten: (1) 24 V Netzteil, (2) Arduino MEGA, (3) Inverswandler, (4) IEC-Steckverbinder mit Wippschalter, (5) Lochplatine mit elektronischen Bauelementen, (6) Relais-Modul. . . . .	75
3.29	Gehäusekasten der Steuerung von außen mit den Ein- und Ausgabeelementen. . . . .	75
3.30	Display der Steuereinheit mit Informationen über die Temperaturen, die Luftfeuchtigkeit, die Leistung des Impeller Antriebes, die Strömungsgeschwindigkeit, den Status der Kühlung und über die Einspritzung. . . . .	77
3.31	Diagramm mit der gemessenen Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Antriebsleistung bei 14.8 V Nennspannung. $V_{Pitot}$ wurde mit dem Pitot-Rohr und $V_{AM Probe}$ und $V_{AM D60}$ wurden mit dem Anemometer gemessen. Bei $V_{AM D60}$ wurde das Anemometer unmittelbar nach der Einströmdüse (Eingang Testsektion) positioniert und bei $V_{AM Probe}$ es 8 cm nach der Einströmdüse (bei der Probe) positioniert. . . . .	78
3.32	Mit dem Anemometer erfasste Strömungsgeschwindigkeit am Eingang der Testsektion $V_{AM D60}$ , mit dem Pitot-Rohr erfasste Strömungsgeschwindigkeit $V_{Pitot}$ und die mittels Korrekturfunktion angepasste Strömungsgeschwindigkeit $V_{Pitot korr}$ . . . . .	79
4.1	Aufnahmen während der Laserstrukturierung der Probenoberfläche mit dem Ti:Saphir Femtosekundenlaser. . . . .	81
4.2	Aufnahmen der Kontaktwinkelmessung an Probe 2 mittels Kontaktwinkelgoniometer. . . . .	82
4.3	Versuchsaufbau mit dem Setup für die Versuchsdurchführung. . . . .	84
4.4	Aufnahme der vereisten Proben: Versuchsreihe 1 (Einspritzdauer 8 s), Reihe 1: Probe 1 (40 mg   40 mg   40 mg), Reihe 2: Probe 2 (50 mg   30 mg   40 mg), Reihe 3: Probe 3 ( 40 mg   30 mg   20 mg). . . . .	87
5.1	Erzielte Temperatur im Windkanal von Versuchsaufbau 1 bis 4. . . . .	89

## Tabellenverzeichnis

2.1	Aggregatzustand von Wolkentröpfchen. $T_{wt}$ ist die durchschnittliche Temperatur der Wassertröpfchen [9]. . . . .	5
2.2	Größe und Fallgeschwindigkeit von Niederschlagsselementen [10] . . . . .	5
2.3	Meteorologische Parameter für atmosphärische Vereisung [13]. . . . .	7
2.4	Eistypen und deren Eigenschaften nach [13]. . . . .	9
3.1	Temperaturverlauf im Kühlkanal gemäß den Ergebnissen der thermischen Berechnung mit den Parametern angelehnt an das konstruierte 3D-CAD Modell und den bekannten Komponenten. . . . .	45
3.2	Parameter der Temperaturmessungen im Wind- und Kühlkanal von Versuchsaufbau 1. . . . .	49
3.3	Temperaturmessung im Wind- und Kühlkanal von Versuchsaufbau 1 . . . .	50
3.4	Temperaturmessungen im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 2). TM 2.1 ohne Probenkühlung und TM 2.2 mit Probenkühlung. . . . .	53
3.5	Parameter der Temperaturmessungen 3.1 bis 3.4 (Versuchsaufbau 3). . . .	58
3.6	Temperaturmessungen 3.1 bis 3.4 im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 3). . . . .	58
3.7	Parameter der Temperaturmessungen 3.5 bis 3.10 (Versuchsaufbau 3). . .	60
3.8	Temperaturmessungen 3.5 bis 3.10 im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 3). . . . .	60
3.9	Parameter der Temperaturmessungen 4.1 bis 4.5 (Versuchsaufbau 4). . .	63
3.10	Ergebnisse der Temperaturmessungen 4.1 bis 4.4 im Kühl- und Windkanal (Versuchsaufbau 4). . . . .	64
3.11	Messung der Durchflussmenge bei geleertem und gefülltem Schlauchabschnitt zwischen Zerstäubungsdüse und Ventil. Messung erfolgte mit 3 s Durchflusszeit und mit Düse 1. . . . .	70
3.12	Messung der Durchflussmenge in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers der Zerstäubungsdüse mit/ohne Betrieb der Wasserpumpe. . . . .	70
4.1	Parameter bei der Strukturierung der Probenoberflächen mit dem Ti:Saphir Femtosekundenlaser. . . . .	80
4.2	Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung. . . . .	81
4.3	Ergebnisse der gravimetrischen Messung vor und nach Vereisung der Probe 1, 2 und 3. (Versuchsreihe 1) . . . . .	85
4.4	Ergebnisse der gravimetrischen Messung vor und nach der Vereisung der Probe 3 mit Variation der Einspritzdauer. (Versuchsreihe 2) . . . . .	85

## Literatur

- [1] Markus Drapalik. „Risiken der Vereisungsproblematik bei Windenergieanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Situation in Österreich“. Diss. Universität für Bodenkultur Wien, 2017.
- [2] *Erneuerbare Energien in Europa*. Techn. Ber. Europäischen Kommission – Dienststellen: Energie – Im Blickpunkt, 2020.
- [3] *Interessengemeinschaft Windkraft Österreich*. 2020. URL: [https://windfakten.at/\(Abgerufen%20am%2007.12.2021\)](https://windfakten.at/(Abgerufen%20am%2007.12.2021)).
- [4] *Erneuerbare Energie Österreich*. 2020. URL: [www.erneuerbare-energie.at/windenergie%20\(Abgerufen%20am%2007.01.2021\)](http://www.erneuerbare-energie.at/windenergie%20(Abgerufen%20am%2007.01.2021)).
- [5] Dagostin Liliana, Haßlacher Peter und Seifert Willi. „Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt“. In: Oesterreichischen Alpenvereins, 2012. Kap. Windenergienutzung im Alpenraum – die österreichische Annäherung.
- [6] C.A. Knight und Commission on College Physics. *The Freezing of Supercooled Liquids*. Momentum books. Commission on College Physics, 1967. URL: <https://books.google.at/books?id=1CjYAAAAIAAJ>.
- [7] F. Franks u. a. „Antifreeze activity of Antarctic fish glycoprotein and a synthetic polymer“. In: *Nature* (Jän. 1987). ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/325146a0. URL: <https://doi.org/10.1038/325146a0>.
- [8] Arnhold Tilo. „Weshalb gefriert Wasser in den Wolken zwischen -5 und -38 Grad Celsius?“ In: *Tropos - Leibniz - Institut für Troposphärenforschung* (2018).
- [9] Horst Malberg. *Meteorologie und Klimatologie - Eine Einführung*. Springer, 2006. ISBN: 3-540-42919-0.
- [10] Brigitte Klose. *Meteorologie: Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [11] *Freezing Rain – supercooled droplets freezing on impact*. University of Illinois, 2010.
- [12] *Wetterlexikon*. Der Deutsche Wetterdienst, 2020. URL: [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html).
- [13] *ISO 12494 Atmospheric icing of structures*. ISO, 2001.
- [14] René Cattin. *Alpine Test Site Guetsch*. Schweizerische Eidgenossenschaft, 2008.
- [15] Siegmann Konstantin, Siegmann Konstantin und Siegmann Konstantin. „Nicht-vereisende Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen“. In: *Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK* (2011).

- [16] C. Homola Matthew u. a. „Performance losses due to ice accretion for a 5 MW wind turbine“. In: *Wiley Online Library* (2011).
- [17] Hudecz Adriana, Koss Holger und Martin O. L. Hansen. „Ice Accretion on Wind Turbine Blades“. In: *Proceedings of the 15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS XV)* (2013).
- [18] Henry Seifert und Richert Frank. „Eis im Kanal“. In: *DEWI Magazin* (1997).
- [19] Seifert Henry und Richert Frank. „A RECIPE TO ESTIMATE AERODYNAMICS AND LOADS ON ICED ROTOR BLADES“. In: 2001.
- [20] Seifert Henry. „Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen“. In: *AUF WIND* (1999).
- [21] Hochart Clement, Fortin Guy und Jean Perron. „Wind Turbine Performance under Icing Conditions“. In: *Wiley Interscience* (2008).
- [22] R. Gent, N. Dart und J. Cansdale. „Aircraft icing“. In: *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences* (2000). DOI: 10.1098/rsta.2000.0689.
- [23] Stewart Cober, George Isaac und J. Walter Strapp. „Characterizations of Aircraft Icing Environments that Include Supercooled Large Drops“. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (2001). DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1984:COAIET>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1984:COAIET>2.0.CO;2).
- [24] Parent Olivier und Ilinca Adrian. „Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review“. In: *Cold Regions Science and Technology* (2011). ISSN: 0165-232X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X10000108>.
- [25] E. Peltola u. a. „Prevention of Icing Effects“. In: *Proceedings of the 2003 BOREAS VI* (2003).
- [26] Cattin René und Heikkilä Ulla. *Evaluation of Ice Detection Systems for Wind Turbines*. Techn. Ber. Meteotest, 2016.
- [27] Laakso Timo. „Wind energy projects in cold climates“. In: *International Energy* (2005).
- [28] G Fortin. „Thermodynamique de la Glace Atmosphérique.“ In: *UQAC* (2009).
- [29] C Mayer. „Système Électrothermique de Dégivrage pour une Pale d'Éolienne“. Magisterarb. UQAR, Rimouski, Canada, 2007.
- [30] T. Laakso und Peltola E. „Review on blade heating technology and future prospects“. In: *BOREAS VII. FMI, Saariselkä, Finland* (2005).
- [31] N. Dalili, A. Edrissy und R. Carriveau. „A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13,428–438 (2009).
- [32] R. Horbaty. „Wind Energy in Cold Climates - The Swiss Experience“. In: *BOREAS VII. FMI, Saariselkä, Finland* (2005).

- [33] G. Botura und K. Fisher. „Development of Ice Protection System for Wind Turbine Applications“. In: *BOREAS VI. FMI, Pyhäunturi, Finland* (2003).
- [34] Zeppenfeld Peter und Hohage Michael. „Anwendungen von Nanostrukturen setzen einfache, reproduzierbare Herstellungsverfahren voraus“. In: *Panorama - Oberflächenphysik* (2013).
- [35] Mitterer Christian und Waldhauser Wolfgang. „Nanostrukturierte Schichten – der Schlüssel zu multifunktionalen Oberflächen“. In: *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* (2010).
- [36] *DIN 8590 - Fertigungsverfahren Abtragen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe 1978-06*. Normungsorganisation.
- [37] Herbert Fritza Alfred und Schulze Günter. *Fertigungstechnik 10. Auflage*. Springer Vieweg, 2012.
- [38] Helmut Hügel und Thomas Graf. *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. Vieweg und Teubner, 2009. ISBN: 383510005X.
- [39] Berkmanns Joachim und Faerber Mark. *Facts About. Lasertechnologie - Grundlagen der Lasertechnologie*. Linde, 2013.
- [40] Einstein Albert. „Zur Quantentheorie der Strahlung“. In: *Physikalische Zeitschrift, Band 18, Seite 121-128* (1917).
- [41] Eichler; H.J. *Laser Bauformen, Strahlführung, Anwendung - 7. Auflage*. Springer, 2010.
- [42] Offenberg David u. a. „Ultrakurzpulslaser zur Materialbearbeitung - Werkstoffzeitschrift“. In: *Werkstoffzeitschrift* (2020).
- [43] Klotz Karlhorst. „Hohe Verarbeitungsqualität macht den UKP-Laser für die Industrie Attraktiv“. In: *Hersteller: Micreon GmbH* (2019).
- [44] Katarzyna Garasz u. a. „The Effect of Process Parameters in Femtosecond Laser Micromachining“. In: 43 (Jän. 2016), S. 110–120.
- [45] LightPulse LASER PRECISION 2020. *Nachbearbeitung additiv hergestellter Bauteile*. Techn. Ber. 2020. URL: <https://www.light-pulse.de/Additiv>.
- [46] Milton Birnbaum. „Semiconductor Surface Damage Produced by Ruby Lasers“. In: *Journal of Applied Physics* (1965). DOI: 10.1063/1.1703071. eprint: <https://doi.org/10.1063/1.1703071>. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1703071>.
- [47] Pfeifer Erik. „Wechselwirkung und Zusammenhang der zugrundeliegenden Mechanismen von LIPSS und optischer Pinzette“. Diss. Philipps-Universität Marburg, 2019.
- [48] J. E. Sipe u. a. „Laser-induced periodic surface structure. I. Theory“. In: *Physical Review B* 27, p. 1141 (1984).
- [49] J. Bonse u. a. „Femtosecond laser-induced periodic surface structures“. In: *Journal of Laser Applications* 24, p. 042006 (2012).

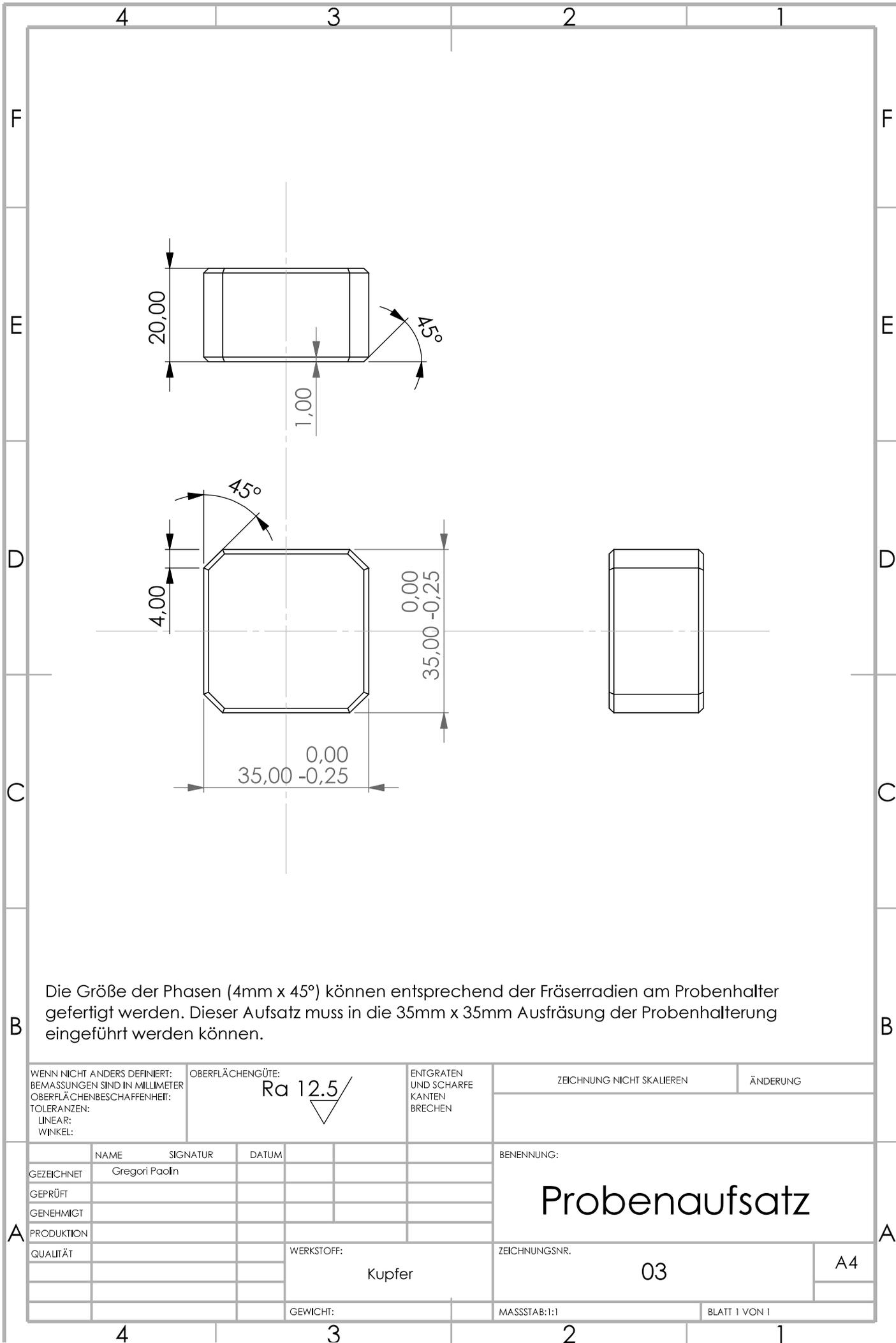
- [50] D. Dufft u. a. „Femtosecond laser-induced periodic surface structures revisited: A comparative study on ZnO“. In: *Journal of Applied Physics* 105, 034908 (2009).
- [51] Gräf Stephan und Müller Frank A. „Polarisation-dependent generation of fs-laser induced periodic surface structures“. In: *Applied Surface Science* (2015). ISSN: 0169-4332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.056>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016943321500080X>.
- [52] N. Yasumaru, K. Miyazaki und J. Kiuchi. „Control of tribological properties of diamond-like carbon films with femtosecond-laser-induced nanostructuring“. In: *Applied Surface Science* 254, pp. 2364–2368 (2008).
- [53] Bo Wu u. a. „Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser“. In: *Applied Surface Science* (2009). ISSN: 0169-4332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.061>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433209010605>.
- [54] W. Barthlott und C; Neinhuis. „Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces.“ In: *Planta* 202, 1–8 (1997) (1997).
- [55] Florian Geyer u. a. „When and how self-cleaning of superhydrophobic surfaces works“. In: *Science Advances* (2020). DOI: 10.1126/sciadv.aaw9727. URL: <https://advances.sciencemag.org/content/6/3/eaaw9727>.
- [56] Bauverlag BV GmbH. In: *BFT* (6/2016). URL: [https://www.bft-international.com/de/archiv.html%20\(zugriff%20am%2022.02.21\)](https://www.bft-international.com/de/archiv.html%20(zugriff%20am%2022.02.21)).
- [57] A. J. Meuler u. a. „Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion“. In: *ACS Applied Materials and Interfaces* (2010).
- [58] Helmut Rathgen u. a. „Nanometer-Resolved Collective Micromeniscus Oscillations through Optical Diffraction“. In: *Phys. Rev. Lett.* (2007). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.99.214501>.
- [59] Zen Yoshimitsu u. a. „Effects of Surface Structure on the Hydrophobicity and Sliding Behavior of Water Droplets“. In: *Langmuir* (2002). DOI: 10.1021/la020088p. URL: <https://doi.org/10.1021/la020088p>.
- [60] Piotr Tourkine, Marie Le Merrer und David Quéré. „Delayed Freezing on Water Repellent Materials“. In: *Langmuir* (2009). PMID: 19522485. DOI: 10.1021/la900929u. URL: <https://doi.org/10.1021/la900929u>.
- [61] Lidiya Mishchenko u. a. „Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets“. In: *ACS Nano* (2010). DOI: 10.1021/nn102557p. URL: <https://doi.org/10.1021/nn102557p>.
- [62] Denis Richard, Christophe Clanet und David Quéré. „Contact Time of a Bouncing Drop“. In: *Nature* (Juni 2002). DOI: 10.1038/417811a.
- [63] M. Reyssat u. a. „Bouncing transitions on microtextured materials“. In: *Europhys. Lett.* 2 (2006). DOI: 10.1209/epl/i2005-10523-2. URL: <https://doi.org/10.1209/epl/i2005-10523-2>.

## Literatur

- [64] Tanmoy Maitra u. a. „On the Nanoengineering of Superhydrophobic and Impalement Resistant Surface Textures below the Freezing Temperature“. In: *Nano Letters* (2014). DOI: 10.1021/nl4037092. URL: <https://doi.org/10.1021/nl4037092>.
- [65] Yong Chae Jung und Bharat Bhushan. „Dynamic Effects of Bouncing Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces“. In: *Langmuir* (2008). DOI: 10.1021/la8003504. URL: <https://doi.org/10.1021/la8003504>.
- [66] Minrui Ran, Wenyue Zheng und Huimin Wang. „Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review“. In: *Materials Science and Technology* (Jän. 2019). DOI: 10.1080/02670836.2018.1560985.
- [67] *ENERCON Produktübersicht*. 2005.
- [68] Sabine Bschorer. „Bernoulli’sche Gleichung für stationäre Strömung“. In: *Technische Strömungslehre*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN: 3658200367.
- [69] von Böckh Peter und Wetzels Thomas. *Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis 7. Auflage*. Springer, 2018.
- [70] *POLYDRESS LP-KEDER*. 2021. URL: <https://www.thermo-system-kroetz.de/files/Luftpolsterfolie.pdf>.

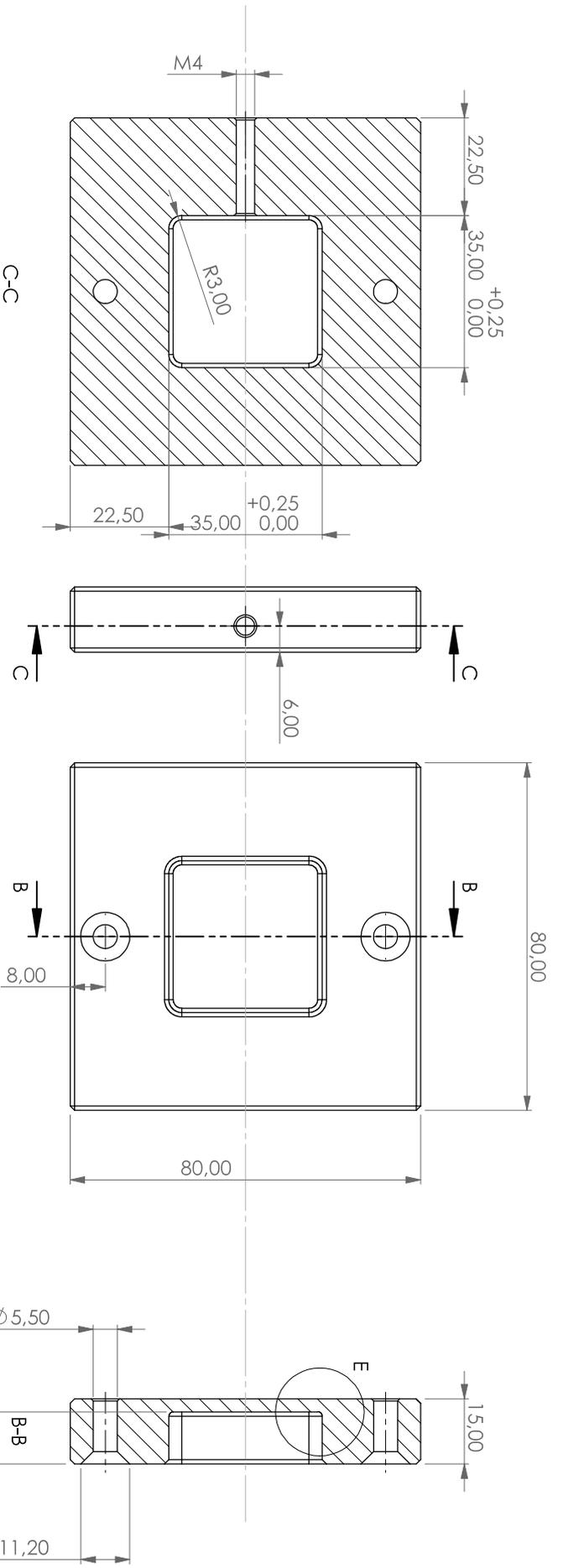




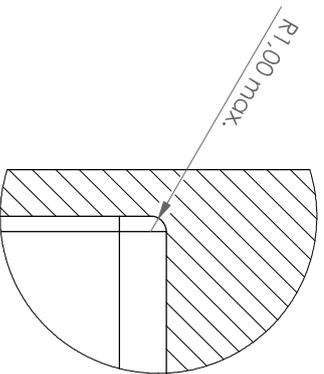


Die Größe der Phasen (4mm x 45°) können entsprechend der Fräserradien am Probenhalter gefertigt werden. Dieser Aufsatz muss in die 35mm x 35mm Ausfräsung der Probenhalterung eingeführt werden können.

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE: <b>Ra 12.5</b>		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Gregori Paoln				<b>Probenaufsatz</b>			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION						ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				WERKSTOFF:		03			
				Kupfer					
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:1		BLATT 1 VON 1	

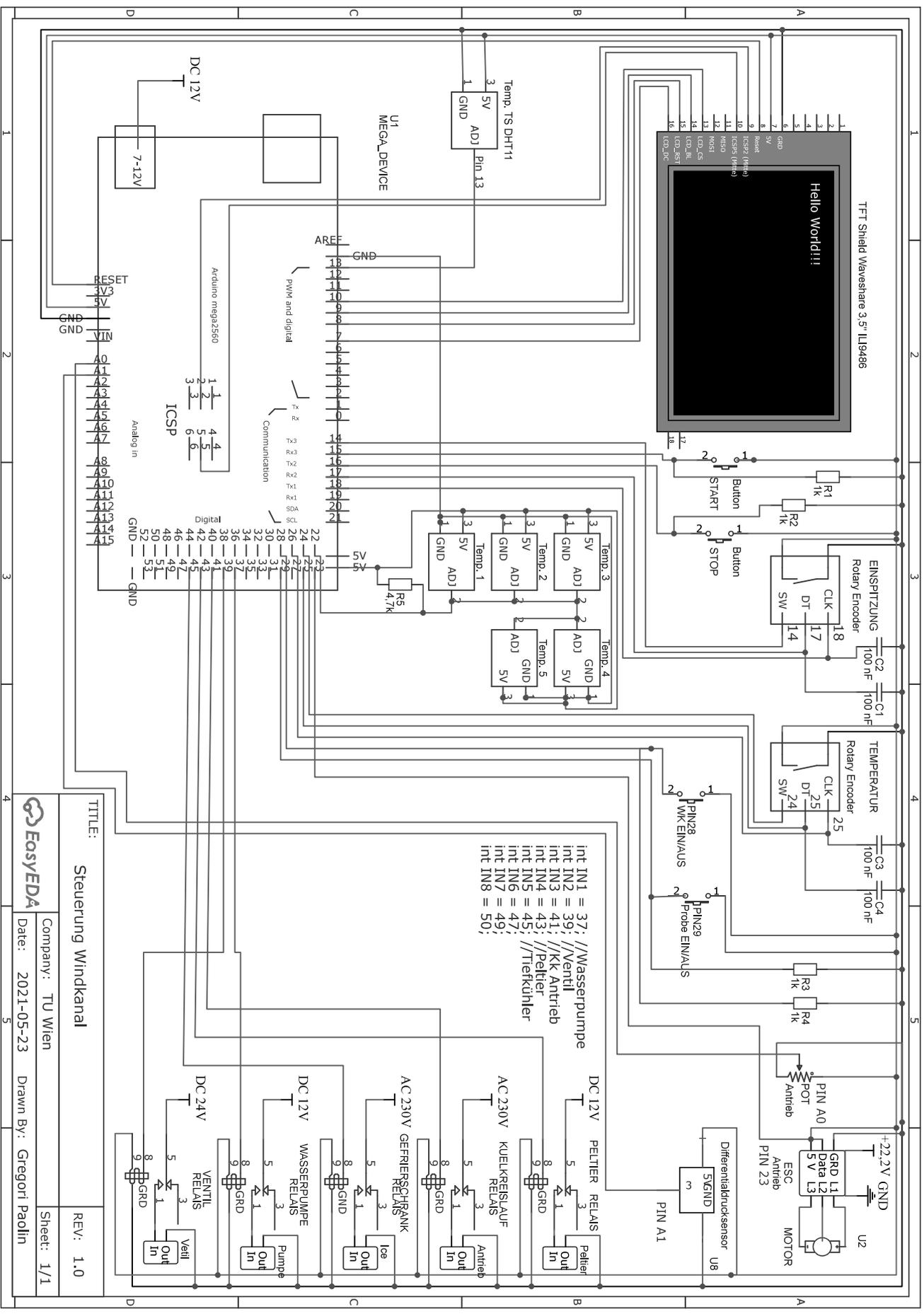


Alle nicht angegebenen Phasen werden mit 1mm x 45° gebrochen.



E (3 : 1)

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEZAICHNUNGEN SIND IN MILLIMETERN TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENRUGHEIT: <b>Ra 12,5</b>		EINGESÄGT UND SCHÄRFE KANTEN BRECHEN	
NAME		SIGNATUR		DATUM	
GEBILDET		GERÜFT		PRODUZENT	
GERÜFT		PRODUZENT		QUALIFIKATION	
WERKSTOFFE:		Aluminium		ZEICHNUNGSNR.:	
02		A3		BENENNUNG:	
Probenaufnahme		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	



TITLE: **Steuerung Windkanal**

Company: **TU Wien**

Date: **2021-05-23**

Drawn By: **Gregori Paolin**

REV: **1.0**

Sheet: **1/1**

# Anhang C

Ergebnisse der Analyse der Tröpfchenverteilung mit dem Programm Imaged									
Antriebsleistung bei 14,4 V	Durchmesser Düse [mm]	Öffnungszeit Ventil [s]	Anzahl	Fläche mittel [mm <sup>2</sup> ]	Radius mittel [mm]	Fläche Standardabweichung [mm <sup>2</sup> ]	Fläche min. (min = 0,01) [mm <sup>2</sup> ]	Fläche max. [mm <sup>2</sup> ]	Max Radius [mm]
<b>Durchflussmenge konstant</b>									
Düsen Ausgang Durchmesser D=1,4									
A25%	D = 1,4	t = 3 s	245	0,258	0,29	0,924	0,01	11,718	1,9
A50%	D = 1,4	t = 3 s	1092	0,792	0,50	14,656	0,011	481,915	12,4
A75%	D = 1,4	t = 3 s	872	0,457	0,38	2,691	0,011	58,185	4,3
Düsen Ausgang Durchmesser D=2,2									
A25%	D = 2,2	t = 2 s	172	0,166	0,23	0,211	0,01	1,583	0,7
A50%	D = 2,2	t = 2 s	794	0,607	0,44	4,676	0,011	125,907	6,3
A75%	D = 2,2	t = 2 s	743	0,391	0,35	1,846	0,011	31,419	3,2
Düsen Ausgang Durchmesser D=4 ohne Pumpe									
A25%	D = 4 o.P.	t = 6 s	371	0,142	0,21	0,242	0,011	2,019	0,8
A50%	D = 4 o.P.	t = 6 s	665	2,22	0,84	43,421	0,01	1118,525	18,9
A75%	D = 4 o.P.	t = 6 s	841	0,219	0,26	0,854	0,011	12,493	2,0
<b>Einspritzdauer konstant</b>									
Düsen Ausgang Durchmesser D=1,4									
A25%	D = 1,4	t = 1 s	16	0,028	0,09	0,032	0,011	0,123	0,2
A50%	D = 1,4	t = 1 s	33	0,351	0,33	1,405	0,011	8	1,6
A75%	D = 1,4	t = 1 s	117	0,323	0,32	0,769	0,011	5,162	1,3
Düsen Ausgang Durchmesser D=2,2									
A25%	D = 2,2	t = 1 s	55	0,328	0,32	0,775	0,011	5,172	1,3
A50%	D = 2,2	t = 1 s	46	0,161	0,23	0,255	0,011	1,397	0,7
A75%	D = 2,2	t = 1 s	355	0,307	0,31	0,65	0,01	5,949	1,4
Düsen Ausgang Durchmesser D=4 ohne Pumpe									
A25%	D = 4 o.P.	t = 1 s	64	0,258	0,29	0,563	0,011	2,715	0,9
A50%	D = 4 o.P.	t = 1 s	572	0,159	0,23	0,295	0,011	3,715	1,1
A75%	D = 4 o.P.	t = 1 s	578	0,93	0,54	4,456	0,012	94,324	5,5

# Anhang D

Messergebnisse der Stömungsgeschwindigkeit im Klima Windkanal				
Antriebsleitung mei 14,4 V Nennspannung	Anemometer bei Probe [m/s]	Anemometer bei Eingang Testsektion (D60) [m/s]	Pitot Messung 1 [m/s]	Pitot Messung 2 [m/s]
10%	7,0	7,8	12,0	11,7
15%	10,2	12,2	16,7	16,0
20%	13,5	15,2	20,0	19,7
30%	16,9	19,8	25,4	25,1
40%	20,0	23,3	28,8	28,8
50%	21,9	25,9	31,8	31,3
60%	23,8	27,8	34,7	34,1
70%	25,7	30,2	36,7	35,8
80%	26,9	31,7	38,2	37,6
90%	29,7	34,3	41,9	41,1
100%	31,4	36,3	43,6	44,0

# Anhang E

Ergebnisse der Kontaktwinkel Messung					
	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert (L, R)	Mittelwert gesamt
Probe 1 (Geschliffen) L	81	80	79	80	<b>82</b>
Probe 1 (Geschliffen) R	82	82	91	85	
Mittelwert Messung	81	81	85		
Probe 2 (LIPSS) L	152	152	153	152	<b>153</b>
Probe 2 (LIPSS) R	151	154	154	153	
Mittelwert Messung	151	153	153		
Probe 3 (Micro) L	147	136	150	144	<b>144,9</b>
Probe 3 (Micro) R	152	134	151	145	
Mittelwert Messung	149	135	150		

# Anhang F

Ergebnisse der gravimetrischen Messungen der Versuchsreihe 1 und 2					
	Masse vor dem Versuch [g]	Masse nach dem Versuch [g]	Massezunahme (Eismasse) [g]	Temperatur WK (Zeitpunkt der Einspritzung) [°C]	Temperatur Wasser (Zeitpunkt der Einspritzung) [°C]
<b>Versuchsreihe 1: Variation der Oberfläche</b>					
Messreihe 1: Probe 1, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246,29	246,33	0,04	-7	2,5
Versuch 2	246,29	246,33	0,04	-7,3	2,8
Versuch 3	246,29	246,33	0,04	-7,8	3
Messreihe 2: Probe 2, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246,23	246,28	0,05	-7,3	1,2
Versuch 2	246,23	246,26	0,03	-7,5	1,6
Versuch 3	246,23	246,27	0,04	-7,6	1,2
Messreihe 3: Probe 3, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246,2	246,24	0,04	-7,2	0,6
Versuch 3	246,2	246,23	0,03	-7,1	0,8
Versuch 2	246,2	246,22	0,02	-8,1	1,3
<b>Versuchsreihe 2: Variation der Einspritzdauer</b>					
Messreihe 1: Probe 3, Einspritzdauer 4 s					
Versuch 1	246,2	246,22	0,02	-7,7	0,7
Versuch 2	246,2	246,2	0	-7,8	0,7
Versuch 3	246,2	246,21	0,01	-7,9	0,7
Messreihe 1: Probe 3, Einspritzdauer 8 s					
Versuch 1	246,2	246,24	0,04	-7,2	0,6
Versuch 2	246,2	246,23	0,03	-7,1	0,8
Versuch 3	246,2	246,22	0,02	-8,1	1,3
Messreihe 1: Probe 3, Einspritzdauer 12 s					
Versuch 1	246,2	246,22	0,02	-7,9	0,8
Versuch 3	246,2	246,22	0,02	-8	0,8
Versuch 2	246,2	246,21	0,01	-7,8	0,9

# Anhang G

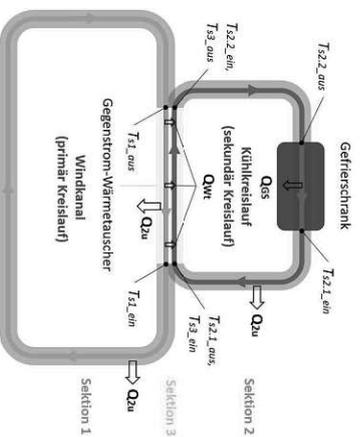
Messung der Durchflussmenge in Abhängigkeit der Düse und mit/ohne Wasserpumpe.

Düsenöffnung	1.4 mm	1.8mm	2.2 mm	3 mm	4 mm	4 mm
Wasserpumpe	EIN	EIN	EIN	EIN	EIN	AUS
Tröpfchengröße	klein	klein	mittel	mittel	mittel	groß
Tröpfchenverteilung	gleichmäßig	gleichmäßig	gleichmäßig	einseitig	einseitig	senkrecht abfallend
Messung 1	5 g	6 g	8 g	10 g	10 g	3 g
Messung 2	5 g	5 g	8 g	9 g	11 g	3 g
Messung 3	5 g	6 g	8 g	10 g	11 g	3 g
Durchfluss	1.67 g/s	1.89 g/s	2.67 g/s	3.22 g/s	3.55 g/s	1 g/s

# Anhang H

## Thermische Berechnung Klima-Windkanal

Alle Angaben und Kennzahlen sind wenn nicht anders angegeben von dem Lehrbuch "Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis" 7. Auflage von Peter von Böckh und Thomas Wetzel entnommen worden.



Die wichtigsten Eingabeparameter für die Berechnung der Windkanaltemperatur:

Temperatur Windkanal	$T_{WK} := 266,05K$	Temperatur Gefrierschrank	$T_{GF,aus} := -28,4^{\circ}C$
Temperatur Ausgang Gefrierschrank	$T_{GF,aus} := 244,75K$	Stromungsgeschwindigkeit Kühlkreislauf	$v_{k,DN110} := 5 \frac{km}{h}$
Stromungsgeschwindigkeit Kühlkreislauf	$v_{k,DN110} := 5 \frac{km}{h}$	Stromungsgeschwindigkeit Windkanal	$v_{wk,DN110} := 40 \frac{km}{h}$
Stromungsgeschwindigkeit Windkanal	$v_{wk,DN110} := 40 \frac{km}{h}$	Stärke der Isolierung	$s_{iso} := 50mm$
Umgebungstemperatur	$T_u := 295,15K$		$T_u = 22^{\circ}C$

## Geometrische Abmessungen

### Abmessungen Windkanal -Sektion 1

Abmessungen HFRohr DN110:

$$d_{s1,a} := 110mm \quad s_{s1} := 2,7mm$$

$$d_{s1,i} := d_{s1,a} - 2s_{s1} = 0,1m$$

$$d_{s1,iso} := d_{s1,a} + 2s_{iso} = 0,2m$$

Querschnittsfläche HFRohr DN110

$$A_{s1,a} := d_{s1,a}^2 \frac{2\pi}{4} = 0m^2$$

$$A_{s1,i} := d_{s1,i}^2 \frac{2\pi}{4} = 0m^2$$

Rohrlänge mit DN110 in der Sektion 1:

$$L_{s1,DN110} := (1700 + 2 \cdot 750 + 1000 + 200 - 2100)mm$$

$$L_{s1,DN110} = 2,3m$$

Außenhülle der Sektion 1 +

Isolierung:

Abmessungen Testsektion:

$$A_{s1,r,iso} := L_{s1,DN110} \cdot \pi \cdot d_{s1,iso} = 1,5m^2$$

$$L_{ts} := (560)mm$$

$$B_{ts} := (400)mm$$

$$H_{ts} := (400)mm$$

$$A_{ts} := H_{ts} \cdot B_{ts} \cdot 2 + B_{ts} \cdot L_{ts} \cdot 2 + H_{ts} \cdot L_{ts} \cdot 2 = 1,2m^2$$

$$A_{s1,iso} := A_{s1,r,iso} + A_{ts} = 2,7m^2$$

Gesamte Außenhülle der Sektion 1:

Abmessungen Kühlkreislauf -Sektion 2

Abmessungen HFRohr DN110:

$$d_{s2,a} := 110mm \quad s_{s2} := 1,8mm$$

$$d_{s2,i} := d_{s2,a} - 2s_{s2} = 10,6cm$$

$$d_{s2,iso} := d_{s2,a} + 2s_{iso} = 0,2m$$

$$A_{s2} := d_{s2,i}^2 \frac{2\pi}{4} = 0m^2$$

Querschnittsfläche HFRohr DN110

Rohrlänge mit DN50 in der Sektion 2.1  
 $L_{s2.1, DN110} := 800\text{mm}$

Außenhülle der Sektion 2.1 + Isolierung:  
 $A_{s2.1, iso} := L_{s2.1, DN110} \cdot \pi \cdot d_{s2.1, iso} = 0.5\text{m}^2$

Rohrlänge mit DN50 in der Sektion 2.2  
 $L_{s2.2, DN110} := 300\text{mm}$

Außenhülle der Sektion 2.2 + Isolierung:  
 $A_{s2.2, iso} := L_{s2.2, DN110} \cdot \pi \cdot d_{s2.1, iso} = 0.2\text{m}^2$

**Abmessungen Gefähschrank**

$L_{gf} := 540\text{mm}$   
 $H_{gf} := 860\text{mm}$   
 $B_{gf} := 540\text{mm}$

Außenhülle Gefähschrank:  
 $A_{gf} := H_{gf} \cdot B_{gf} \cdot 2 + B_{gf} \cdot L_{gf} \cdot 2 + H_{gf} \cdot L_{gf} \cdot 2 = 2.4\text{m}^2$

**Abmessungen Gegenstrom-Wärmeaustauscher Sektion 3**

Abmessungen HT-Rohr DN160:  
 $d_{s3,a} := 160\text{mm}$       $s_{s3} := 3.9\text{mm}$   
 $d_{s3,i} := d_{s3,a} - 2 \cdot s_{s3} = 0.2\text{m}$   
 $d_{s3,iso} := d_{s3,a} + 2 \cdot s_{s3,iso} = 0.3\text{m}$   
 $A_{s3,i} := d_{s3,i}^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0\text{m}^2$

Querschnittfläche HT-Rohr DN160  
 $A_{s3,i} := d_{s3,i}^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0\text{m}^2$

Rohrlänge mit DN160 in der Sektion 3:  
 $L_{s3, DN160} := 21000\text{mm}$

Außenhülle der Sektion 3  
 $A_{s3, iso} := d_{s3, iso} \cdot \pi \cdot L_{s3, DN160} = 1.7\text{m}^2$

$A_{ges} := A_{s1, iso} + A_{s2,1, iso} + A_{s2,1, iso} + A_{s3, iso} = 5.5\text{m}^2$

$\frac{A_{s1, iso}}{A_{ges}} = 0.5$

**Geometrische Abmessungen**

**Thermische Kennzahlen**

Wärmeleitfähigkeit  
 $\lambda_{PYC} := 0.15 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$   
 $\lambda_{iso} := 0.04 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$   
 $\lambda_{Luft} := 0.02436 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$   
 $\lambda_{Stahl} := 50 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Physikalische Kennzahlen der Luft bei 0°C:  
 $\rho_{Luft} := 1.006 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$\rho_{Luft} := 1.292 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\nu_{Luft} := 13.50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

$\eta_{Luft} := 17.226 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

Für die weiterführende Berechnung wird die Prandtlzahl für Luft bei einer Temperatur von -10°C verwendet:

$T_0 := -10$

$Pr_{Luft} := \frac{10^9}{1.1 \cdot 10^{-3} - 1200 T_0^2 + 322000 \cdot T_0 + 1.393 \cdot 10^9} = 0.7$   
lt. tec-science: Prandtl-Zahl in: tec-science, 9. Mai 2020, abgerufen am 25. Jun 2020 (deutsch).

**Thermische Kennzahlen**

**Dimensionierung Antrieb**

**Antrieb Kühlkreislauf**

Mit dem Anemometer gemessener Strömungsgeschwindigkeit:

$V_{KK, DN110} := 1.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$\dot{V}_{KK} := V_{KK} \cdot Pr_{Luft} = 57.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$

$V_{KK, wT} := 44.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

$\dot{V}_{KK, wT} := \frac{\dot{V}_{KK}}{A_{s3,i} \cdot A_{s1,a}} = 1.4 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Elektrischer Stromverbrauch zufolge der Strömungsgeschwindigkeit gemäß ERP-Klassifizierungs-Richtlinie:  
Antrieb direkt Kreislauf - Impeller Fehler 90mm Art. Nr. 249576

$$Q_{A,kek,eI} := \frac{1}{0,46} \cdot v_{wK,DN110}^3 \cdot A_{s1,I}^2 \cdot \rho_{Luft} = 0,1 \text{ W}$$

Angabe lt. Hersteller Stand-Schubkraft:

$$F_{S1,I} := 36\text{N}$$

Außen- und Innendurchmesser:

$$d_{I,a} := 90\text{mm} \quad d_{I,i} := 25\text{mm}$$

Durchströmte Querschnittsfläche Impeller:

$$A_I := \left( d_{I,a}^2 - d_{I,i}^2 \right) \frac{\pi}{4} = 0,0\text{m}^2$$

Abschätzung der Windgeschwindigkeit im Impeller zufolge des Standschubes. Mit  $S=1$  v folgt:

$$v_I := \sqrt{\frac{F_{S1,I}}{A_I \cdot \rho_{Luft}}} = 68,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{wK,max} := v_I \cdot A_I = 0,4 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Maximale Windgeschwindigkeit bei 110 mm Rohrdurchmesser:

$$v_{wK,DN110,max} := \frac{v_{wK,max}}{A_{s1,I}} = 47,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Gewählte Windgeschwindigkeit bei 110 mm Rohrdurchmesser:

$$v_{wK,DN110} = 11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{wK,DN110} := v_{wK,DN110} \cdot A_{s1,I} = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$m_{wK} := v_{wK,DN110} \cdot \rho_{Luft}$$

Elektrischer Stromverbrauch zufolge der Strömungsgeschwindigkeit gemäß ERP-Klassifizierungs-Richtlinie:

$$Q_{A,wK,eI} := \frac{1}{0,46} \cdot v_{wK,DN110}^3 \cdot A_{s2}^2 \cdot \rho_{Luft} = 34,3 \text{ W}$$

Dimensionierung Antrieb

Wärmeübertragung Sektion 1 - Q1u

Eintrittstemperatur in die Sektion 1:

$$T_{s1,ein} := T_{wK}$$

$$v_{s1} := v_{wK,DN110} = 11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldszahl für die Sektion 1:

$$Re_{s1} := v_{s1} \cdot \frac{d_{s1,i}}{\nu_{Luft}} = 8,6 \times 10^4$$

Turbulent für  $10^4 < Re < 10^6$

Nußeltzahl für turbulente Rohrströmung nach Gleichung 3.8 und 3.9

Die Wandtemperatur Innen und die Austrittstemperatur wird zunächst abgeschätzt und anschließend iterativ angenähert. Durch die hohe Windgeschwindigkeit sind keine hohen Temperaturänderungen im primären Kreislauf zu erwarten.

Abschätzung Austrittstemperatur Sektion 1:

$$T_{s1,aus,ab} := T_{s1,em} + 0,14\text{K}$$

Abschätzung Wandtemperatur Innen:

$$T_{w,s1,ab} := \frac{(T_{s1,em} + T_{s1,aus,ab})}{2} = 266,1\text{K}$$

Abschätzung durchschnittliche Temperatur in Sektion 1:

$$T_{m,s1,ab} := \frac{T_{s1,em} + T_{s1,aus,ab}}{2} = 266,1\text{K}$$

Langster gerader Abschnitt

$$l_{q1} := 1,5\text{m}$$

Ermittlung der Nußelt-Zahl Sektion 1:

$$\xi_{s1} := (1,8 \cdot \log(Re_{s1}) - 1,5)^{-2} = 0$$

$$f_{s1} := 1 + \frac{d_{s1,i}}{l_{q1}}$$

$$f_{s1}^{0,45} := \left( \frac{T_{m,s1,ab}}{T_{w,s1,ab}} \right)^{0,45}$$

$$Nu_{tur,s1,ab} := \frac{\xi_{s1} \cdot Re_{s1} \cdot \rho_{Luft}}{8 \cdot \left( 1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi_{s1}}{8}} \left( \frac{2}{3} - 1 \right) \right)} \cdot f_{s1} \cdot f_{s1}^{0,45}$$

$$\alpha_{s1,ab} := Nu_{tur,s1,ab} \cdot \frac{\lambda_{Luft}}{d_{s1,i}} = 40,2 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Wärmeübergangskoeffizient Rohr bei ruhender Luft (Vergleichswert):

$$\alpha_{rohr\_Luft} := 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Die Wärmedurchgangszahl bezogen auf den äußeren Durchmesser nach 2.32

$$k_{s1,ab} := \frac{1}{\frac{d_{s1,iso}}{d_{s1,iso}} + 2 \cdot \lambda_{PVC} \cdot \ln\left(\frac{d_{s1,a}}{d_{s1,i}}\right) + \frac{1}{\alpha_{rohr\_Luft}}} = 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Da die Nußelt-Zahl nur sehr gering von der Abschätzung der Wandinnentemperatur  $T_{w,s1}$  und der Austrittstemperatur ( $T_{s1,aus,ab}$ ) abhängig ist und sich diese nur auf die dritte

Nachkommastelle der Wärmeübergangszahl auswirkt, reicht die Abschätzung für die Genauigkeit dieser Untersuchung aus.

$$k_{s1} := k_{s1,ab}$$

$$Q_{s1,i} := Q_{s1,ab}$$

Die thermodynamische mittlere Temperaturdifferenz ergibt sich zu:

$$\Delta T_{m_{s1},ab} := \frac{T_{s1,aus,ab} - T_{s1,ein}}{\ln\left(\frac{T_u - T_{s1,ein}}{T_u - T_{s1,aus,ab}}\right)} = 29 \text{ K}$$

Nach 3.13 ergibt sich die Wandinnentemperatur zu:

$$T_{w_{s1,i}} := T_{m_{s1},ab} + \frac{\Delta T_{m_{s1},ab} \cdot k_{s1} \cdot d_{s1,i}}{Q_{s1,i,ab} \cdot d_{s1,iso}} = 266,3 \text{ K}$$

$$T_{w_{s1,ab}} = 266,1 \text{ K}$$

Die Wandinnentemperatur wurde auf die erste Nachkommastelle ausreichend gut abgeschätzt, daher kann der Wärmeübergangskoeffizient als ausreichend genau betrachtet werden.

Mit der kinematischen Kopplung kann auf die zunächst abgeschätzte transiente Wärme geschlossen werden.

$$Q_{1u,ab} := k_{s1,ab} \cdot A_{s1,iso} \cdot \Delta T_{m_{s1},ab} = 40,7 \text{ W}$$

$$\text{Iteration}(T) :=$$

$$\begin{array}{l} n \leftarrow 0 \\ T_b \leftarrow T + 10 \text{ K} \\ \text{while } |T - T_b| > 0,1 \text{ K} \\ \quad T \leftarrow T_b \quad \text{if } n \geq 1 \\ \quad \Delta T_{m_{s1}} \leftarrow \frac{(T - T_{s1,ein})}{\ln\left(\frac{T_u - T_{s1,ein}}{T_u - T}\right)} \\ \quad Q_{1u} \leftarrow k_{s1} \cdot A_{s1,iso} \cdot \Delta T_{m_{s1}} \\ \quad T_b \leftarrow T_{s1,ein} + \frac{Q_{1u}}{m_{wk} \cdot c_p \cdot \dot{m}_{wk}} \\ n \leftarrow n + 1 \\ T_b \end{array}$$

Aus der Iteration ergibt sich die

angenehmere Austrittstemperatur aus der Sektion 1:

$$T_{s1,aus} := \text{Iteration}(T_{s1,aus,ab}) = 266,4 \text{ K}$$

$$\Delta T_{s1} := T_{s1,aus} - T_{s1,ein} = 0,3 \text{ K}$$

$$\Delta T_{m_{s1}} := \frac{T_{s1,aus} - T_{s1,ein}}{\ln\left(\frac{T_u - T_{s1,ein}}{T_u - T_{s1,aus}}\right)} = 28,9 \text{ K}$$

In der Sektion 1 wird der Wärmestrom  $Q_{1u}$  von der Umgebung aufgenommen:

$$Q_{1u} := k_{s1} \cdot A_{s1,iso} \cdot \Delta T_{m_{s1}} = 40,6 \text{ W}$$

#### Wärmeübertragung Sektion 1 - $Q_{1u}$

#### Wärmeübertragung Sektion 2 - $Q_{2,1u}$

Wärmeübertragung Sektion 2.1 vom Gefrierstrank zum Eintritt Wärmeaustauscher (Sektion 3)

Austrittstemperatur von Gefrierstrank:  $T_{s2,1,ein} := T_{GF,aus} = 244,8 \text{ K}$

Windgeschwindigkeit in der Sektion 2:

$$v_{s2} := v_{k,DN110} = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldszahl Sektion 2:

$$Re_{s2} := v_{s2} \cdot \frac{d_{s2,i}}{v_{l,luft}} = 1,1 \times 10^4$$

Turbulenz für  $10^4 < Re < 10^6$

Annahme turbulente Rohrströmung nach Gleichung 3.8 und 3.9

Die Wandtemperatur Innen und die Austrittstemperatur wird zunächst abgeschätzt, anschließend iterativ korrigiert.

Abschätzung Austrittstemperatur Sektion 2.1:  $T_{s2,1,aus,ab} := T_{s2,1,ein} + 2 \text{ K}$

Abschätzung Wandtemperatur Innen:  $T_{w_{s2,1,ab}} := \frac{(T_{s2,1,aus,ab} + T_{s2,1,ein})}{2} + 0,2 \text{ K}$

Abschätzung durchschnittliche Temperatur Sektion 2.1:  $T_{m_{s2,1,ab}} := \frac{T_{s2,1,ein} + T_{s2,1,aus,ab}}{2} = 245,8 \text{ K}$

Längster gerader Abschnitt Sektion 2.1:  $l_{2,1} := 0,5 \text{ m}$

$$\text{Ermittlung der Nusselt-Zahl Sektion 2.1: } \xi_{s2} := (1.8 \log(R_{s2}) - 1.15)^{-2} = 0$$

$$f_{s2,1} := 1 + \frac{d_{s2,1}}{12.1}$$

$$f_{2,s2,1} := \left( \frac{T_{m,s2,1,ab}}{T_{w,s2,1,ab}} \right)^{0.45}$$

$$Nu_{tur,s2,1} := \frac{\xi_{s1} Re_{s1}^2 Pr_{tur}}{8} \cdot \frac{1}{1 + 12.7 \cdot \left( \frac{\xi_{s1}}{Pr_{luft}} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{2}{3} - 1 \right)}$$

Wärmeübergangskoeffizient im Rohr  
Sektion 2.1:  $\alpha_{s2,1,ab} := Nu_{tur,s2,1} \cdot \frac{\lambda_{luft}}{d_{s2,1}} = 44.8 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{K}}$

Die Wärmedurchgangszahl bezogen auf den äußeren Durchmesser nach 2.32

$$k_{s2,1,ab} := \frac{1}{\frac{d_{s2,iso}}{d_{s2,1,ab}} + 2 \cdot \lambda_{PVC} \cdot \ln \left( \frac{d_{s2,iso}}{d_{s2,1}} \right) + \frac{1}{\alpha_{rohr\_luft}}} + \frac{1}{\alpha_{rohr\_luft}}$$

$$k_{s2,1,ab} = 0.5 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Da die Nusselt-Zahl nur sehr gering von der Abschätzung der Wandinnentemperatur  $T_{w,s2}$  und der Austrittstemperatur ( $T_{s2,aus,ab}$ ) abhängig ist und sich diese nur auf die dritte Nachkommastelle der Wärmeübergangszahl auswirkt, reicht die Abschätzung für die Genauigkeit dieser Untersuchung aus.

$$k_{s2,1} := k_{s2,1,ab}$$

Die Thermodynamische mittlere Temperaturdifferenz ergibt sich zu:

$$\Delta T_{m,s2,1,ab} := T_{s2,1,aus,ab} - T_{s2,1,ein} \cdot \frac{\ln \left( \frac{T_u - T_{s2,1,ein}}{T_u - T_{s2,1,aus,ab}} \right)}{\ln \left( \frac{T_u - T_{s2,1,ein}}{T_u - T_{s2,1,aus,ab}} \right)} = 49.4 \text{ K}$$

Mit der kinematischen Kopplung kann auf die zunächst abgeschätzte transferierte Wärme geschlossen werden:

$$Q_{2,1u,ab} := k_{s2,1} \cdot A_{s2,1,iso} \cdot \Delta T_{m,s2,1,ab} = 13.5 \text{ W}$$

Die abgeschätzten Werte werden im iterativen Verfahren verwendet um die tatsächlichen Ergebnisse anzunähern:

```
Iteration_{s2,1}(T) :=
n ← 0
Tb ← T + 10K
while |T - Tb| > 1K
  T ← Tb if n ≥ 1
  ΔT_{m,s2,1} ← (T - T_{s2,1,ein}) / ln((T_u - T_{s2,1,ein}) / (T_u - T))
  Q_{2,1u} ← k_{s2,1} · A_{s2,1,iso} · ΔT_{m,s2,1}
  Tb ← T_{s2,1,ein} + (Q_{2,1u} / m_{RK} · c_p_{luft})
n ← n + 1
Tb
```

Aus der Iteration ergibt sich die angenäherte Austrittstemperatur aus der Sektion 2.1:

$$T_{s2,1,aus} := \text{Iteration}_{s2,1}(T_{s2,1,aus,ab}) = 245.6 \text{ K}$$

$$T_{s2,1,aus} = -27.5 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{m,s2,1} := \frac{T_{s2,1,aus} - T_{s2,1,ein}}{\ln \left( \frac{T_u - T_{s2,1,ein}}{T_u - T_{s2,1,aus}} \right)} = 50 \text{ K}$$

In der Sektion 1 wird der Wärmestrom  $Q_{1,u}$  von der Umgebung aufgenommen:

$$Q_{2,1u} := k_{s2,1} \cdot A_{s2,1,iso} \cdot \Delta T_{m,s2,1} = 13.7 \text{ W}$$

$$Q_{2,1u} = 13.7 \text{ W}$$

Abgelesen der Abgeschätzten Wandinnentemperatur

Nach 3.13 ergibt sich die Wandinnentemperatur zu:

$$T_{w,2,1} = \frac{T_{s2,1, \text{ein}} + T_{s2,1, \text{aus}}}{2} + \frac{\Delta T_{m,2,1} \cdot k_{s2,1} \cdot d_{s2,1}}{\alpha_{s2,1, \text{ab}} \cdot d_{s2,1 \text{iso}}}$$

Die Wandinnentemperatur wurde ausreichen gut abgeschätzt, daher kann der zu Beginn ermittelte Wärmeübergangskoeffizient als ausreichend genau betrachtet werden.

$$T_{w,2,1, \text{ab}} = 245,9 \text{ K} \quad T_{w,2,1} = 245,5 \text{ K}$$

Wärmeübertragung Sektion 2 - Q2.1u

Wärmeübertragung Sektion 3 - QwT, Q3u

Wärmeübergang im Wärmeleutscher Sektion 3

Eintrittstemperatur Kühlkreislauf:

$$T_{s3, \text{KK}, \text{ein}} = T_{s2,1, \text{aus}} = 245,6 \text{ K}$$

Austrittstemperatur Kühlkreislauf (Unbekannt, Abschätzung):

$$T_{s3, \text{KK}, \text{aus}, \text{ab}} = (T_{s3, \text{KK}, \text{ein}} + 10 \text{ K})$$

Eintrittstemperatur Windkanal:

$$T_{s3, \text{wk}, \text{ein}} = T_{s1, \text{aus}} = 266,4 \text{ K}$$

Austrittstemperatur Windkanal:

$$T_{s3, \text{wk}, \text{aus}} = T_{s1, \text{ein}} = 266,1 \text{ K}$$

Bestimmung der Wärmeübergangszahl im Ringspalt vom Windkanal Rohr DN110 zum Kühlkreislauf:

Bestimmung des hydraulischen Durchmessers für den Ringspalt nach 3.28:

$$A_{s3, \text{ringspalt}} = \frac{(d_{s3,1}^2 - d_{s1,a}^2) \pi}{4}$$

$$U_{s3, \text{ringspalt}} = (d_{s3,1} + d_{s1,a}) \pi$$

$$d_{h, s3} = \frac{A_{s3, \text{ringspalt}}}{U_{s3, \text{ringspalt}}} = 42,2 \text{ mm}$$

Entwurf der Reynoldszahl: Für  $Re_{s3, \text{KK}} < 2300$  ist die Strömung im laminaren Strömungszustand.

$$Re_{s3, \text{KK}} = \frac{d_{h, s3}}{\nu_{\text{Luft}}} = 444,2$$

Die laminare Nusselt-Zahl im Ringspalt für den Wärmeübergang am Innenrohr ergibt sich nach Formel (3.30), (3.31), (3.32) und (3.33) aus drei Nusselt-Zahlen:

Nusselt-Zahl 1:

$$Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}, 1} = 3,66 + 1,2 \left( \frac{d_{s3,a}}{d_{s3, \text{iso}}} \right)^{0,8} = 4,5$$

Nusselt-Zahl 2:

$$\text{Längster gerader Abschnitt:} \quad l_{s3} = 1,5 \text{ m}$$

$$Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}, 2} = 1,615 \left( 1 + 0,14 \sqrt{\frac{d_{s3,1}}{d_{s1,a}}} \right) \left( Re_{s3, \text{KK}} \cdot Pr_{\text{Luft}} \frac{d_{h, s3}}{l_{s3}} \right)^{\frac{1}{3}} = 8,4$$

Nusselt-Zahl 3:

Abschätzung Wandinnentemperatur Kühlkreislauf zum Windkanal im Wärmeleutscher:

$$T_{w, s3, \text{KK}} = \frac{T_{s3, \text{KK}, \text{ein}} + T_{s3, \text{KK}, \text{aus}, \text{ab}} + T_{s3, \text{wk}, \text{ein}} + T_{s3, \text{wk}, \text{aus}}}{4} = 5 \text{ K} = 253,4 \text{ K}$$

$$Pr_{\text{Luft}, w} = \frac{10^9}{1,1 \left( \frac{T_{w, s3, \text{KK}}}{1 \text{ K}} \right)^3 - 1200 \left( \frac{T_{w, s3, \text{KK}}}{1 \text{ K}} \right)^2 + 322000 \left( \frac{T_{w, s3, \text{KK}}}{1 \text{ K}} \right) + 1,393 \cdot 10^9} = 0,7$$

$$Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}, 3} = \left( \frac{2}{1 + 22 Pr_{\text{Luft}, w}} \right) \left( Re_{s3, \text{KK}} \cdot Pr_{\text{Luft}, w} \frac{d_{h, s3}}{l_{s3}} \right)^{0,5} = 1,1$$

Die Nusselt-Zahl gesamt ergibt sich zu:

$$Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}} = \sqrt[3]{Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}, 1}^3 + Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}, 2}^3 + Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}, 3}^3} = 8,8$$

Berechnung Wärmedurchgangszahl Innenrohr (Kühlkreislauf zum Windkanal):

$$\text{Die Wärmeübergangszahl im Kühlkreislauf Sektion 3:} \quad \alpha_{s3, \text{KK}} = Nu_{\text{lam}, s3, \text{KK}} \frac{\lambda_{\text{Luft}}}{d_{h, s3}} = 51 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Die Wärmedurchgangszahl über das Innenrohr von Ringspalt (Windkanal zum Kühlkreislauf) ergibt sich zu:

$$k_{3,wr} := \frac{1}{\frac{d_{3,a}}{d_{3,i}} + \frac{d_{3,a}}{2 \cdot \lambda_{PVC}} \cdot \ln\left(\frac{d_{3,a}}{d_{3,i}}\right) + \frac{1}{\alpha_{3,kk}}} = 4,2 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Ermittlung der großen und kleinen Temperaturdifferenz im Wärmeaustauscher:

$$T_{gr,3} := T_{3,wk,aus} - T_{3,kk,ein} = 20,4 \text{ K}$$

$$T_{kl,3,ab} := T_{3,wk,ein} - T_{3,kk,aus,ab} = 10,8 \text{ K}$$

TK3.ab ist eine Abschätzung da die Austrittstemperatur aus dem Kühlkreislauf im Verlauf dieser Berechnung iterativ ermittelt wird.

Die thermodynamische mittlere Temperaturdifferenz im Wärmeaustauscher:

$$\Delta T_{m,3,wr,ab} := \frac{T_{gr,3} - T_{kl,3,ab}}{\ln\left(\frac{T_{gr,3}}{T_{kl,3,ab}}\right)} = 15,1 \text{ K}$$

Vergleichswert:

$$\frac{T_{gr,3} + T_{kl,3,ab}}{2} = 15,6 \text{ K}$$

Mit den abgeschätzten Temperaturen wurde den Windkanal im Wärmeaustauscher folgender Wärmestrom entzogen. Dieser Wert ist zu diesem Zeitpunkt eine Abschätzung und wird im Verlauf dieser Berechnung iterativ angenähert.

$$Q_{wt,lab} := k_{3,wr} \cdot \Delta T_{m,3,wr,ab} \cdot d_{3,a} \cdot \pi \cdot L_{3,DN160} = 45,5 \text{ W}$$

Die bisher durchgeführten Rechenschritte werden im iterativen Verfahren wiederholt bis das Ergebnis konvergiert. Der Wärmeaustauscher wird zunächst als adabat betrachtet. Der Einfluss der Umgebung wird in einem weiteren Rechenschritt berücksichtigt.

Iteration<sub>wt</sub>(T) := n ← 0

Tb ← T + 10K

while |T - Tb| > 0,1K

T ← Tb if n ≥ 1

T ← Tb if Tb < T<sub>3,wk,ein</sub> otherwise

T<sub>3,wk,ein</sub> - 0,0001K

$$\Delta T_{m,wt} \leftarrow \frac{T - T_{3,kk,ein}}{\ln\left(\frac{T_{3,wk,ein} - T_{3,kk,ein}}{T_{3,wk,ein} - T}\right)}$$

$$Q_{wt} \leftarrow k_{3,wr} \cdot \Delta T_{m,wt} \cdot d_{3,a} \cdot \pi \cdot L_{3,DN160}$$

$$T_b \leftarrow T_{3,kk,ein} + \frac{Q_{wt}}{m_{kk} \cdot c_{p,luft}}$$

n ← n + 1

n ← n + 1

Tb ← 0 if n > 1000

break if n > 1000

Berechnung Wärmedurchgangszahl Außenrohr - Sektion 3:

Annahme Wärmeübergangskoeffizient Ringspalt Außenwand und Innenwand sind gleich.

$$\alpha_{3,kk,a} := \alpha_{3,kk} \quad \alpha_{3,kk,i} := \alpha_{3,kk}$$

$$k_{3,a} := \frac{1}{\frac{d_{3,iso}}{d_{3,a}} + \frac{d_{3,iso}}{2 \cdot \lambda_{PVC}} \cdot \ln\left(\frac{d_{3,a}}{d_{3,i}}\right) + \frac{1}{\alpha_{rohr\_luft}}} = 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Umgebung im Wärmeaustauscher berücksichtigt:

Der Wärmestrom vom Windkanal zum Kühlkreislauf im adabaten Wärmeaustauscher und die daraus resultierende Ausgangstemperatur:

$$Q_{wt} := \text{Iteration}_{wt}(T_{3,kk,aus,ab}) = 57,1 \text{ W}$$

$$T_{3,kk,aus,ad} := T_{3,kk,ein} + \frac{Q_{wt}}{m_{kk} \cdot c_{p,luft}} = 249,2 \text{ K}$$

Die thermodynamische mittlere Temperaturdifferenz im Wärmeaustauscher vom Kühlkreislauf zur Umgebung ergibt sich zu:

$$\Delta T_{m,3,ab} := \frac{T_{s3,kk,aus,ad} - T_{s3,kk,ein}}{\ln \left( \frac{T_u - T_{s3,kk,ein}}{T_u - T_{s3,kk,aus,ad}} \right)} = 47,7 \text{ K}$$

Mit der kinematischen Kopplung kann auf die zunächst transferierte Wärme geschlossen werden:  
 Wärmestrom von der Umgebung in der Sektion 3:

$$Q_{s3,u} := k_{s3,a} \cdot A_{s3,iso} \cdot \Delta T_{m,3,ab} = 38,6 \text{ W}$$

Gesamt aufgenommene Wärme im Wärmeaustauscher im Kühlkreislauf (Umgebung -> Kühlkreislauf + Windkanal -> Kühlkreislauf)

$$Q_{s3} := Q_{s3,u} + Q_{wt} = 95,7 \text{ W}$$

Die Addition dieser Wärmeströme ist physikalisch nicht korrekt. Der Wärmestrom an die Umgebung ist im Verhältnis zum Wärmestrom an den Windkanal klein, so dass diese Vereinfachung im Kontext dieser Arbeit eine ausreichend genaue Annäherung darstellt.

$$\frac{Q_{s3,u}}{Q_{wt}} = 0,7$$

Aus den gesamten Wärmestrom aus Sektion 3 kann auf die Austrittstemperatur geschlossen werden:

$$T_{s3,kk,aus} := T_{s3,kk,ein} + \frac{Q_{wt} + Q_{s3,u}}{\eta_{kk} \cdot c_p \cdot \rho_{Luft}} = 251,6 \text{ K}$$

Nach 3.13 ergibt sich die Wandinnentemperatur zu (Korrektur der Abschätzung):

$$T_{w,s3,a} := \frac{T_{s3,kk,ein} + T_{s3,kk,aus}}{2} + \frac{\Delta T_{m,3,wr,ab} \cdot k_{s3,a} \cdot d_{s3,i}}{q_{s3,kk} \cdot d_{s3,iso}} = 249,4 \text{ K}$$

Abschätzung:  $T_{w,s3,kk} = 253,4 \text{ K}$

Wärmeübertragung Sektion 3 - OWT, O3u

Wärmeübertragung Q2.2u  
 Ermittlung von Wärmeübertragung Sektion 2 (Ausgang Wärmeaustauscher (Sektion 3) zum Gefährstrank)

Austrittstemperatur von aus dem Wärmeaustauscher:  $T_{s2,2,ein} := T_{s3,kk,aus} = 251,6 \text{ K}$

Abschätzung Austrittstemperatur Sektion 2.2:  $T_{s2,2,aus,ab} := T_{s2,2,ein} + 4 \text{ K}$

Abschätzung Wandtemperatur innen:  $T_{w,s2,2} := \frac{(T_{s2,2,ein} + T_{s2,2,aus,ab})}{2}$

Durchschnittliche Temperatur Sektion 2.2:  $T_{m,2,2,ab} := \frac{T_{s2,2,ein} + T_{s2,2,aus,ab}}{2} = 253,6 \text{ K}$

Längster gerader Abschnitt:  $l_{p2,2} := 0,3 \text{ m}$

Ermittlung der Nusseltzahl Sektion 2.2:  $Re_{s2,2} := 1 + \frac{d_{s2,i}}{l_{p2,1}} \cdot Re_{s2,2} := \left( \frac{T_{m,2,2,ab}}{T_{w,2,2}} \right)^{0,45}$

$Nu_{tur,s2,2,ab} := \frac{\xi_{s1}}{8} \cdot Re_{s1} \cdot Pr_{Luft} \cdot \left( \frac{2}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi_{s1}}{Pr_{Luft}}}} - 1 \right) \cdot Re_{s2,2}^2 \cdot Pr_{s2,2} = 195,8$

Wärmeübergangskoeffizient Sektion 2.2:  $q_{s2,2,i,ab} := Nu_{tur,s2,2,ab} \cdot \frac{\lambda_{Luft}}{d_{s2,i}} = 44,8 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$

Die Wärmedurchgangszahl Sektion 2.2 bezogen auf den äußeren Durchmesser nach 2.32

$$k_{s2,2,ab} := \frac{1}{\frac{d_{s2,iso}}{d_{s2,ab}} + \frac{d_{s2,iso}}{2 \cdot \lambda_{pVC}} \cdot \ln \left( \frac{d_{s2,a}}{d_{s2,i}} \right) + \frac{1}{q_{ohr, Luft}} + \frac{1}{q_{ohr, Luft}} \cdot \ln \left( \frac{d_{s2,iso}}{d_{s2,a}} \right) + \frac{1}{q_{ohr, Luft}}} = 0,5 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Da die Nusselt-Zahl nur sehr gering von der Abschätzung der Wandinnentemperatur  $T_{w,s1}$  und der Austrittstemperatur  $(T_{s1,aus,ab})$  abhängig ist, und sich diese nur auf die dritte Nachkommastelle der Wärmeübergangszahl auswirkt, reicht die Abschätzung für die Genauigkeit dieser Untersuchung aus.

$$k_{s2,2} := k_{s2,2,ab} \quad \rho_{s2,2,1} := \rho_{s2,2,1,ab}$$

Die Thermodynamische mittlere Temperaturdifferenz ergibt sich zu:

$$\Delta T_{m,s2,2,ab} := \frac{T_{s2,2,aus,ab} - T_{s2,2,ein}}{\ln\left(\frac{T_u - T_{s2,2,ein}}{T_u - T_{s2,2,aus,ab}}\right)} = 41,6 \text{ K}$$

Mit der kinematischen Kopplung kann auf die zunächst abgeschätzte transferierte Wärme geschlossen werden:

$$Q_{2,2,u,ab} := k_{s2,2} \cdot A_{s2,2,iso} \cdot \Delta T_{m,s2,2,ab} = 4,3 \text{ W}$$

Die abgeschätzten Werte werden im iterativen Verfahren verwendet um die tatsächlichen Ergebnisse anzunähern:

```

Iteration_{s2,2}(T) :=
n ← 0
Tb ← T + 10K
while |T - Tb| > 0,1K
  T ← Tb if n ≥ 1
  T ← |Tb if Tb < Tu
  Tu - 0,0001K otherwise
  ΔT_{m,s2,2} ← (1 - T_{s2,2,ein}) / ln((Tu - T_{s2,2,ein}) / (Tu - T))
  Q_{2,2,u} ← k_{s2,2} · A_{s2,2,iso} · ΔT_{m,s2,2}
  Tb ← T_{s2,2,ein} + Q_{2,2,u} / (mKk · c_p · Luft)
  n ← n + 1
break if Tb > Tu
Tb
  
```

$$T_{s2,2,aus} := \text{Iteration}_{s2,2}(T_{s2,1,aus,ab}) = 251,8 \text{ K}$$

Aus der Iteration ergibt sich die angenäherte Austrittstemperatur der Sektion 2,2 und der Wärmestrom von der Umgebung:

$$\Delta T_{m,s2,2} := \frac{T_{s2,1,aus} - T_{s2,1,ein}}{\ln\left(\frac{T_u - T_{s2,1,ein}}{T_u - T_{s2,1,aus}}\right)} = 50 \text{ K}$$

$$Q_{2,2,u} := k_{s2,2} \cdot A_{s2,2,iso} \cdot \Delta T_{m,s2,2} = 51 \text{ W}$$

Nach 3.13 ergibt sich die Wandinnentemperatur zu (Korrektur der Abschätzung):

$$T_{w,s2,2,1} := \frac{T_{s2,2,ein} + T_{s2,2,aus}}{2} + \frac{\Delta T_{m,s2,2,ab} \cdot k_{s2,1} \cdot d_{s2,1}}{\rho_{s2,2,1} \cdot d_{s2,iso}} = 251,9 \text{ K}$$

#### Wärmeübertragung Q\_{2,2,u}

#### Ergebnisse

##### Zusammenfassung der Ergebnisse

Von der Umgebung aufgenommene Wärmestrom der Sektionen:

$$\begin{aligned} Q_{1,u} &= 40,6 \text{ W} \\ Q_{2,1u} &= 13,7 \text{ W} \\ Q_{2,2u} &= 51 \text{ W} \\ Q_{s3,u} &= 38,6 \text{ W} \end{aligned}$$

Insgesamt aufgenommener Wärmestrom von der Umgebung:

$$Q_{ver} := Q_{1,u} + Q_{2,2u} + Q_{2,1u} + Q_{s3,u} = 97,9 \text{ W}$$

Zugeführte Wärme durch den Ventilator (Anteil KK und VMK (Wirkungsgrad 0,5 gemäß EIP-Chikodasign-Richtlinie)) zuzüglich der Stromungsgeschwindigkeit

$$\begin{aligned} Q_{A,kk,ver} &= 0,46 Q_{A,kk,el} = 0 \text{ W} \\ Q_{A,wk,ver} &= 0,46 Q_{A,wk,el} = 15,8 \text{ W} \end{aligned}$$

Insgesamt zugeführter Wärmestrom durch Umgebung und Antriebe:

$$Q_{ver,el} := Q_{A,wk,ver} + Q_{A,kk,ver} + Q_{ver} = 113,7 \text{ W}$$

Der Temperaturverlauf im Kühlkreislauf:

$T_{s2,1,ein} = -28,4 \text{ °C}$	$T_{s2,1,aus} = -27,5 \text{ °C}$	$T_{s2,1,ein} - T_{s2,1,aus} = -0,9 \text{ K}$
$T_{s3,kk,ein} = -27,5 \text{ °C}$	$T_{s3,kk,aus} = -21,6 \text{ °C}$	$T_{s3,kk,ein} - T_{s3,kk,aus} = -6 \text{ K}$
$T_{s2,2,ein} = -21,6 \text{ °C}$	$T_{s2,2,aus} = -21,3 \text{ °C}$	$T_{s2,2,ein} - T_{s2,2,aus} = -0,3 \text{ K}$

Der Temperaturverlauf im Windkanal:

$T_{s1,ein} = -7,1 \text{ °C}$	$T_{s1,aus} = -6,8 \text{ °C}$	$T_{s1,ein} - T_{s1,aus} = -0,3 \text{ K}$
$T_{s3,wk,ein} = -6,8 \text{ °C}$	$T_{s3,wk,aus} = -7,1 \text{ °C}$	

$$\text{Durchschnittliche Temperatur im WK: } T_{\text{WK,mean}} := \frac{T_{s1,\text{ein}} + T_{s1,\text{aus}}}{2} = 266.2 \text{ K}$$

$$T_{\text{WK,mean}} = -6.9^\circ \text{C}$$

Gegenprüfung der Ergebnisse:

Überprüfung der Energiebilanz vom gesamten Windkanal

$$\text{Aus den berechneten Temperaturverlauf und dem Massenstrom im} \quad Q_{\text{GF}} := c_p \cdot \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot m_{\text{Luft}} \cdot (T_{s2,1,\text{ein}} - T_{s2,2,\text{aus}})$$

$$\text{Kühnkreislauf kalkulierte Kühlleistung: } Q_{\text{GF}} = -113.8 \text{ W}$$

Der Wärmestrom an die Umgebung  $Q_{\text{ver}}$  und der vom Kühlaggregat erforderliche Leistung müssen zufolge von physikalischer Grundgesetze, in Summe null ergeben, ist die Summe Negativ, dann wird die Temperatur im Windkanal weiter sinken. Ist die Summe positiv, wurde die Windkanaltemperatur zu hoch gewählt. Die Eingabeparameter müssen entsprechend angepasst werden bis die Ergebnisse physikalisch sinnvoll sind.

$$Q_{\text{ERR,1}} := Q_{\text{GF}} + Q_{\text{ver}} = -15.9 \text{ W} \quad Q_{\text{ERR,1,d}} := Q_{\text{GF}} + Q_{\text{ver,d}} = -0.1 \text{ W}$$

Überprüfung Energiebilanz im Windkanal (Ohne Kühnkreislauf):

$$\text{Der im Gegenstrom-Wärmetauscher} \quad Q_{\text{wt}} = 57.1 \text{ W}$$

übertragene Wärmestrom in aus dem Windkanal:

$$Q_{1u} = 40.6 \text{ W}$$

$$\text{Der im primären Kreislauf} \quad Q_{1u,\text{el}} := Q_{\text{A,wk,ver}} + Q_{1u}$$

angenehmere Wärmestrom von der Umgebung:

Ist  $Q_{\text{wt}}$  größer als  $Q_{1u}$  wird dem Windkanal mehr Wärme entzogen als von der Umgebung zugeführt wird. Die Temperatur im WK müsste weiter sinken. Die Eingabe Parameter müssen angepasst werden, bis diese Bilanz im Gleichgewicht ist.

$$Q_{\text{ERR,2}} := -Q_{\text{wt}} + Q_{1u} = -16.6 \text{ W} \quad Q_{\text{ERR,2,d}} := -Q_{\text{wt}} + Q_{1u,\text{el}} = -0.8 \text{ W}$$

Ergebnisse

$$Q_{\text{ver,d}} = 113.7 \text{ W}$$

$$Q_{\text{GF}} = -113.8 \text{ W}$$