



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



Entwicklung eines Tragflächenprüfstandes zur Untersuchung der Vereisungseigenschaften von Slippery Liquid Infused Porous Surfaces (SLIPS)

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Anna Krejci, BSc

11732244

unter der Leitung von

a.o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl

und betreut von

Dipl.-Ing. Roland Fürbacher

Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Wien, Oktober 2023

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.

Wien, 20.10.2023

Stadt und Datum



Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Auf Seiten der TU Wien möchte ich zunächst Dipl.-Ing. Roland Fürbacher würdigen, der diese Diplomarbeit betreut und begutachtet hat. Seine Anregungen, Hilfestellung im Labor, und konstruktive Kritik waren der wichtigste Beitrag zu dieser Arbeit. Ebenso gehört mein Dank Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl, der diese Arbeit bereitgestellt hat und sich die Zeit nimmt, sie zu bewerten. Meine besondere Wertschätzung gebührt unterdessen auch Clemens Wiedermann für seine wertvolle Unterstützung im Bereich des 3D-Drucks. Ebenso erwähnen möchte ich Manfred Boehm, der mir mit viel Geduld und Hilfsbereitschaft bei diversen Versuchsaufbauten zur Seite stand, sowie Michael Heger, der die Betreuung der Fertigung für den Tragflächenprüfstand übernommen und mir wertvollen Input geliefert hat. Zu guter Letzt möchte ich mich herzlich bei Philipp Zeller bedanken, der den Klima-Windkanal betreut und mir bei den Versuchen dort zur Seite stand.

Weiterhin sollen die Firmen gewürdigt werden, ohne deren großzügige Bereitstellung von Samples meine Versuche nicht möglich gewesen wären. Dazu gehört die Firma DURST, das Wiener Unternehmen Spumix und das US-Unternehmen Porex. Allen diesen Unternehmen möchte ich aufrichtig für ihre Unterstützung danken.

Besonders möchte ich hier noch Nina von Tresckow danken, sowie Timo Kloska und Mia erwähnen, die stets zur Stelle waren, wenn ich Unterstützung brauchte. Timo mit seinem immensen Wissen im Bereich der Luftfahrt war eine unschätzbare Quelle für jegliche Art von Fachkenntnissen. Nina verdanke ich nicht nur ihr unermüdliches Korrekturlesen, sondern auch den besten Kaffee, ohne den ich nie die Motivation gefunden hätte, diese Arbeit zu schreiben.

Abschließend möchte ich mich bei allen meinen Freunden, ganz besonders Yannick Sturm, Sara Hofman, Simon Waldl, Dominic und Elena Möncks und Robert Kahlenberg bedanken, die mir alle einen wertvollen Input oder andere Arten der Unterstützung für diese Arbeit gegeben haben. Auch mein Dank gegenüber meiner Familie kann nicht unerwähnt bleiben. Insbesondere die bedingungslose Unterstützung meiner Eltern kann ich nicht genug würdigen, denn ohne sie und ihr unerschütterliches Vertrauen in mich wäre nichts von meinem Studium möglich gewesen.

Danke an alle, die ihren Teil dazu beigetragen haben, dass diese Diplomarbeit entstehen konnte.

Kurzfassung

Vereisung stellt in der Luftfahrt ein ernstzunehmendes Risiko dar. Zu den unmittelbaren Folgen von Eisanhaftungen insbesondere auf Flugzeugtragflächen gehören die Veränderung der Profilgeometrie und die Erhöhung des Gesamtgewichts, welche im Extremfall bis hin zum Strömungsabriss führen können. Herkömmliche Maßnahmen gegen die Vereisung von Flugzeugen können in Anti- und De-Icing Ansätze unterschieden werden, wobei beiden jedoch Defizite hinsichtlich Effizienz und Effektivität gemein sind.

Vor diesem Hintergrund beschäftigte sich diese Arbeit mit einer neuartigen Anti-Icing Methode basierend auf einer Kombination von nano- bzw. mikrostrukturierten Oberflächen und einem hochviskosen Silikonöl, um sogenannte Slippery Liquid Infused Porous Surfaces (SLIPS) zu erzeugen. Dazu wurden Stahlbleche zunächst mithilfe eines Femtosekundenlasers strukturiert und anschließend perforiert, wobei verschiedene Strukturgeometrien berücksichtigt wurden. Durch die Perforation konnten die rauen, laserstrukturierten Edelstahlflächen durch die Rückseite mit Silikonöl versorgt werden. Die so erzeugten Oberflächen wurden auf ihre Speicherfähigkeit, Benetzung- und Vereisungseigenschaften untersucht, wobei sich bereits in den Voruntersuchungen zeigte, dass der Abrollwinkel aller hergestellten SLIPS auf unter 5° gesenkt werden konnte. Die DIMPLES-Struktur wies darüber hinaus die beste Silikonöl-Speicherfähigkeit auf und wurde daher für die Untersuchung der Vereisungseigenschaften ausgewählt.

Zur Erprobung der Resistenz gegen das Vereisen wurden zwei eigens gefertigte Prüfstände für den am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU-Wien zur Verfügung stehenden Klima-Windkanal konzipiert, um die Untersuchungen unter dynamischen Vereisungsbedingungen durchführen zu können. Der erste Prüfstand ermöglichte die Befestigung kleiner Blechproben über einer Ölversorgung, während der zweite, modular aufgebaute Prüfstand mit einem symmetrischen NACA-0012 Querschnitt einer Tragflügelsektion nachempfunden war. Beide Prüfstände konnten in den Versuchen eine kontinuierliche Ölversorgung der SLIPS-Oberflächen sicherstellen.

Im experimentellen Teil dieser Arbeit zeigte sich, dass durch die Verwendung von SLIPS die anhaftende Eismasse im Vergleich zu Referenzproben in allen Versuchen verringert werden konnte. Auch der Vereisungsprozess unterschied sich, da das Eis bei den SLIPS deutlich weniger, bis gar nicht anhaftete und visuell auf der Oberfläche zu schwimmen schien. Es kam außerdem zum sogenannten „Shedding“, also zum Abbrechen größerer Ansammlungen von Eis, induziert durch den aerodynamischen Staudruck. Darüber hinaus konnte beim Einsatz der kontinuierlichen Ölzufuhr im Tragflächenprüfstand erstmals die Bewegung der Eisakkumulationen genauer beobachtet werden. Zusammenfassend konnte in den Experimenten gezeigt werden, dass die entstehende Eisschicht nicht an den SLIPS haftete, sondern sich durch das fortschreitende Anhaften von Wasser und Eis an abrollenden Wassertropfen bildete. Bei einem finalen Versuch mit hoher Windgeschwindigkeit (~ 150 km/h) konnte allerdings durch das vollständige Abtragen der Wassertropfen eine umfassende Anti-Icing Wirkung beobachtet werden.

Abstract

Icing is a serious risk in aviation. Immediate consequences of ice adhesion, especially on aircraft wings, include changes in the airfoil geometry and an overall weight increase, which in extreme cases may lead to a stall. Conventional measures against icing on aircraft can be distinguished into anti-icing and de-icing approaches, yet both are deficient regarding efficiency and effectiveness.

Against this background, this work analyzed a novel anti-icing method based on a combination of nano- or micro-structured surfaces and high-viscosity silicone oil to create so-called Slippery Liquid Infused Porous Surfaces (SLIPS).

For this purpose, stainless-steel sheets were structured using a femtosecond laser and subsequently perforated, drawing on three different structural geometries. The perforation allowed to supply the rough, laser-structured sheet surfaces with silicone oil through the backside. The surfaces created in this way were tested for their storage capacity, wetting, and icing properties. Preliminary tests already showed that the roll-off angle of all SLIPS produced could be reduced to less than 5° . The DIMPLES structure additionally exhibited the best silicone oil storage capacity and was therefore selected for further investigation of the icing properties.

To test the resistance to icing, two custom-made test stands were designed for the climatic wind channel available at the Institute for Production Engineering and Photonic Technologies at TU Vienna, allowing to conduct tests in dynamic icing conditions. In the first test stand, small steel sheet samples were mounted above an oil supply, while in the second, modular test stand, a symmetrical NACA-0012 wing cross-section was modeled. Both test stands were able to ensure a continuous oil supply to the SLIPS surfaces during the tests.

In the experimental part of this work, it was shown that by using SLIPS, the adhesive ice mass could be reduced in all tests when compared to reference samples. Additionally, a differing icing process could be observed, as the forming ice had little to no adhesion to the modified surfaces, visually appearing to float on the SLIPS tested. In addition, so-called "shedding" occurred, i.e., larger ice accumulations breaking off due to aerodynamic pressure. Furthermore, drawing on the continuous oil supply in the wing test stand for the first time allowed for more precise observation of moving ice.

In summary, the experiments showed that when using SLIPS, the forming ice layer did not adhere to the surface itself but was rather formed by the progressive adhesion of water and ice to water drops rolling of the SLIPS. In this context, a final test at a higher wind speed (~ 150 km/h) proved a comprehensive anti-icing effect due to the wind speed-induced complete removal of water drops.

Inhalt

Danksagung	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
1. Einleitung	1
2. Aufbau und Zielsetzung der Arbeit	3
3. Stand des Wissens	5
3.1 Vereisung in der Luftfahrt	5
3.1.1 Problematik	5
3.1.2 Atmosphärische Bedingungen	6
3.1.2.1 Unterkühltes Wasser	6
3.1.2.2 Eiswolken und Schnee	7
3.1.2.3 Raureif	7
3.1.3 Eisbildung auf Tragflächen	7
3.1.3.1 Eisarten	8
3.1.4 Arten des Eisschutzes	12
3.1.4.1 De-/Anti-Icing am Boden	12
3.1.4.2 De-/Anti-Icing in der Luft	13
3.1.4.3 Neuartige Ansätze und Technologien	15
3.2 Nano- und mikrostrukturierte Oberflächen	17
3.2.1 Laserstrukturierte Oberflächen	17
3.2.1.1 Verfahren zur Strukturierung	17
3.2.1.2 Laserinduzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS)	19
3.2.2 Hydrophobe Eigenschaften strukturierter Oberflächen	20
3.2.2.1 Benetzungseigenschaften	20
3.2.2.2 Vereisungseigenschaften	24
3.2.3 Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces	25

4.	Geräte und Versuchsaufbauten	29
4.1	Laser-Anlage	29
4.1.1	FEMTOPOWER compact PRO	29
4.1.1.1	Aufbau des Lasersystems	30
4.1.1.2	Erzeugung ultrakurzer Pulse	31
4.1.1.3	Streckung, Verstärkung und Komprimierung der Pulse	33
4.1.1.4	Funktionsweise Pockelszelle	35
4.1.2	Äußere Strahlführung und Formung	36
4.1.3	Verfahrenanlage	37
4.2	Weitere Versuchsaufbauten	38
4.2.1	Wassersäule	38
4.2.2	Versuchsaufbau zur Speicherfähigkeit und Fluidverteilung	39
4.2.2.1	Halterung für den Klima-Windkanal	40
4.3	Konstruktion des Tragflächenprüfstandes	41
4.3.1	Anforderungen und Umsetzung	41
4.3.2	Konstruktion des Grundkörpers	43
4.3.2.1	Rippen	44
4.3.2.2	Verbindungsteil	44
4.3.2.3	Endteil	45
4.3.3	Auswahl und Konstruktion des Kerns	46
4.3.3.1	Poroplast	47
4.3.3.2	Poröse Faser	51
4.3.3.3	Spumix Keramikschaum	52
4.3.3.4	TKS-Adaption	53
4.3.3.5	Microlattice (3D-Druck)	54
4.3.3.6	Metallschäume	56
4.3.3.7	Zusammenfassung und Auswahl	57
4.3.4	Zusammenbau	59
4.3.5	Einbau in den Klima-Windkanal	63
4.4	Optische Mikroskopie	64
4.4.1	Reichert Zetopan Mikroskop	64
4.4.2	Zeiss AxioImager Mikroskop	65
4.5	Kontakt- und Abrollwinkelmessung	66
4.6	Klima-Windkanal	67

5.	Experimenteller Teil	68
5.1	Erzeugung von Perforierungen	68
5.1.1	Bestimmung der Perforationsparameter	68
5.1.2	Untersuchungen am Lichtmikroskop	70
5.1.3	Versuche zur Durchlässigkeit und Verteilung von Fluiden	72
5.2	Vorversuche zu den Oberflächenstrukturen	73
5.2.1	Fertigung der strukturierten Oberflächen	73
5.2.2	Evaluierung des Speichervermögens der Oberflächenstrukturen	74
5.2.3	Kontakt- und Abrollwinkelmessung der Probenoberfläche	77
5.2.3.1	DIMPLES-Struktur	78
5.2.3.2	LINIEN-Struktur	79
5.2.3.3	LIPSS-Struktur	80
5.2.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	80
5.3	Vereisungsversuche im Windkanal	82
5.3.1	Bestimmung der Vereisungsparameter	82
5.3.2	Bestimmung des Vereisungsgrads	83
5.3.2.1	Gravimetrische Messung	83
5.3.2.2	Visuelle Bewertung der Vereisungszustände	85
5.3.3	Vereisungsversuche am Tragflächenprüfstand	86
5.3.3.1	Versuche ohne zusätzliche Silikonölaufuhr	87
5.3.3.2	Versuche mit zusätzlicher Silikonölaufuhr	89
6.	Zusammenfassung und Ausblick	93
6.1	Zusammenfassung	93
6.2	Ausblick	96
7.	Verzeichnisse	97
7.1	Literaturverzeichnis	97
7.2	Abbildungsverzeichnis	102
7.3	Tabellenverzeichnis	106
A.	Anhang	107

1. Einleitung

Obwohl Fliegen als eine der sichersten Arten der Fortbewegung gilt, stellt Vereisung nach wie vor eine große Problematik in der Luftfahrtindustrie dar. Immer wieder kommt es dabei insbesondere durch das Vereisen von Flugzeugtragflächen zu gefährlichen Situationen, und in der Vergangenheit teils auch zu schweren Unfällen. So stürzte beispielsweise in 2020 in Kasachstan eine Fokker-100 mit 12 Menschen an Bord nur wenige Minuten nach dem Start ab, nachdem ihre Tragflächen zuvor nur teilweise enteist worden waren. Ähnlich erging es 2009 einer Dash 8-402 im US Bundesstaat New York, welche mit 49 Insassen im Landeanflug aufgrund erheblicher Vereisung der Tragflächen fast senkrecht in ein Wohnhaus stürzte. In beiden Fällen gab es keine Überlebenden [1]–[3].

Eisbildung am Flugzeug kann unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen auftreten, und betrifft die äußeren Teile des Flugzeuges, wie beispielsweise die Flügel, Triebwerke, oder Steuerflächen. Je nach Wetterzustand können sich verschiedene Arten von Eis bilden, abhängig unter anderem von den vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen, der Luftfeuchtigkeit, und dem Vorhandensein von möglichen Kristallisationskeimen und Luftblasen im Wasser [4], [5]. Während Raueis die in der Luftfahrt am häufigsten auftretende Eisart ist, geht das größte Sicherheitsrisiko von Klareis aus [1]–[5]. Beide lagern sich bevorzugt an Flugzeugtragflächen ab, und dort wegen des aerodynamischen Staudrucks besonders an den Vorderkanten. Zu den in der Luftfahrt am häufigsten auftretenden Eisarten gehört ebenso Raureif, welches sich im Gegensatz zu den beiden vorig genannten Eisarten allerdings vorrangig am Boden ausbildet, und nicht während des Fliegens [4], [6].

Allen Eisarten gemein sind die potenziell schwerwiegenden Folgen, welche sich aus der Veränderung der Profilgeometrie der Tragflächen und der Erhöhung des Gewichts des Flugzeugs ergeben. Die daraus resultierenden veränderten aerodynamischen Eigenschaften reichen von einer leichten Verringerung des Auftriebs, bis hin zum Strömungsabriss im Extremfall [7]–[9]. Zudem führt das zusätzliche Gewicht zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Entsprechend groß ist das Interesse von Wissenschaft und Industrie, bestehende Vereisungsschutzmethoden zu verbessern, sowie neuartige, effektive und effiziente Maßnahmen gegen die Vereisung von Flugzeugen und insbesondere von Flugzeugtragflächen zu entwickeln.

Diese Maßnahmen gegen Vereisungen können dabei grundsätzlich in Anti- und De-Icing Ansätze unterschieden werden. Beim De-Icing handelt es sich um einen aktiven Prozess, bei dem bereits gebildetes Eis wieder von einer Oberfläche entfernt wird. Anti-Icing Methoden hingegen zielen darauf ab, eine Vereisung von vornherein zu verhindern. In beiden Fällen können die ergriffenen Maßnahmen in Bezug auf Material, Zeitaufwand, benötigter Ausrüstung und möglicher Umweltschäden kostspielig sein [10], [11].

Beim Anti-Icing, mit welchem sich diese Arbeit beschäftigt, geht es primär darum, Oberflächen so zu gestalten, dass sie eisphob werden, in anderen Worten, dass die Anhaftung von Eis entweder verringert

oder im Idealfall vollständig verhindert wird. Ein neuartiger Ansatz vor diesem Hintergrund sind sogenannte Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces (SLIPS). Hierbei wird ein poröses Substrat mit Schmiermittel getränkt, um die Benetzungseigenschaften gezielt zu modifizieren. Die SLIPS, welche den Fokus dieser Arbeit bilden, sollen aus einer Kombination von nano- beziehungsweise mikrostrukturierten Oberflächen und einer Infusion aus Silikonöl gebildet werden. Dies zielt darauf ab, ein hydrophobes Verhalten zu erzeugen und so die Anhaftung von Wasser im Vereisungsprozess zu verringern oder ein Abfallen von größeren Eisansammlungen, auch als „shedding“ bezeichnet, zu erleichtern.

Die Eignung von SLIPS für Anti-Icing-Anwendungen wurde bereits wissenschaftlich untersucht. Hierbei wurden in Testläufen die Oberflächen jedoch nur einmalig mit Öl als Schmiermittel benetzt, statt auf eine kontinuierliche Versorgung zu setzen. In der Folge ergaben sich bei mehreren Vereisungszyklen zwar zunächst sehr gute Ergebnisse, mit der zunehmenden Abtragung des Ölfilms nahmen die eisphoben Eigenschaften jedoch zusehends ab. So zeigten sich im Endergebnis aufgrund der mangelnden Speicherfähigkeit der untersuchten Oberflächen nicht nur stark ansteigende Adhäsionskräfte des Eises, sondern tatsächlich auch Beschädigungen an der Oberfläche selbst. Zudem wurde die Anwendung von SLIPS-Anti-Icing Systemen an Flugzeugtragflächen noch nicht wissenschaftlich untersucht [12].

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Erprobung von verschiedenen SLIPS Varianten für die Anwendung als Anti-Icing System an der Vorderkante von Flugzeugtragflächen. Das folgende Kapitel geht näher auf die hierbei verfolgte Zielsetzung und den Aufbau der Arbeit ein.

2. Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Die Arbeit ist so aufgebaut, dass im Kapitel 3 der Stand der Technik bezüglich Vereisungen und Eisschutz in der Luftfahrt einerseits und die Besonderheiten strukturierter Oberflächen und SLIPS andererseits vorgestellt werden. Hierdurch werden alle nötigen Grundlagen geschaffen, die für das weitere Verständnis der Arbeit essenziell sind. In Kapitel 4 werden alle verwendeten Geräte sowie die selbst konstruierten Teile, inklusive des Tragflächenprüfstands, vorgestellt und die jeweiligen Funktionsweisen genau erläutert. Speziell findet sich hier auch eine genaue Abhandlung des verwendeten Laser Systems. Kapitel 5 enthält die Ergebnisse und Auswertungen des experimentellen Teils, einschließlich aller Vorversuche und Vereisungsversuche im Klima-Windkanal an den modifizierten strukturierten Blechen. Kapitel 6 fasst zuletzt die wesentlichen Ergebnisse zusammen, wobei einerseits die Eignung des Tragflächenprüfstandes evaluiert wird und andererseits die Resistenz der getesteten Bleche gegen Vereisung. Schlussendlich werden eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf weitere mögliche Versuche gegeben.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, die Vereisungseigenschaften von selbst hergestellten SLIPS an der Vorderkante von Flugzeugtragflächen unter dynamischen Vereisungsbedingungen im Klima-Windkanalaufbau zu untersuchen. Um dieses Ziel zu erreichen, gliedert sich diese Arbeit entlang des Eingangs beschriebenen Aufbaus in zwei wesentliche Abschnitte, deren spezifische Abfolge in Abbildung 1 zu sehen ist.

Der erste Abschnitt beschreibt die Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines maßgeschneiderten Tragflächenprüfstandes und eines Versuchsaufbaus für den Windkanal, die beide speziell auf die hergestellten Probenbleche angepasst sind. Die Anforderungen an den Tragflächenprüfstand sind zum einen, die Bleche in einer Tragflächenform zu halten und so dynamische Vereisungsbedingungen für die Untersuchungen nachzustellen, und zum anderen, eine Fluidförderung zu den SLIPS und die Implementierbarkeit in den Klima-Windkanal zu gewährleisten.

Der zweite Abschnitt umfasst die Herstellung der SLIPS selbst. Hierfür wird ein Femtolaser eingesetzt, der in der Lage ist, Nano- und Mikrostrukturen auf Oberflächen zu erzeugen. Zusätzlich dazu wird Silikonöl verwendet, um die Struktur zu infundieren. Um die Oberfläche in dem benetzten Zustand zu halten, werden Mikrokanäle in die strukturierten Oberflächen lasergebohrt. Dies dient dazu, die Bleche im Versuchsaufbau kontinuierlich mit Öl zu versorgen und somit die Funktionalität der SLIPS aufrecht zu erhalten.

Schlussendlich wird im Zuge dieser Arbeit angestrebt, wirksame und beständige Anti-Icing Beschichtungen zu erzeugen, die Vereisungseigenschaften der entwickelten SLIPS in einer realitätsnahen Umgebung mithilfe eines Tragflächenprüfstandes zu erforschen und die Eignung dieser Oberflächen als Anti-Icing Lösung für Luftfahrtanwendungen zu bewerten.



Abbildung 1 Strukturierung und die Schwerpunkte der Arbeit

3. Stand des Wissens

3.1 Vereisung in der Luftfahrt

3.1.1 Problematik

Eisbildung kann unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen auftreten und auf den äußeren Teilen eines Luftfahrzeuges, wie beispielsweise den Flügeln, den Triebwerken oder den Steuerflächen, zu einer Eisschicht führen. Dieser Prozess wird als Vereisung bezeichnet, wobei die aus der Erhöhung des Luftwiderstandes und Gewichts resultierenden, veränderten aerodynamischen Eigenschaften weitreichende Folgen haben können. Diese Veränderungen können von einer leichten Verringerung des Auftriebs, bis hin zum Extremfall eines Strömungsabrisses führen. Dies resultiert aus der übermäßigen Veränderung der Profilgeometrie der Trag- und Steuerflächen [7], [8], [9].

Abbildung 2 illustriert die Auswirkungen auf den Luftwiderstand, die Auftriebskraft und die daraus resultierende aerodynamische Kraft.

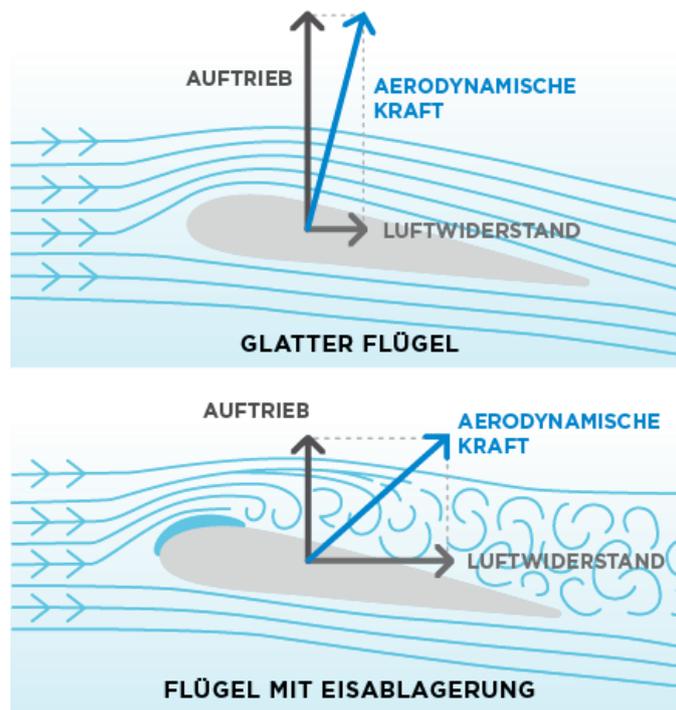


Abbildung 2 Auswirkungen von Vereisung auf Luftwiderstand und Auftrieb [20]

3.1.2 Atmosphärische Bedingungen

Die atmosphärischen Bedingungen spielen die entscheidende Rolle bei der Flugzeugvereisung. In den meisten Fällen tritt Eisbildung an Luftfahrzeugen aufgrund von unterkühltem Wasser auf, wovon unterkühlte Wolken und gefrierender Niederschlag die Hauptformen sind. Zudem können auch Cirusswolken, also Eiswolken, welche nur in großer Höhe existieren, gefrorener Niederschlag, wie etwa Schnee und Raureif zu einer Vereisung führen. Letzteres tritt vorwiegend bei klarem Wetter am Boden auf [13], [14].

3.1.2.1 Unterkühltes Wasser

Unterkühltes Wasser bezeichnet Wasser, dessen Temperatur unter 0 °C liegt und das dennoch in flüssiger Form vorliegt. Das Gefrieren von Wasser wird von verschiedenen Parametern beeinflusst, beispielsweise von Verunreinigungen und der Bewegung des Wassers. Unterkühltes Wasser tritt entweder als mikroskopische Tröpfchen in Wolken oder Nebel auf, oder als gefrierender Niederschlag. In natürlicher Umgebung kann unterkühltes Wasser Temperaturen von bis zu -40 °C erreichen, wobei die Temperatur der flüssigen Tropfen in Wolken meist zwischen 0 °C und -12 °C liegt, und bei Temperaturen unter -20 °C Eiskristalle in den Wolken dominieren. Die Entstehung von gefrierendem Niederschlag hingegen erfolgt meist, wenn Wasser aus einer wärmeren Luftschicht mit Temperaturen über 0 °C in eine kältere Schicht mit Temperaturen unter 0 °C gelangt [13], [14].

Wenn unterkühltes Wasser auf feste Oberflächen trifft, wie beispielsweise die Außenhaut von Flugzeugen, gefriert es und bildet eine Eisschicht. Bei sehr niedrigen Temperaturen unter -10 °C gefrieren unterkühlte Wassertropfen sofort beim Aufprall auf die Flugzeugoberfläche, da diese als heterogene Keimstelle dient. Auf diese Art bildet sich eine Eisschicht aus, wenn zahlreiche solcher Tropfen auf die Oberfläche treffen [4]. Üblicherweise haben unterkühlte Wassertropfen in Wolken einen Durchmesser von 1 µm bis 50 µm, können jedoch in Ausnahmefällen auch 100 µm überschreiten. Gemeinsam mit gefrierendem Nieselregen (50-500 µm) und gefrierendem Regen (>500 µm) bilden sie die Kategorie der supergekühlten großen Tröpfchen, in Englisch als Supercooled Large Droplets (SLD) bezeichnet [6]. Insgesamt besteht in einem Temperaturbereich von etwa 0 °C bis -40 °C Außentemperatur ein Eisbildungsrisiko durch unterkühltes Wasser an Flugzeugen. Dieses Risiko steigt besonders im Temperaturspektrum nahe 0 °C, da hier der sogenannte Liquid Water Content (LWC), also der Anteil des flüssigen Wassers, größer ist. In der Standardatmosphäre beginnt die untere Grenze von -40 °C in etwa 7.000 Metern Höhe, weshalb in größeren Höhen der LWC geringer ist. Für herkömmliche Passagierflugzeuge, die in Höhen von ungefähr 10.000 Metern operieren, ist Eisbildung deshalb normalerweise nur während des Startens und Landens von Bedeutung [14].

Die Intensität der Vereisung wird hauptsächlich von der Umgebungstemperatur, dem LWC und der Größe der Tropfen, dem Median Volume Diameter (MVD) beeinflusst. Weiterhin spielen Faktoren wie die Form der Flugzeugkomponenten, die Luft- und Fluggeschwindigkeit, sowie die Dauer des Flugs eine Rolle [4], [15].

3.1.2.2 Eiswolken und Schnee

Eiswolken sowie Schneeflocken bestehen aus festen Eiskristallen. Im Flug prallen diese normalerweise gegen die Hülle eines Luftfahrzeugs, ohne daran festzufrieren. Wenn jedoch diese Hülle eine Temperatur oberhalb von 0 °C aufweist, kann dies dazu führen, dass die Eiskristalle bei Kontakt aufschmelzen. Sobald die Oberfläche im weiteren Zeitverlauf dann wieder auf unter 0 °C abkühlt, friert das geschmolzene Wasser. Besonders gefährlich ist es, wenn unterkühltes Wasser auf Schnee oder Eis trifft, da die Eispartikel beim Gefrieren des Wassers daran haften können und somit die Vereisung stark beschleunigt wird [16].

Ein ähnlicher Effekt kann durch thermische IPS – Ice Protection Systems, wie in Kapitel 3.1.4.2 beschrieben, oder durch aerodynamische Erwärmung ausgelöst werden. Konventionelle IPS erwärmen die Vorderkante der Flügel und lassen das dort anhaftende Eis schmelzen. Das resultierende geschmolzene Wasser wiederum kann dann in nicht-beheizte Bereiche fließen und dort erneut gefrieren. Zusätzlich kann die Luft an Stellen mit hohem Luftwiderstand, wie beispielsweise an den Profilkanten von Flügeln oder Leitwerken, aufgrund ihrer eigenen Kompression so stark erhitzt werden, dass das dort angesetzte Eis schmilzt und anschließend an anderer Stelle erneut gefriert [6].

3.1.2.3 Raureif

Raureif entsteht dann, wenn Wasserdampf direkt in den festen Zustand übergeht, ohne zunächst flüssig zu werden. Dieser Prozess tritt auf, wenn die Außenhülle eines Luftfahrzeugs eine Temperatur unterhalb von 0 °C aufweist und die umgebende Luft eine hohe relative Luftfeuchtigkeit besitzt. Wenn unter diesen Bedingungen die feuchte Luft mit der kühlen Hüllenoberfläche in Kontakt kommt, kühlt sie stark ab und resublimiert auf der kälteren Oberfläche, sodass eine kristalline Eisschicht entsteht [4]. In der Luftfahrt tritt Raureifbildung beispielsweise auf, wenn Luftfahrzeuge ohne Schutz über Nacht im Freien stehen, oder wenn sich die Temperatur der umgebenden Luft beim Auf- oder Abstieg während des Fliegens rasch verändert [4], [6].

3.1.3 Eisbildung auf Tragflächen

Obwohl Eis unter natürlichen Bedingungen immer die gleiche Kristallstruktur aufweist, können je nach den Umständen, unter denen es sich bildet, unterschiedliche Formausbildungen der Eisschichten auftreten. Dies ist eng mit den atmosphärischen Bedingungen verknüpft, unter denen die Eisbildung stattfindet [5]. Die wesentlichen Faktoren, die die Bildung von Eis beeinflussen, sind die vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse, die Luftfeuchtigkeit, das Vorhandensein von Luftblasen im Wasser und die Reinheit des Wassers in Bezug auf mögliche Kristallisationskeime. In der Luftfahrt wurden die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen, die zu verschiedenen Formen der Eisbildung führen, bereits ausgiebig erforscht. Grundsätzlich lassen sich drei Hauptformen

unterscheiden: Klareis, Raueis und Raureif. Weiterhin kann auch Mischeis auftreten, das eine Kombination aus Klareis und Raueis darstellt [4], [5].

Die Entstehung von Eis auf den Tragflächen geht in der Regel mit dem Durchqueren niedriger Wolken mit unterkühlten Wassertropfen einher. Wenn unter diesen Bedingungen die Oberfläche des Flugzeugs mit unterkühltem Flüssigwasser in Form von flüssigen Wolkenpartikeln und Niederschlag in Kontakt kommt, kann sich grundsätzlich Eis bilden [7]. Die Eisbildung findet aufgrund des aerodynamischen Staupunktes bevorzugt an der Tragflächenvorderkante statt. Diese stellt somit den ersten Kontaktpunkt für eisbildende Partikel dar, weshalb hier folglich schneller Eis angesetzt wird als an anderen Teilen des Flugzeugs [15].

3.1.3.1 Eisarten

Raueis entsteht, wenn kleine stark unterkühlte Wassertropfen, in der Regel mit einem Durchmesser von unter 20 μm , mit einer Oberfläche in Kontakt kommen, die eine Temperatur unter 0 °C aufweist. Im Gegensatz zu größeren unterkühlten Wassertropfen gefrieren sie unmittelbar und komplett. Dabei bilden sich zwischen den erstarrten Tropfen Luftporen, die zu einer weißen, rauen Oberfläche führen, und maßgeblich die Charakteristik der Raueisschicht prägen. Im Vergleich zu anderen Eisarten hat Raueis aufgrund des hohen Luftanteils die geringste Dichte und zeigt sprödes mechanisches Verhalten [13], [4]. Durch das rasche Gefrieren bildet sich eine Raueisschicht vor allem an den Vorderkanten von Tragflächen, wobei sich die Ausbreitung stromlinienförmig an der Vorderseite des umströmten Körpers entlangzieht. Dies kann aerodynamisch problematisch sein, da es so nicht nur zu einer deutlich rauerer Eisoberfläche im Vergleich zur Flugzeugoberfläche kommt, sondern auch zu einer Veränderung des Profils. Bei längeren Vereisungszeiten kann die Raueisschicht ihre ursprünglich stromlinienförmige Geometrie verlieren und bei ausreichender Eismasse eine speerspitzenartige Form annehmen. Dies ist auch anhand der abgebildeten Eisschichtgeometrien der Abbildung 7 zu erkennen. Im Extremfall können die Änderung des Profils und die raue Oberfläche zu einem Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung führen, und sogar einen Strömungsabriss bewirken. Eine mit Raueis bedeckte Flügelvorderkante mit dem charakteristischen trüben Aussehen ist in Abbildung 3 dargestellt [5], [8].

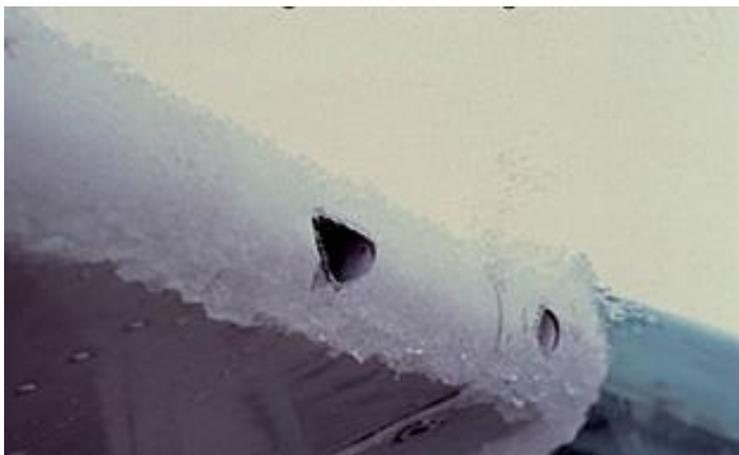


Abbildung 3 Ausbildung von Raueis an der Tragflächenvorderkante [8]

Klareis entsteht, wenn große unterkühlte Wassertropfen auf die äußere Hülle eines Flugzeugs treffen. Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erwähnt, werden Wassertropfen mit einem Durchmesser von über $100\ \mu\text{m}$ als SLD klassifiziert. Das unterkühlte flüssige Wasser gefriert, sobald es die Festkörperoberfläche berührt. Bei der Bildung von Klareis sind die Wassertropfen jedoch zu groß, um sofort vollständig zu gefrieren und so rinnt ein großer Teil des Tropfens in Strömungsrichtung entlang des Flügelprofils nach hinten und gefriert währenddessen graduell [5]. Dieser Teil des Niederschlags, welcher so abfließt und gefriert, wird als sogenanntes "Runback-Ice" bezeichnet. Dieser Prozess tritt besonders in Erscheinung, wenn gefrorenes Eis durch De-Icing Systeme an der Flügelvorderkante schmilzt und dann weiter hinten auf der Tragfläche erneut gefriert [10].

Der Gefrierprozess geschieht hierbei in ausreichendem Maße langsam, um eine gleichmäßigere Ausbreitung des Wassers vor der Erstarrung zu ermöglichen. Dadurch ist die entstandene transparente Eisschicht oft schwer zu erkennen [6]. Eine solche Eisschicht an der Tragflächenvorderkante ist in Abbildung 4 zu beobachten. Klareis stellt die riskanteste Form der Vereisung dar, da die Eisschicht innerhalb weniger Minuten unbemerkt um mehrere Zentimeter wachsen kann, was das Gewicht des Flugzeugs beträchtlich erhöht [4], [9].



Abbildung 4 Ausbildung von Klareis an der Tragflächenvorderkante [5]

Klareis entsteht daher vor allem in gefrierendem Niederschlag und in Wolken mit großen unterkühlten Wassertropfen. Außerdem ist diese Form von Eis wahrscheinlicher, wenn die Temperatur nahe an $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt, da dann der Rückfluss des Wassers auf den Tragflächen oder Leitwerken am größten ist [6].

In bestimmten Fällen, in denen Temperatur und Tropfengröße in einer speziellen Kombination auftreten, kann sogar eine Doppelhorn-Form entstehen. Diese tritt vor allem an der Vorderkante der Tragflächen auf und zeichnet sich durch Vorsprünge sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Vorderkantenoberfläche aus [8]. Die Eisschichtgeometrie im Verlauf der Vereisung wird in Abbildung 7 dargestellt, einmal nach 15 Minuten und nach 45 Minuten [5]. Zudem hat Klareis aufgrund seiner hohen Dichte ein zusätzliches, beträchtliches Gewicht. Die Entfernung ist oft äußerst herausfordernd, da es aufgrund seiner Festigkeit bei der Ablösung Schäden am Luftfahrzeug verursachen kann [4], [15].

Mischeis ist eine Form von Eis, welche sich aus einer Kombination von Klareis und Raueis entwickelt. Dies erfolgt, wenn die Wassertropfen, die auf die Flugzeugoberfläche treffen, bezüglich ihres Durchmessers variieren. Während größere Tröpfchen zur Bildung von Klareis führen, bewirken Tröpfchen mit kleinerem Durchmesser beim Aufprall das Entstehen von Raueis [4], [5]. Wird das Raueis in das Klareis miteingebunden, entsteht durch die Lufteinschlüsse im Raueis ein milchiges Erscheinungsbild der Eisschicht. Eine Mischeisschicht kann ebenfalls bereits zuvor gefrorene Schnee- oder Eispartikel enthalten. In Abbildung 5 ist eine solche ausgebildete Eisschicht zu sehen. Bildet sich eine Mischeisschicht an der Flügelvorderkante, weist sie in der Geometrie die in Abbildung 7 gezeigte leicht pilzförmige Kontur mit rauen Kanten auf [17].



Abbildung 5 Ausbildung von Mischeis an der Tragflächenvorderkante [17]

Die Entstehung von Raureis ist bereits im Abschnitt 3.1.2.3 erläutert, weshalb diese hier nicht erneut aufgeführt wird.

Insgesamt ist Raueis die in der Luftfahrt am häufigsten auftretende Eisart (Abbildung 6). Das höhere Sicherheitsrisiko geht jedoch klar von der Bildung von Klareisschichten auf der Flugzeugtragfläche aus, was vor allem deren strömungsbehindernder Eisschichtgeometrie und hoher Gewichtszunahme geschuldet ist. Die verschiedenen entstehenden Eisschichtgeometrien sind nochmals in Abbildung 7 zusammengefasst [5].

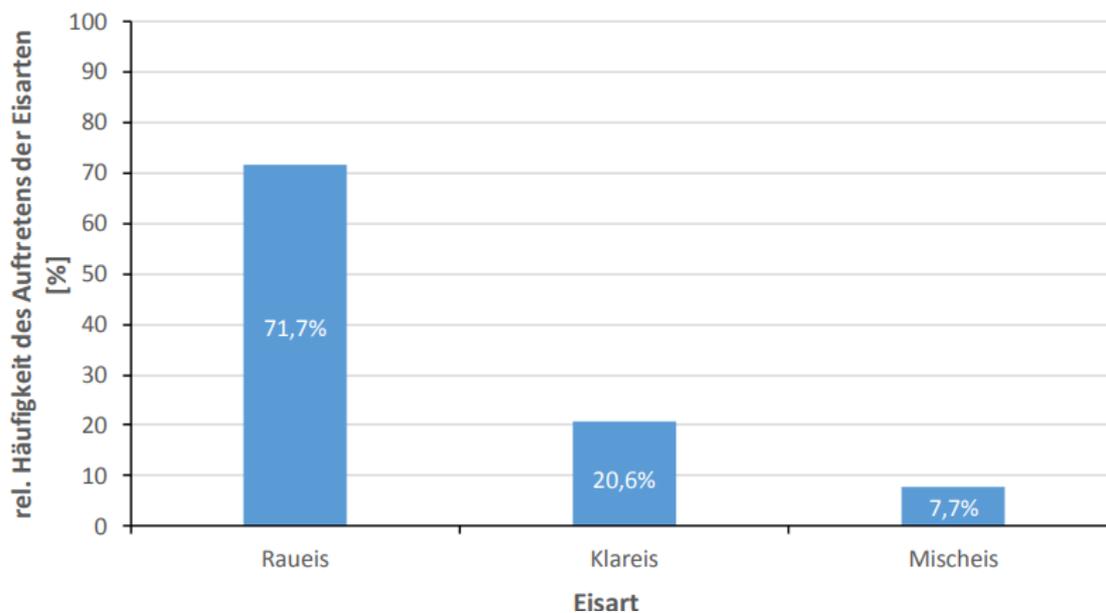


Abbildung 6 Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Eisarten [5]

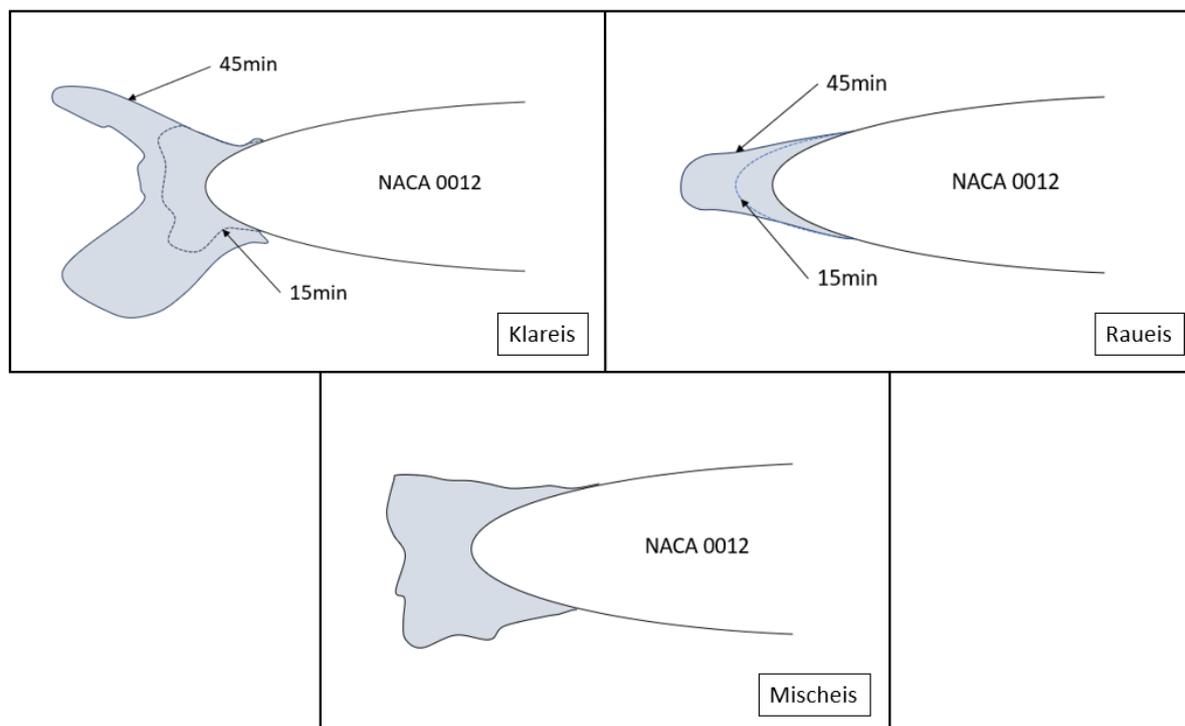


Abbildung 7 Entstehende Eisschichtgeometrien an einem NACA-0012 Profil [5]

3.1.4 Arten des Eisschutzes

Bei den Verfahren zum Eisschutz werden grundsätzlich zwei Arten unterschieden: De-Icing und Anti-Icing. Beim De-Icing, auch Enteisung genannt, handelt es sich um den Prozess, bei dem bereits gebildetes Eis von einer Oberfläche entfernt wird. Entsprechend sind Enteisungsgeräte darauf ausgelegt, bereits vorhandenes angesammeltes Eis zu beseitigen [10]. Unter Anti-Icing werden verschiedene aktive als auch passive vorbeugende Maßnahmen verstanden, die darauf abzielen, die Bildung von Eis auf einer Oberfläche zu verhindern. Sie können sowohl auf dem Boden als auch in der Luft angewendet werden [10], [11]. De-Icing ist folglich ein reaktiver Ansatz, während Anti-Icing eine proaktive Maßnahme zur Vorbeugung von Eisbildung darstellt [11]. Die Maßnahmen zum Eisschutz können in Bezug auf Material, Zeitaufwand, benötigter Ausrüstung und mögliche Umweltschäden kostspielig sein. Im Bereich der Anti-Icing-Technologien gibt es verschiedene Ansätze, die darauf abzielen, die Oberfläche, auf der Eisbildung stattfindet, so zu verändern, dass sie eisphob wird [18]. Das bedeutet, dass die Haftung von Eis entweder verringert oder vollständig verhindert wird. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt speziell auf dem Einsatz von nano- und mikrostrukturierten Oberflächen, um der Vereisung von Tragflächen entgegenzuwirken.

3.1.4.1 De-/Anti-Icing am Boden

Beim sogenannten Ground De-Icing, durch welches am Boden vereiste Flugzeuge für den Start vorbereitet werden, kommen vorwiegend spezielle Flüssigkeiten zum Einsatz. Diese basieren auf einer Mischung aus Wasser und Glykol, entweder Ethylenglykol oder Propylenglykol, und zusätzlichen Additiven. Für den reinen De-Icing-Prozess wird zumeist Flüssigkeit Typ I verwendet. Sie enthält einen hohen Anteil an Glykol, wodurch sie Eis besonders effektiv löst und nach der Anwendung vom Flugzeug abfließen lässt [19].

Um das Flugzeug zwischen dem De-Icing-Vorgang und dem Start vor erneuter Vereisung zu schützen, wird beim Anti-Icing ein gleichmäßiger und zusammenhängender Film der Flüssigkeit Typ II oder IV auf die gesamte Flugzeugoberfläche oder auf spezifische Komponenten aufgetragen. Abbildung 8 veranschaulicht den Prozess des klassischen Verfahrens. Der aufgetragene Film der Anti-Icing-Flüssigkeit verliert nach einer bestimmten Vorhaltezeit, auch bekannt als "Holdovertime", seine Wirksamkeit. Ab diesem Zeitpunkt ist das Flugzeug nicht länger vor Vereisung geschützt. Die Dauer hängt von den meteorologischen Bedingungen sowie von der verwendeten Anti-Icing-Flüssigkeit ab [20].

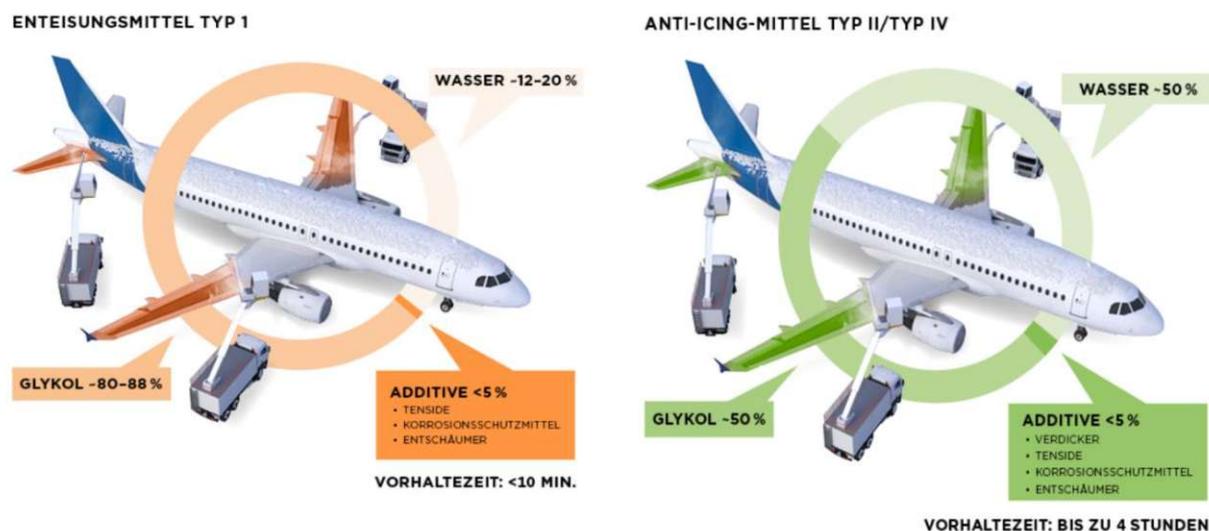


Abbildung 8 Klassisches Enteisen von Passagierflugzeugen am Boden [20]

Die Problematik bei der Verwendung dieser chemischen Mittel liegt in mehreren Aspekten. Zum einen können diese ins Erdreich und ins Grundwasser gelangen, wenn sie nicht ordnungsgemäß entsorgt oder zurückgehalten werden, was eine ernsthafte Bedrohung für Trinkwasserquellen und Ökosysteme in der Nähe von Flughäfen darstellt [20]. Außerdem ist die Aufbereitung des enteisungsmittelhaltigen Abwassers für eine erneute Verwendung ebenfalls schwierig, da die hierfür notwendige Wasserwirtschaft, um diese chemischen Substanzen für einen erneuten Einsatz wieder aufzubereiten, sehr aufwendig und energieintensiv ist. Dies betrifft sowohl die technologischen Prozesse als auch die Kosten für die Umsetzung, wobei der nötige Zeitaufwand zusätzlich zu logistischen Problemen führen [20], [21]. Die korrekte Enteisung der Flugzeuge ist aber von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit des Luftverkehrs, denn mangelnde Verfügbarkeit oder Verzögerungen bei der Enteisung können zu erheblichen betrieblichen Schwierigkeiten für Flughäfen und Fluggesellschaften führen und sogar Flugausfälle verursachen [22].

3.1.4.2 De-/Anti-Icing in der Luft

Es gibt eine Vielzahl von verfügbaren De-/ Anti-Icing Varianten für den Eisschutz in der Luft, von denen im Folgenden einige näher beschrieben werden.

Pneumatische Enteisung: Für das pneumatische Enteisungssystem sind aufblasbare Gummimatten, sogenannte Boots, an kritischen Stellen, wie der Flügelvorderkante und den Leitwerken, angebracht. Komprimierte Luft wird verwendet, um diese Gummimatten zu füllen, welche sich dadurch rasch ausdehnen und die Eisschichten absprengen (Abbildung 9). Diese Methode ist besonders effektiv für Tragflächen, Steuerflächen und bei Antriebspropellern propellerbetriebener Flugzeuge [13].

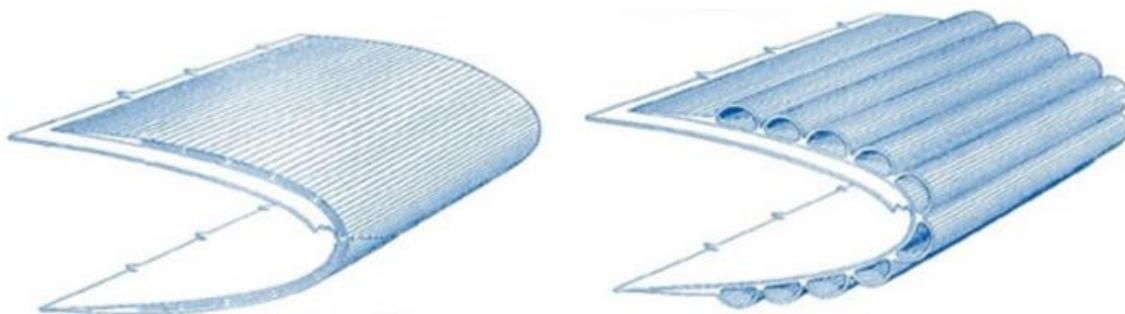


Abbildung 9 Pneumatische Enteisung an den Tragflächen [13]

Elektro-thermischer Eisschutz: In diesem Ansatz werden elektrische Heizelemente in die Struktur des Flugzeugs integriert. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung werden diese Heizelemente erwärmt, was die Bildung von Eis verhindert. Diese Methode ist aufgrund des hohen Energiebedarfs eher geeignet für kleinere Flächen oder kritische Bereiche, in denen herkömmliche Verfahren weniger wirksam sind. Dazu gehören insbesondere die Windschutzscheibe, Messöffnungen, (Triebwerks-) Lufteinlässe, Antennen und Propellerblätter [13].

Warmlufteisschutz: Bei dieser Methode wird warme Luft aus dem Triebwerk oder einer anderen Wärmequelle durch Rohre zu den kritischen Flugzeugteilen geleitet, um die Bildung von Eis zu verhindern oder bereits vorhandenes Eis abzutauen. Warmlufteisschutz eignet sich für Tragflächen, Leitwerke und andere größere Flächen [6].

TKS-System: Das durch die Zusammenarbeit der Firmen Tecalemit-Kilfrosth-Sheepbridge entwickelte Anti-Icing System verwendet eine Methode, bei der eine spezielle Flüssigkeit (entweder eine Mischung aus Ethylenglykol und Wasser oder andere Enteisungsflüssigkeiten) durch winzige Löcher oder Rillen in die Oberfläche geleitet wird (Abbildung 10). Diese Flüssigkeit bildet einen dünnen Film auf der Oberfläche und verhindert das Anhaften von Eis. [23]



Abbildung 10 Eingebautes TKS-System an den Tragflächenvorderkanten eines Kleinflugzeuges [24]

Das TKS-System kann je nach Flugzeugtyp und Konfiguration unterschiedlich aufgebaut sein, die Funktion beruht auf drei zentralen Schritten [24], [25]:

- 1) Die Enteisungsflüssigkeit wird aus einem Tank entnommen und durch ein Rohrsystem zu den Paneelen in den Flugzeugflügeln, Leitwerken und anderen kritischen Bereichen geführt.
- 2) Die Enteisungsflüssigkeit wird durch kleine Löcher oder Rillen auf die Oberfläche geleitet, siehe Abbildung 11. Diese Oberflächen sind strategisch so platziert, dass sie Eisbildung verhindern, wo sie besonders problematisch wäre.
- 3) Die Flüssigkeit bildet eine dünne Schicht aus, welche die Oberflächen imprägniert und die Eisbildung verhindert. Die TKS-Flüssigkeit vermischt sich mit dem unterkühlten Wasser in den Wolken, hemmt dessen Gefrierpunkt und lässt diese Mischung, ohne zu gefrieren, durch die Strömung über die Tragflächen abfließen.



Abbildung 11 Verteilung von Enteisungsflüssigkeit durch kleine lasergebohrte Löcher auf der Tragflächenvorderkante [24]

Die herkömmlichen Eisschutzsysteme sind im Allgemeinen durch eine Vielzahl von zusätzlichen Komponenten gekennzeichnet, die Komplexität und Gewicht hinzufügen. Beim Einsatz von elektrothermischen Eisschutzsystemen entsteht zudem ein hoher zusätzlicher Energieverbrauch. Vor diesem Hintergrund bedarf es effektiverer Ansätze für die nächste Generation von Flugzeugen [26].

3.1.4.3 Neuartige Ansätze und Technologien

In diesem Abschnitt sollen innovative Ansätze sowohl für das De-Icing als auch für das Anti-Icing aufgeführt werden. Es gibt eine Vielzahl solcher neuartiger Methoden, um Eis zu entfernen und seiner Bildung vorzubeugen, wie beispielsweise den Einsatz von Ultraschall, die Verwendung von Werkstoffen aus Formgedächtnislegierungen (SMA), oder auch das Elektroimpuls De-Icing [15].

Ein neues Forschungsfeld für das Anti-Icing ist die Verwendung laserstrukturierter Oberflächen zum passiven Vereisungsschutz: Diese Strukturen können die Oberflächeneigenschaften maßgeblich verändern und beispielsweise superhydrophobe oder eisphobe Oberflächen erzeugen.

Laserstrukturierte Anti-Icing Beschichtungen:

Im Gegensatz zu klassischen Eisschutztechniken zählen laserstrukturierte Oberflächen zu den passiven Vereisungsschutz Methoden, welche keinen zusätzlichen Energieeintrag für ihre Funktion erfordern. Erste Forschungen in diesem Bereich haben bereits die eisphoben Eigenschaften von solchen Oberflächen bestätigt, auch wenn sie in der kommerziellen Luftfahrt noch keine Anwendung finden [18]. Durch die Anwendung der direkten Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) wurden in einem Forschungsprojekt des Fraunhofer-Instituts superhydrophobe Oberflächen im Mikrometerbereich hergestellt. Diese Oberflächen weisen gleichzeitig eine geringere Neigung zur Eisbildung auf, da unterkühlte Wassertropfen von ihnen abgewiesen werden, ohne zu gefrieren. Dies wird in Abbildung 12 veranschaulicht, die die wasserabweisenden Eigenschaften einer solchen Oberfläche zeigt. Der Einsatz modifizierter Oberflächen hat das Potenzial, den Energiebedarf bei Enteisungsprozessen erheblich zu reduzieren und Enteisungsmaßnahmen möglicherweise überflüssig zu machen. [18], [27].

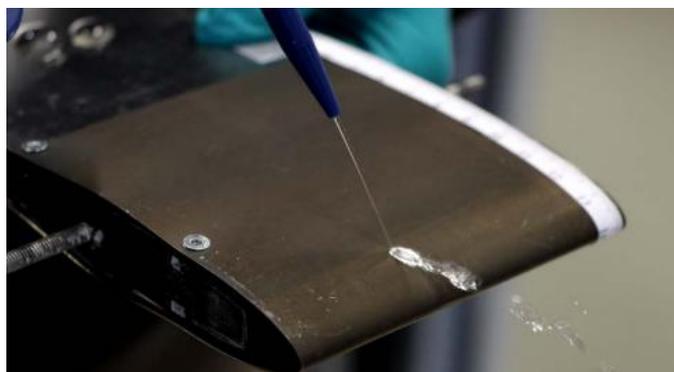


Abbildung 12 Hydrophobe strukturierte Oberfläche aufgebracht auf einem NACA-0012 Profil [18]

Die Modifikation und Herstellung solcher Oberflächen basieren auf verschiedenen Verfahren, die zum großen Teil das Benetzungsverhalten beeinflussen. Im nächsten Kapitel wird genauer auf die Möglichkeiten zur Herstellung solcher Oberflächen mittels Laserstrukturierung, die Veränderungen der Benetzungseigenschaften, sowie eine zusätzliche Art von Oberflächenmodifikation, nämlich die Erzeugung von SLIPS eingegangen.

3.2 Nano- und mikrostrukturierte Oberflächen

Nano- und mikrostrukturierte Oberflächen können zur Erzeugung von einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften führen, welche in verschiedenen Bereichen wie der Automobil- und Energietechnik, Elektronik, Displaytechnologie, Medizintechnik und Luftfahrt Anwendung finden [18], [28].

Mit Blick auf die Luftfahrt ist die Nutzung von nano- und mikrostrukturierten Oberflächen ein effektiverer Ansatz zur Entwicklung von Anti-Icing Technologien. Die superhydrophoben Eigenschaften, welche durch strukturierte Oberflächen hervorgerufen werden können, bieten die Möglichkeit, die Bildung von Eis auf Flugzeugen zu vermindern. Dabei sollen unter anderem die wasserabweisenden Eigenschaften der Oberflächen genutzt werden, um Wasseransammlungen zu verhindern, bevor sie gefrieren können [5], [29].

Mit solchen Oberflächen wurden bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt, die dazu beitragen, die Benetzbarkeit mit Wasser zu reduzieren und auch die Eisbildung zu verringern [27], [30]. Dies birgt das Potenzial, die Flugsicherheit unter Eiskonditionen zu verbessern.

Eine aufstrebende Technologie, die in diesem Kontext Erwähnung findet, sind die sogenannten SLIPS. In diesen porösen Oberflächen ist ein Fluid eingeschlossen, welche eine Gleitschicht ausbildet, auf welchem Wassertropfen und Eiskristalle nicht anhaften können. Diese Technologie zeigt nicht nur vielversprechende Ergebnisse in Bezug auf die Vereisungsbekämpfung, sondern kann auch in verschiedenen anderen Anwendungen, wie zum Beispiel zur Herstellung von Antifouling-Oberflächen in der Biomedizin oder bei Marinefahrzeugen von Nutzen sein [31], [32].

Es gibt diverse Methoden zur Herstellung von nano- und mikrostrukturierten Oberflächen, die je nach den individuellen Erfordernissen und den verwendeten Materialien variieren können. Gängige Methoden zur Herstellung solcher Oberflächen sind unter anderem Lithografie, chemische Abscheidung, nasschemische Methoden, Beschichtung und vor allem auch Laserstrukturierung [28].

3.2.1 Laserstrukturierte Oberflächen

3.2.1.1 Verfahren zur Strukturierung

Es stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, um mithilfe von Ultrakurzpulslasern (UKPL) Strukturen im Nano- und Mikrometerbereich zu erzeugen. Darunter fallen unter anderem die bereits erwähnte Direkte Laserinterferenz-Strukturierung (DLIP) und die Direkte Laserablation (DLA).

Abbildung 14 zeigt einen visuellen Vergleich dieser beiden Methoden.

Direkte Laserinterferenz-Strukturierung (DLIP): Die Strukturen bei dieser Variante entstehen durch die Interferenz von zwei oder mehr Laserstrahlen auf der Oberfläche eines Materials, indem diese kohärent miteinander überlagert werden, was zu einem kontrollierten Muster und zu einer periodischen Modulation der Laserintensität führt [18]. Mit der DLIP-Technologie können so verschiedene periodisch wiederholende Strukturen auf großen Flächen schnell erzeugt werden [33]. DLIP ermöglicht die Schaffung Oberflächenstrukturen im Mikro- und Nanobereich und findet Anwendung in einer Vielzahl von Bereichen. Das Verfahren ermöglicht die Erzeugung komplexer und anpassbarer Muster (Abbildung 13) [18].

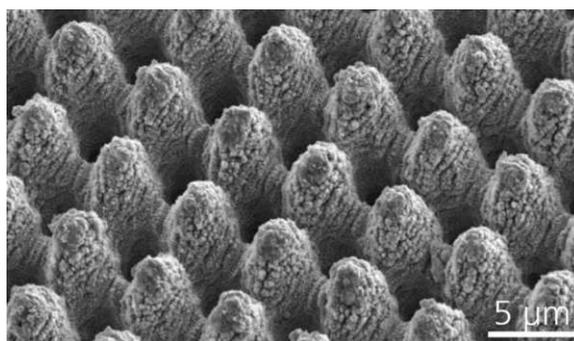


Abbildung 13 Strukturierte Oberfläche mittels DILP-Verfahren [18]

Direkte Laserablation (DLA): Bei dieser Methode wird ein gepulster Laser eingesetzt, um Material von einer Oberfläche abzutragen und somit Nano- und Mikrostrukturen zu erzeugen. Die Laserstrahlung wird auf das Material fokussiert, wobei die hohe Intensität des Lichtfelds dazu führt, dass das Material verdampft. Mithilfe von gepulster Laserablation können komplexe Strukturen erzeugt werden, die mit anderen Methoden schwer herzustellen wären [34].

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Reduzierung der Dauer des Laserpulses auf den Bereich von Femtosekunden deutlich dazu beiträgt, die Wärmeeinflusszone zu minimieren. Dies hat wiederum einen positiven Einfluss auf die Qualität des bearbeiteten Materials, was die Technik der UKPL, und speziell die der Femtosekundenlaser, ideal für die Erzeugung von nano- und mikrostrukturierten Oberflächen mit vielfältigen funktionalen Eigenschaften macht [35], [36].

Wenn ein ultrakurzer Laserpuls auf ein festes Material trifft, kommt es zur "kalten Ablation", bei der das Material direkt und nahezu ohne Wärmeleitung verdampft. Dadurch entsteht nur eine geringe Menge an geschmolzenem Material und außerhalb der Wechselwirkungszone wird kaum thermische Energie eingeleitet. Die Ablation ist im Allgemeinen durch eine Schwelle für Fluenz oder Energiedichte gekennzeichnet, oberhalb derer signifikante und dauerhafte Veränderungen auf der Materialoberfläche auftreten. [37].

Das höhere Abtragungsvolumen bei der direkten Laserablation (DLA) kann jedoch im Gegensatz zu Verfahren wie der direkten Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) zu einer vergleichsweise niedrigen Bearbeitungsgeschwindigkeit führen [38].

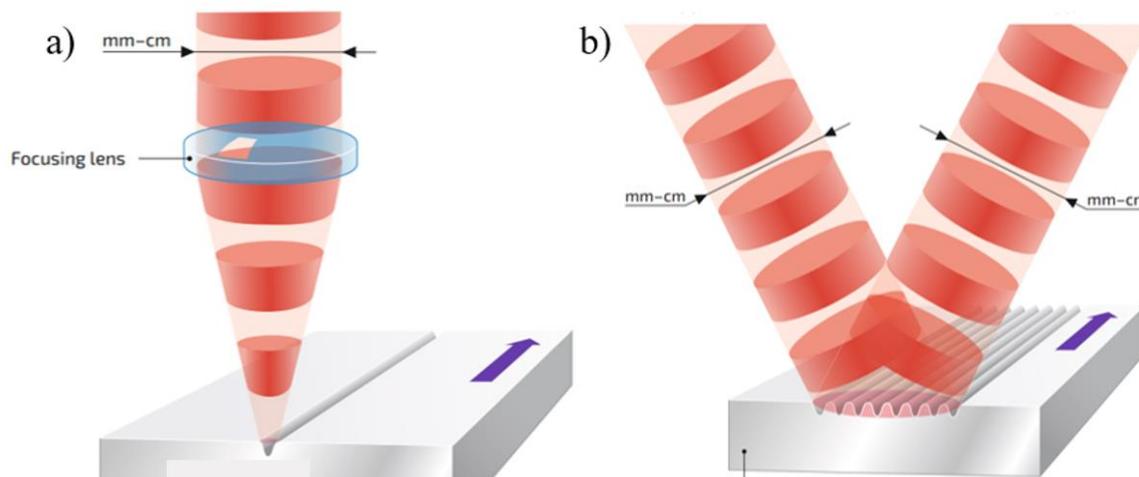


Abbildung 14 Vergleich der a) direkten Laserablation (DLA) mit der b) direkten Laserinterferenz-Strukturierung (DLIP) mittels UKPL [38]

3.2.1.2 Laserinduzierte periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS)

Die laserinduzierten periodischen Oberflächenstrukturen (LIPSS), auch als "ripples" bezeichnet, sind wellenartige Oberflächenmodifikationen (Abbildung 15), die durch die Wechselwirkung hochenergetischer linear polarisierter Laserpulse auf soliden Oberflächen entstehen [40]. Die Bildung von LIPSS tritt auf, wenn die Fluenz des Strahls in der Nähe der Abtragungsschwelle des jeweiligen Materials liegt [39]. Seit der erstmaligen Entdeckung laserinduzierter periodischer Oberflächenstrukturen wurden sie in zahlreichen Studien hinsichtlich ihrer Typen, Herstellung, Entstehung, Beeinflussung und potenziellen Anwendungen untersucht, sodass diese Strukturen bereits auf Metallen, Halbleitern als auch auf Dielektrika hergestellt werden konnten [39]. Die LIPSS können anhand ihrer räumlichen Periode Λ klassifiziert werden, wobei man zwischen Strukturen mit einer hohen räumlichen Ortsfrequenz, den sogenannten High Spatial Frequency LIPSS (HSFL), und solchen mit einer niedrigeren räumlichen Ortsfrequenz, den Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL) unterscheidet [41]. Die LSFL haben eine Periodizität nahe der Laserwellenlänge. Sie bilden sich dabei senkrecht zur Polarisation des einfallenden Laserstrahls aus, siehe Abbildung 15 a). Die Ausrichtung der HSFL, deren Periodizität viel kleiner als die Laserwellenlänge ist, kann parallel oder senkrecht zur Strahlpolarisation sein, siehe Abbildung 15 b) [42], [41].

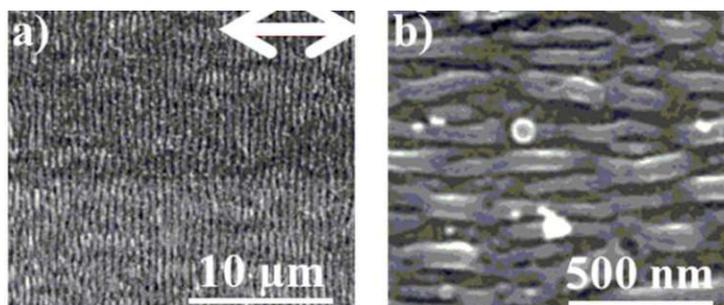


Abbildung 15 Direkter Vergleich von a) Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL) mit (weißer Pfeil für Polarisationrichtung) und b) High Spatial Frequency LIPSS (HSFL) [42]

3.2.2 Hydrophobe Eigenschaften strukturierter Oberflächen

Die Benetzungseigenschaften einer Oberfläche werden durch die Kombination aus Oberflächenenergie und Oberflächenstruktur beeinflusst. In der Natur zeigen zahlreiche Pflanzen und Tiere, wie zum Beispiel Rosen, Schmetterlinge und Motten, bemerkenswerte hydrophobe Eigenschaften. Diese machen bestimmte Oberflächen wasserabweisend und selbstreinigend [43]. Die Lotusblume beispielsweise demonstriert dies mithilfe ihrer einzigartigen Oberflächenbeschaffenheit, basierend auf aus Wachs bestehenden hydrophoben Schichten, welche die Grenzflächenspannung zwischen Oberfläche und Wasser ändern und so einen größeren Kontaktwinkel erzeugen [44]. Diese Oberflächen werden auch als SHS, Superhydrophobic Surface, bezeichnet. Die zweilagige Oberflächengeometrie, wie sie in Abbildung 16 dargestellt ist, kombiniert Noppen und Nanostrukturen, und trägt ebenfalls zum superhydrophoben Verhalten bei [44], [45].

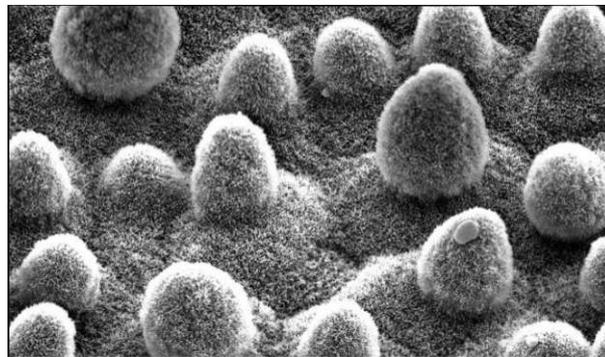


Abbildung 16 SEM-Aufnahme eines Lotusblatts [44]

Hydrophobe Eigenschaften können durch zwei Mechanismen erreicht werden. Erstens kann die Oberflächenenergie durch Oberflächenmodifikationen reduziert werden. In der Praxis wird dies oft durch chemische Beschichtungen oder das Auftragen von Trenn- oder Schmiermitteln erreicht. Zweitens besteht die Möglichkeit der Oberflächenstrukturierung, um einen unvollständigen Benetzungszustand zu erzeugen und die Tropfen auf der Oberfläche weitestgehend im Cassie-Baxter-Zustand zu halten und somit den Kontaktwinkel zu erhöhen [5], [29].

3.2.2.1 Benetzungseigenschaften

Benetzung tritt auf, wenn eine Flüssigkeit und ein fester Stoff direkt in Kontakt stehen, zum Beispiel ein Wassertropfen mit einer Metalloberfläche. An der Grenzfläche entstehen verschiedene Wechselwirkungen, die das Verhalten des Wassertropfens auf der Metalloberfläche bestimmen. Hierbei spielen die Kohäsionskräfte (Wechselwirkungen innerhalb eines Stoffes) und die Adhäsionskräfte (Wechselwirkungen an der Grenzfläche) die zentrale Rolle und lassen sich zu einer Grenzflächenenergie zusammenfassen. Die chemische Zusammensetzung der beteiligten Materialien ist dabei von entscheidender Bedeutung, einschließlich ionischer Wechselwirkungen, Kräften, von Wasserstoffbrückenbindungen und van-der-Waals-Kräften, wie in Abbildung 17 dargestellt [19]. Die Atome und Moleküle von Flüssigkeiten und Feststoffen besitzen aufgrund der geringen Anzahl

chemischer Bindungen an der Oberfläche eine höhere Energie. Diese Energie der Oberflächenatome oder -moleküle wird als Oberflächenspannung oder Oberflächenenergie bezeichnet. Sie wird mit σ dargestellt und entspricht der pro Flächeneinheit benötigten Energie, um eine Oberfläche bei konstanter Temperatur und Druck zu bilden [47]. Wenn Feststoff und Flüssigkeit direkt miteinander in Kontakt stehen, wird die Oberflächenenergie im Vergleich zur Situation, in der sie voneinander getrennt sind, geringer sein. Das Verhältnis zwischen Oberflächenenergien und Adhäsionsarbeit wird in der Dupré-Gleichung dargestellt [5], [46]:

$$W_{SL} = \sigma_{SA} + \sigma_{LA} - \sigma_{LS}$$

Formel 1 Dupré-Gleichung

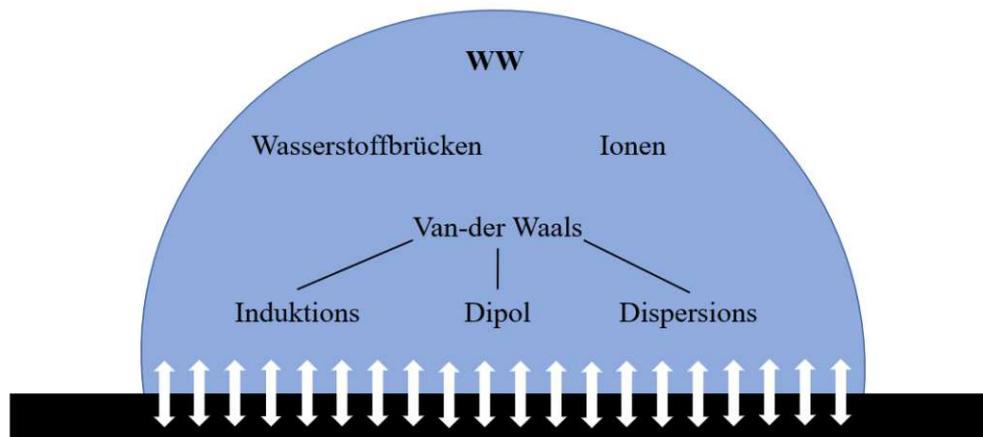


Abbildung 17 Wechselwirkungen (WW) innerhalb eines Wassertropfens und mit der Benetzungsoberfläche [46]

In dieser Gleichung steht W_{SL} für die Adhäsionsarbeit pro Flächeneinheit, σ_{SA} für die Oberflächenenergie zwischen Feststoff und Luft, σ_{LA} für die Oberflächenenergie zwischen der Flüssigkeit und Luft (auch als Oberflächenspannung bezeichnet) und σ_{LS} für die Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Feststoff [47].

Der Kontaktwinkel Θ wird als Maß für die Wechselwirkungen an Grenzflächen zwischen Flüssigkeiten und Feststoffoberflächen verwendet. Der Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannung und dem Kontaktwinkel wird durch die Youngsche Gleichung in Formel 2 beschrieben. In Abbildung 18 ist eine Veranschaulichung der einzelnen Komponenten zu sehen [43], [44], [46].

$$\cos \theta_Y = \frac{\sigma_{SA} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LA}}$$

Formel 2 Youngsche Gleichung

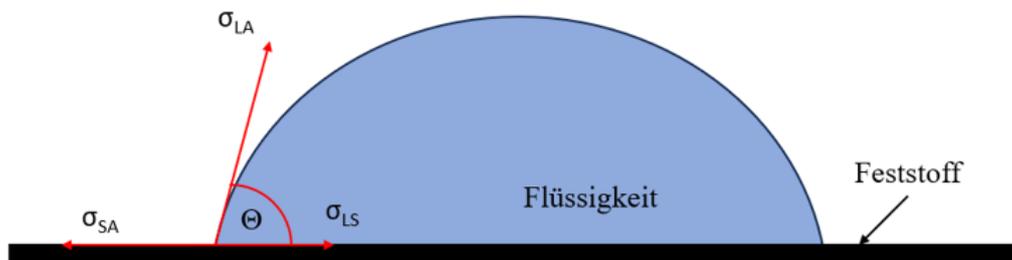


Abbildung 18 Veranschaulichung Youngsche Gleichung [46]

Definitionsgemäß wird eine Oberfläche mit einem hohen Kontaktwinkel, also $\theta > 90^\circ$, als hydrophob bezeichnet, während eine Oberfläche mit einem niedrigen Kontaktwinkel, also $\theta < 90^\circ$, als hydrophil bezeichnet wird [45]. Wenn eine Oberfläche eine niedrige Oberflächenenergie aufweist und eine geeignete Oberflächengeometrie hat, die zu einem unvollständigen Benetzungszustand führt, können sehr hohe Kontaktwinkel von über 150° auftreten. Solche Oberflächen werden als superhydrophob bezeichnet [45]. Die Bestimmung des Kontaktwinkels ermöglicht somit eine einfache Beschreibung der Benetzungseigenschaften von Oberflächen (Abbildung 19) [46].

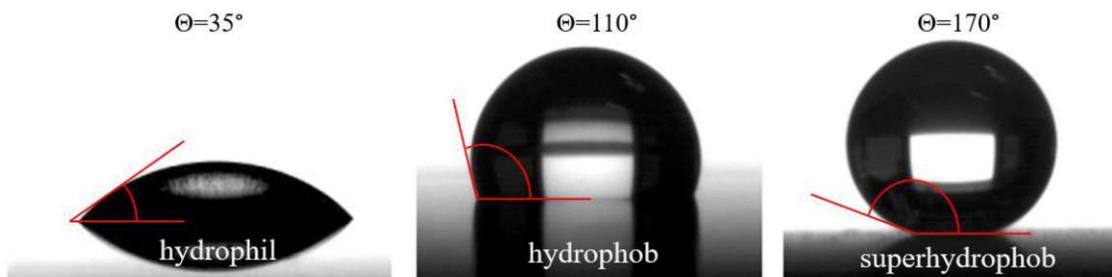


Abbildung 19 Kontaktwinkel von Wasser auf verschiedenen Oberflächen [46]

In der Praxis wurden auf hydrophoben Oberflächen stets größere Kontaktwinkel und auf hydrophilen Oberflächen stets kleinere Kontaktwinkel gemessen als nach der Youngschen Gleichung vorhergesagt. Ein bekanntes Modell, was die Rauheit der Oberfläche mit berücksichtigt, um diesen Fehler auszugleichen, ist das Wenzel-Modell [45].

Im Jahr 1936 untersuchte R. Wenzel erstmals die Zusammenhänge zwischen Oberflächenstruktur, Benetzung und Kontaktwinkel [48]. Um die Oberflächenrauheit zu berücksichtigen, führte er auf Basis der Youngschen Gleichung den Rauheitsfaktor ein, mit welchem er diese modifizierte. Der Kontaktwinkel nach Wenzel θ_W wird nach folgender Formel berechnet [47]:

$$\cos \theta_W = r * \cos \theta_Y$$

Formel 3 Kontaktwinkel nach Wenzel

Der berechnete Kontaktwinkel nach Young wird mit θ_Y bezeichnet. Der Rauheitsfaktor r ergibt sich aus dem Verhältnis $A_{\text{Rau}}/A_{\text{Glatt}}$, was dem Verhältnis zwischen der tatsächlichen Oberfläche und der geometrischen Oberfläche einer entsprechenden glatten Oberfläche entspricht, und in der Regel größer als 1 ist [45]. Nach dem Wenzel-Modell führt die Oberflächenrauheit nicht nur zur Erhöhung der Hydrophilie von hydrophilen Oberflächen, sondern verstärkt auch die Hydrophobie von hydrophoben Oberflächen [48].

Während dieses Modell gezeigt hat, wie eine raue Oberfläche den scheinbaren Kontaktwinkel an der Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit und der Oberfläche beeinflussen kann, berücksichtigt dies aber nicht die eingeschlossene Luft zwischen dem Wassertropfen und der Oberfläche [45].

Um diesen Fall zu berücksichtigen, diskutierten Cassie und Baxter einen zweiten Fall der heterogenen Benetzung. Während Wenzel davon ausging, dass ein Wassertropfen trotz Rauheit mit seiner gesamten Fläche die Oberfläche benetzt und in die Rauheitsrillen eindringt, postulierten Cassie und Baxter, dass das Wasser auf der Oberflächenstruktur aufliegt und zwischen den Rauheitsspitzen Luft gespeichert bleibt [80]. Der Unterschied zwischen homogener und heterogener Benetzung ist in Abbildung 20 veranschaulicht. Mit diesem Modell konnten Phänomene wie Superhydrophobie, geringe Kontaktwinkelhysterese oder ein gutes Abrollverhalten zwar besser, dennoch aber noch nicht vollständig erklärt werden. Das heterogene Benetzungskonzept bezieht den Parameter der Kontaktfläche mit Luft bzw. Feststoff mit ein. Daraus ergibt sich folgende Gleichung für den Cassie-Baxter-Ansatz zur Berechnung des Kontaktwinkels [47]:

$$\cos \theta_{CB} = f_1 * \cos \theta_1 + f_2 * \cos \theta_2$$

Formel 4 Kontaktwinkel nach Cassie-Baxter

Hierbei ist θ_1 der Kontaktwinkel zwischen der glatten Feststoffoberfläche und der Flüssigkeit, θ_2 der Kontaktwinkel zwischen Luft und Flüssigkeit, f_1 der Flächenanteil der Feststoffoberfläche, und f_2 der Flächenanteil der Luft [45].

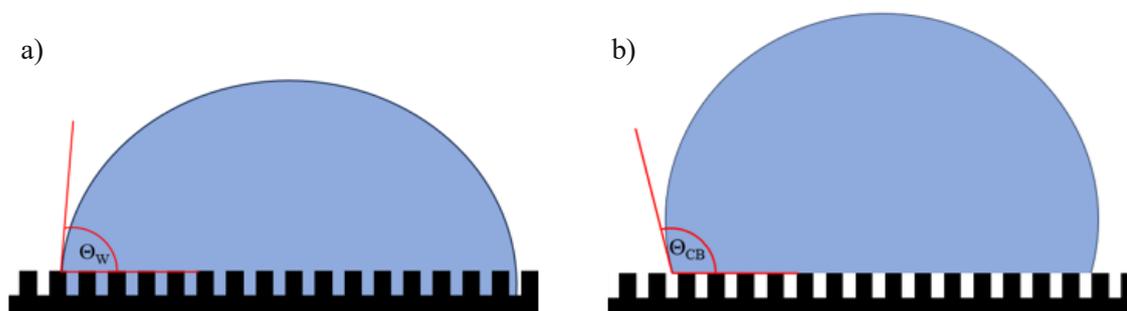


Abbildung 20 Vergleich Benetzungsmodelle nach a) Wenzel θ_W und b) Cassie Baxter θ_{CB} [45]

Ob sich ein Tropfen nach dem Wenzel-Modell oder nach dem Cassie-Baxter-Modell einstellt, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass auf jeder strukturierten hydrophoben Oberfläche beide Benetzungsarten auftreten können. Dabei ist die Benetzung nach dem Wenzel-Modell energetisch günstiger. Es wird allgemein angenommen, dass das Cassie-Modell im Zustand der

Superhydrophobie besser zur Vorhersage des Benetzungsverhaltens geeignet ist als das Wenzel-Modell. Wenn sich die Benetzung nach dem Cassie-Baxter-Modell auf einer Oberfläche einstellt, ist eine gewisse Aktivierungsenergie erforderlich, um in den Zustand der Benetzung nach dem Wenzel-Modell überzugehen. Diese Aktivierung kann im einfachsten Fall durch das Eigengewicht des Tropfens selbst ausgelöst werden [45], [46].

3.2.2.2 Vereisungseigenschaften

Die Untersuchung von Vereisungseigenschaften ist in vielen Bereichen von großer Bedeutung, da Vereisungen häufig zu erheblichen Problemen führen können.

Da bekannt ist, dass Vereisung zum Teil durch unterkühltes Wasser verursacht wird, ist anzunehmen, dass strukturierte hydrophobe Oberflächen auch eine abweisende Wirkung gegenüber dem Anhaften von Eis besitzen könnten. Dies folgt der einfachen Logik, dass wenn ein Wassertropfen nicht an der Oberfläche haften kann, er auch am Anfrieren verhindert wird [49].

Die Arbeit von Jung et al. untersuchte die Auswirkungen von unterschiedlich strukturierten und behandelten Aluminiumoberflächen auf die Eisbildung [49]. Sie stellten fest, dass die Rauheit der Oberfläche und der Kontaktwinkel einen klaren Einfluss auf den Beginn des Gefrierprozesses haben. Besonders interessant war die Beobachtung, dass auf superhydrophoben Oberflächen das Abperlen von Flüssigkeitströpfchen einen zusätzlichen Mechanismus gegen die Eisbildung bieten kann. Dies liegt daran, dass weniger Flüssigkeit mit der Oberfläche in Kontakt kommt, was wiederum den Gefrierprozess verzögert. Im Vergleich zu unbehandelten Proben zeigte sich somit eine deutliche Verzögerung beim Einsetzen der Eisbildung auf solchen Oberflächen [49].

Die Untersuchungen von Vercillo et al. zu laserstrukturierten Oberflächen beschäftigten sich mit verschiedenen Strukturierungsmethoden wie DLIP und DLA auf einer Titan-Legierung. Diese Methoden wurden verwendet, um hydrophobe Oberflächenstrukturen, wie in dieser Arbeit zum Beispiel LIPSS, zu erzeugen, wobei die Adhäsionskraft des Eises unter verschiedenen Vereisungsbedingungen im Windkanal analysiert wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass die Eisphobie von der räumlichen Periode Λ der Strukturen abhängt und diese Periode mindestens um eine Größenordnung kleiner sein muss als der MVD der auftreffenden unterkühlten Wassertropfen. Dies ist notwendig, um den Cassie-Baxter-Zustand aufrechtzuerhalten, bei dem Lufttaschen zwischen den Strukturen das Eis von der Oberfläche fernhalten. Eine geringere Kontaktfläche zwischen Eis und Oberfläche sowie Spannungskonzentrationen, die durch die eingeschlossene Luft verursacht werden, können die verbesserte eisabweisende Wirkung solcher Oberflächen erklären. Der Übergang vom Cassie-Baxter-Zustand zum Wenzel-Zustand, bei dem Flüssigkeit in die Strukturen eindringt und die Kontaktfläche erhöht, beeinflusst die eisabweisenden Eigenschaften. Die Tiefe der Strukturen hat einen direkten Einfluss auf die mechanische Verzahnung zwischen Eis und Oberfläche [51].

Die Eisbildung ist gerade in der Luftfahrt ein komplexer Prozess, der verschiedene meteorologischen Konstellationen und Eisarten umfasst, wie bereits in Kapitel 3.1 diskutiert wurde. Die Oberfläche von

Flugzeugflügeln kann dabei Vereisung unter verschiedenen Bedingungen aus gefrierendem Regen, Resublimation von Wasserdampf oder Kondensation gefolgt von Gefrieren, nassem Eis, Schnee und/oder Kombinationen daraus erfahren. Daher ist es wichtig, dass eine eisabweisende Oberfläche, die für eine bestimmte Anwendung entwickelt wurde, unter extremen Belastungen wie laminaren und turbulenten Strömungen, wechselnder Luftfeuchtigkeit und starker Unterkühlung getestet wird. Eine der großen Herausforderungen liegt darin, Hochgeschwindigkeitströpfchen standzuhalten, da diese bestehende Beschichtungen, insbesondere superhydrophobe, während Vereisungszyklen schädigen können, wie vorausgegangene Untersuchungen belegen [52], [53].

Insgesamt reduzieren eisabweisende Beschichtungen die Haftung von Eis auf Oberflächen und können bereits bestehende Eisschutzsysteme unterstützen. Superhydrophobe Oberflächen, sogenannte Superhydrophobic Surfaces (SHS), bieten ebenfalls das Potenzial auch Eisanhaftung zu verhindern. Es ist jedoch noch nicht grundlegend überprüft, ob solche Oberflächen auch unter repräsentativen und kombinierten Vereisungsbedingungen wirksam sind [51], [54], [53].

3.2.3 Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces

Mit gleitfähiger Flüssigkeit infundierte poröse Oberflächen, auch als SLIPS bezeichnet, bestehen im Allgemeinen aus zwei Komponenten. Zum einen handelt es sich um poröse Substrate mit geeigneten Oberflächeneigenschaften, und zum anderen um Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung, die als Schmiermittel fungieren [50].

Das Konzept einer SLIPS wird in Abbildung 21 veranschaulicht. Diese zeigt das einfache Prinzip, bei dem eine schmierende Flüssigkeit innerhalb einer porösen Matrix eingeschlossen ist. Der Wassertropfen auf dem Substrat hat aufgrund der Reduzierung der Kontaktzone mit der Oberfläche und der Unvermischbarkeit mit dem Schmiermittel um diese Zonen herum kaum Haftung, und wird abgewiesen. Bei einer leichten Neigung des Substrates kann der Tropfen zudem einfach abgleiten [55].

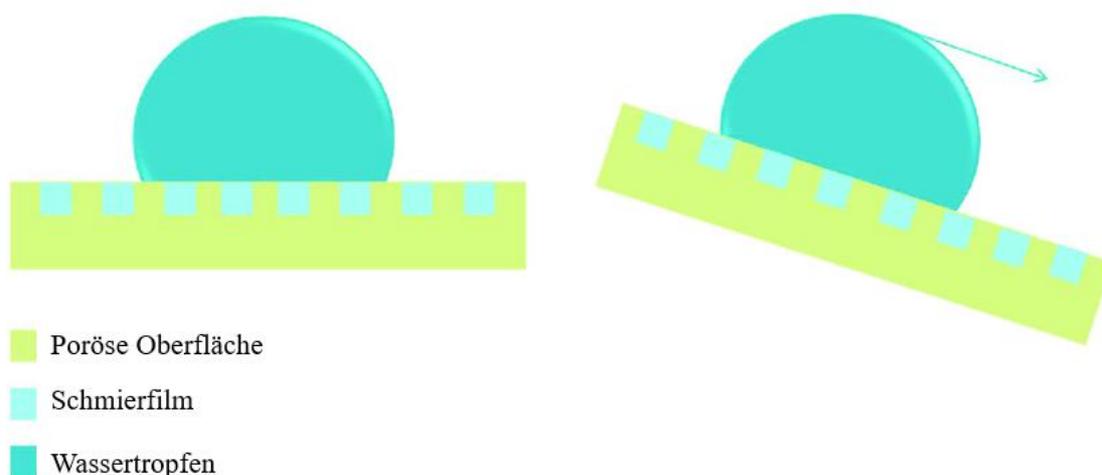


Abbildung 21 Grundsätzlicher Aufbau von SLIPS [55]

Die verwendeten porösen Substrate weisen dabei meist schon hydrophobe bis superhydrophobe Eigenschaften auf, sowie eine hohe Affinität für Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung, wodurch sie die schmierende Flüssigkeitsschicht leichter aufnehmen [49].

Durch die Infusion von Schmiermitteln wird die gasförmige Barriere, die normalerweise zum Cassie-Baxter-Zustand von SHS führt, durch eine flüssige Barriere ersetzt. Generell lässt sich Luft im Vergleich zu Flüssigkeiten leichter komprimieren, was dazu führt, dass die gasförmige Barriere rauen Umgebungsbedingungen nicht so gut standhalten kann wie die Schmiermittelschicht in den SLIPS [12]. Zudem weisen SLIPS im Vergleich zu SHS überlegene vereisungshemmende, korrosionshemmende und selbstheilende Eigenschaften auf. In den letzten Jahren wurden SLIPS mit unterschiedlichen Leistungsmerkmalen entwickelt, um beispielsweise Metalloberflächen zu schützen [56].

Trotz des enormen Potenzials stellt die Herstellung von solchen Oberflächen auf hochfesten und harten Materialien wie Metallsubstraten nach wie vor eine Herausforderung dar. Die Erzeugung dieser speziellen Oberflächen konnte in einer vorherigen Forschungsarbeit von Fang et al. bereits mit Hilfe Femtosekundenlasern vorgenommen werden, und umfasste hier im Wesentlichen drei Schritte [35]: Laserablation zur Herstellung einer strukturierten SHS, gegebenenfalls eine Behandlung zur Erzeugung einer niedrigen Oberflächenenergie (Low-Surface-Energy-Behandlung) und schließlich die Infusion von Schmiermitteln, wie in Abbildung 22 dargestellt [12].

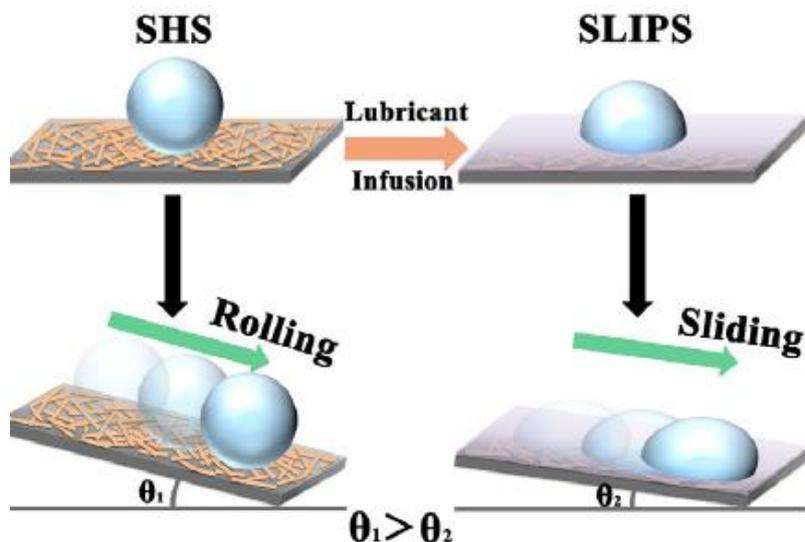


Abbildung 22 Abrollverhalten und Herstellung von SHS und SLIPS [12]

Um diese Oberflächen zu erzeugen, müssen außerdem folgende Anforderungen erfüllt werden: Die porösen Oberflächenstrukturen müssen den Schmierstoff einschließen, die Substratoberfläche muss leichter von dem Schmiermittel benetzt werden als von der Flüssigkeit die abgestoßen werden soll, und die abgestoßene Flüssigkeit muss in dem Schmiermittel unlöslich sein [57].

Im Vergleich zu den ursprünglichen SHS zeigen SLIPS geringere Kontaktwinkel gegenüber verschiedenen Flüssigkeiten. Zusätzlich weisen sie die Eigenschaft eines niedrigeren Abrollwinkels auf, was dazu führt, dass Flüssigkeiten leichter ablaufen können [12].

Einige der aktuellen Forschungsarbeiten im Bereich von SLIPS haben sich nicht nur auf die Benetzungseigenschaften, sondern besonders auf die Eigenschaften in Bezug auf Vereisung konzentriert. Unter bestimmten Bedingungen, wie extremer Kälte und hoher Luftfeuchtigkeit, können die Wassertropfen bei SHS dazu neigen, an den Oberflächentexturen zu haften oder darin zu versinken, anstatt abzurollen. Auf den glatten, von Flüssigkeit infundierten, porösen Oberflächen treffen unterkühlte Wassertropfen auf eine flüssige anstelle einer festen Oberfläche, was zwei Vorteile bietet: Erstens erfolgt ein vereinfachtes Abgleiten an der Grenzfläche von Wasser oder Eis, was die Haftung verringert, und zweitens kann sich das Eis nicht in eine flüssige Grenzfläche verzahnen [51], [58].

Drei unabhängige Forschungsarbeiten haben diesbezüglich wichtige Ergebnisse geliefert [12], [59], [60]. In der Anfangsphase des Vergleichs zwischen frisch hergestellten SHS und SLIPS ist die Scherhaftung von Eis bei SLIPS um ein Vielfaches geringer als bei SHS. Wiederholte Vereisungszyklen mit SLIPS, bei denen die Probe nicht weiter mit Schmierflüssigkeit versorgt wurde, zeigen jedoch einen starken Anstieg der Eishaftung, der sogar über den Anfangswert der SHS hinausgeht. Dies wird mit einem Verlust von Schmierflüssigkeit über die Vereisungszyklen hinweg erklärt, und unterstreicht die Bedeutung einer kontinuierlichen Schmierstoffzufuhr, um den Benetzungszustand aufrechtzuerhalten. Die Anti-Icing Leistung von SLIPS kann jedoch, selbst wenn sie durch starke externe Einwirkungen nachlässt, durch das Nachfüllen von Schmiermittel wiederhergestellt werden. Die kontinuierliche Versorgung mit Schmiermittel ermöglicht es den SLIPS außerdem, ihre Selbstheilungsfähigkeit zu entfalten, da der Schmierstoff zu den beschädigten Stellen auf der Oberfläche fließen kann und diese ausfüllt werden. Um ein besseres Verständnis für den Vereisungsmechanismus der SHS und SLIPS zu erlangen, wurde von Long et al. ein Modell entwickelt, um die verschiedenen Prozesse des Vereisungsschutzes während des Gefriervorgangs von unterkühltem Wasser zu veranschaulichen (Abbildung 23) [12]. Mit sinkender Temperatur kondensiert das abgestoßene Wasser allmählich zu Eiskernen an den Spitzen der rauen Strukturen der SHS. Diese Eiskerne wachsen weiter und breiten sich in die Hohlräume der rauen Strukturen aus, wobei manche sogar die Spitzen umhüllen. Während die Probe durch äußere mechanische Kräfte aus der Eisschicht gezogen wird, werden die Spitzen der rauen Strukturen nach und nach abgeschabt und geglättet, was im Laufe der Zeit zur Zerstörung der SHS führt. Der dabei gemessene Kontaktwinkel der SHS nimmt aufgrund der Kratz- und Glättungseffekte des zyklischen Gefrierens und Ziehens ab, was dazu führt, dass Wassertropfen auf der untergrabenen Oberfläche eingeschlossen werden. Die Grenzfläche von Feststoff-Luft-Wasser von SHS wird jedoch durch die Infusion mit Silikonöl zur Feststoff-Schmierstoff-Wasser Grenzfläche von SLIPS. Die Wasser- und Feststoffsubstrate werden effektiv isoliert, was zu einer homogenen Verteilung der Eiskeime in der Schmierschicht führt, ohne dass sie in den Spitzen der rauen Strukturen eingebettet sind. Infolgedessen werden die porösen Strukturen von SLIPS als festes Substrat während des zyklischen Gefrier- und Ziehversuchs weniger leicht zerstört, wenn die Schmierschicht aufrechterhalten wird. Der Benetzungswinkel von Wasser auf SLIPS blieb nach jedem Zyklus relativ stabil, was auf eine verbesserte Anti-Icing Leistung schließen lässt [12], [65].

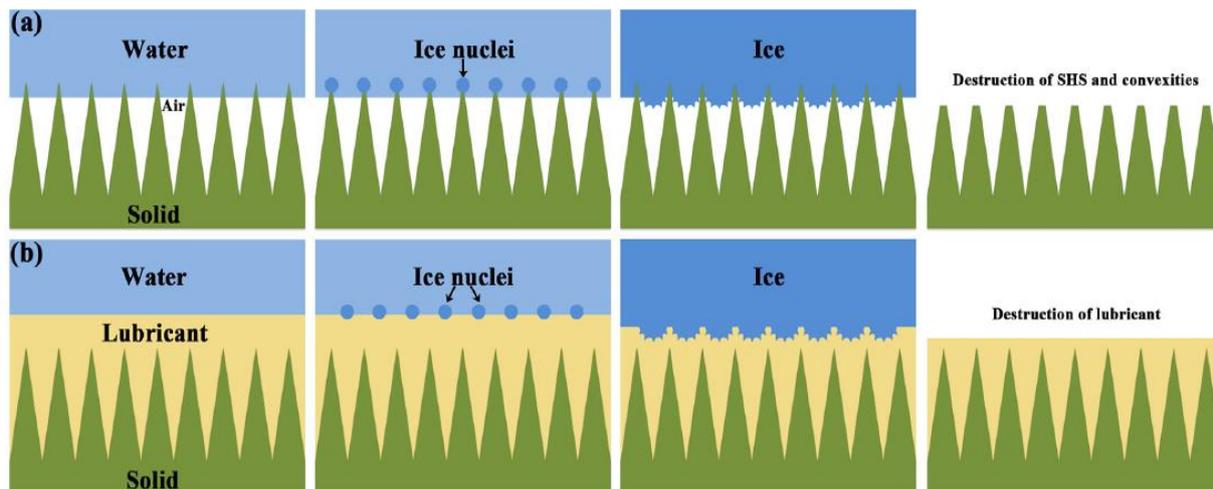


Abbildung 23 Vergleich von a) SHS und b) SLIPS für Anti-Icing Anwendungen [12]

4 Geräte und Versuchsaufbauten

4.1 Laser-Anlage

Die für die Arbeit verwendete Anlage besteht aus der Laserquelle (FEMTOPOWER compact PRO), der äußeren Strahlführung, und der Verfahrenanlage (Abbildung 24). Auf diese wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen, und die für diese Arbeit relevanten Bestandteile genauer erklärt.

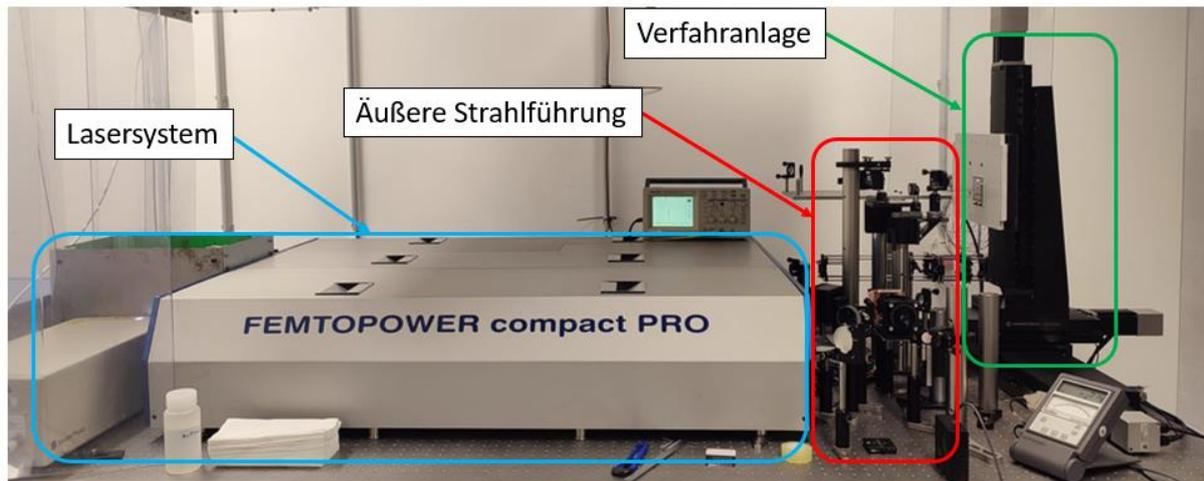


Abbildung 24 Laserquelle FEMTOPOWER compact PRO, äußere Strahlführung, und die Verfahrenanlage

4.1.1 FEMTOPOWER compact PRO

Zur Perforierung und Strukturierung der Blechproben wurde ein Ultrakurzpulslasersystem der Firma FEMTOLASER genutzt. Dieser Femtosekundenlaser setzt sich aus mehreren Teilsystemen zusammen: Dem Laserresonator, welcher die Modenkopplung zur Erzeugung der ultrakurzen Pulse nutzt; dem Stretcher, der die Pulse aufweitet; dem Verstärker, welcher die Leistung um Faktor 10^6 erhöht; und dem Kompressor, der die aufgeweiteten Pulse wieder komprimiert. Die ultrakurzen Pulse werden hier mit einem modengekoppelten Ti:Saphir-Laser erzeugt, und können dabei eine Pulsdauer von bis zu einigen Femtosekunden (fs) aufweisen.

Zu beachten ist, dass ausdrücklich von einem Lasersystem und nicht von einem einzelnen Laser gesprochen wird. Der Grund dafür ist, dass dieser Ultrakurzpulslaser aus mehreren Laserquellen zusammengesetzt ist, die zusammenarbeiten, um die schlussendlich emittierten ultrakurzen Laserpulse zu erzeugen.

Der Oszillator erzeugt zunächst Pulse mit einer Wiederholrate von 78 MHz und niedriger Energie, die erst eine Pulsstreckung erfahren, und dann durch eine Verstärkereinheit laufen. Damit die Energie der einzelnen Pulse erhöht werden kann, braucht das Lasermedium mehr Zeit zwischen den Pulsen, um die Energie vom Pumplaser aufzunehmen. Entscheidend ist hier der Einsatz einer Pockelszelle, mit welcher die zu verstärkenden Pulse ausgewählt werden.

Im letzten Schritt werden die so verstärkten Pulse durch einen Prismenkompressor wieder komprimiert. Der genaue Aufbau und die Schaltung dieser Komponenten sind im nächsten Abschnitt zu finden.

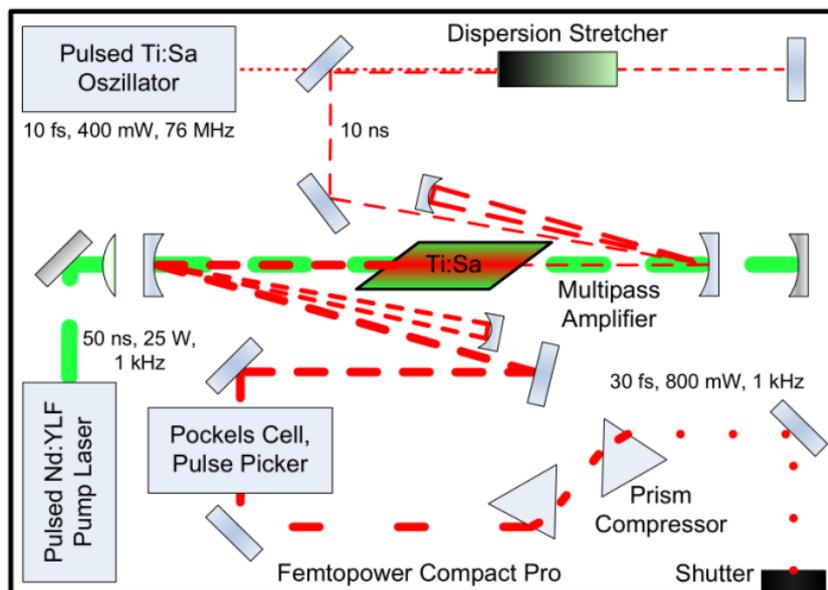


Abbildung 25 Aufbau FEMTOLASER compact Pro [41]

4.1.1.1 Aufbau des Lasersystems

Auf Abbildung 25 ist der grundlegende Aufbau des Lasersystems zu sehen. Dieses besteht aus zwei wesentlichen Komponenten: Einem Ti:Saphir-Oszillator, welcher von einem CW-Diodenlaser gepumpt wird, und einem Mehrpass-Ti:Saphir-Verstärker mit einem Nd:YLF-Pumplaser. Der Oszillator liefert dabei sehr breitbandige Pulse mit einer Frequenz von 78 MHz und einer Pulsdauer von <12 fs. Das Lasersystem arbeitet nach dem Prinzip der Chirped Pulse Amplification (CPA). Demnach werden die vom Ti:Saphir-Oszillator emittierten sog. Seedpulse zeitlich und räumlich gestreckt, um diese weiter verstärken zu können. Abschnitt 4.1.1.3 erklärt das genaue Prinzip. In diesem Zustand durchlaufen sie erst einmal fünffach die Verstärkereinheit. Nach dem Durchlaufen der Pockelszelle und dem daraus resultierenden Selektieren der Pulse, passieren diese den Verstärkerkristall noch weitere viermal, was dazu dient, die Energie immer weiter zu erhöhen. Schlussendlich werden die hochenergetischen erzeugten Pulse aus dem Verstärkerteil ausgekoppelt und im anschließenden Prismenkompressor wieder zeitlich komprimiert. Der komprimierte Puls wird abschließend über einen Umlenkspiegel aus dem Lasersystem herausgeleitet. Die Ausgangsstrahlung ist aufgrund des internen Aufbaus linear polarisiert. Der genaue Aufbau zur Strahlführung und Formung außerhalb des Lasers ist in Kapitel 4.1.2 zu finden. In der Tabelle 1 sind alle Spezifikationen des Lasersystems zusammengefasst.

Output	Amplifier	Oszillator
Puls duration	< 30 fs	< 12 fs
Spectral width	> 40 nm	> 100 nm
Output energy	> 800 μ J	> 2 nJ
Puls repetition rate	1 kHz	74-78 MHz
Peak power	> 30 GW	> 500 kW
Beam diameter ($1/e^2$)	15 mm (nominal)	< 2 mm
B-integral of amplified pulses	< 1	-
Spatial mode	TEM ₀₀ ($M^2 < 2$)	TEM ₀₀ ($M^2 < 1.3$)
Contrast ratio	> 10^7 : 1 / > 10^4 : 1	-
Polarisation	linear, horizontal	linear, horizontal
Pulse to pulse energy stability	< 1.5% rms	-
Beam divergence	< 3 mrad	< 2 mrad

Tabelle 1 Systemspezifikationen FEMTOPOWER compact PRO

4.1.1.2 Erzeugung ultrakurzer Pulse

Ohne besondere Vorkehrungen oszillieren in einem Ti:Saphir Laser, durch das breite Spektrum des Lasermediums, eine große Anzahl longitudinaler Moden mit unterschiedlichen Frequenzen. Diese schwingen in einem Abstand von $\Delta f = \frac{c}{2L}$, wobei L die Resonatorlänge darstellt. Solange diese innerhalb des Verstärkungsprofils liegen, erfolgt eine Anregung. So werden jene Moden angeregt, bei denen der Abstand der Resonatorlänge L ein genaues Vielfaches der halben Wellenlänge des Lichts λ ist [61].

In Abbildung 26 b) ist dies für acht unkorrelierte Moden veranschaulicht. Mit der Modenkopplung wird eine feste Phasenbeziehung zwischen den einzelnen oszillierenden Moden aufgebaut, welche zu einer zeitlich wiederholenden Interferenz und zu einer additiven Überlagerung der Amplituden führt. Dadurch kommt es zu einer definierten Zeitabhängigkeit des emittierten Strahls. Dieser Mechanismus ist am Beispiel von acht Moden in Abbildung 26 a) zu sehen. Je mehr Moden phasengekoppelt sind, desto kürzer und intensiver wird der Puls. Der so generierte Puls besteht aus vielen verschiedenen Wellenlängen und enthält somit ein sehr breites Frequenzspektrum. Die Modenkopplung kann aktiv mit optischen Modulatoren, oder passiv durch intensitätsabhängige Verluste herbeigeführt werden [62], [61].

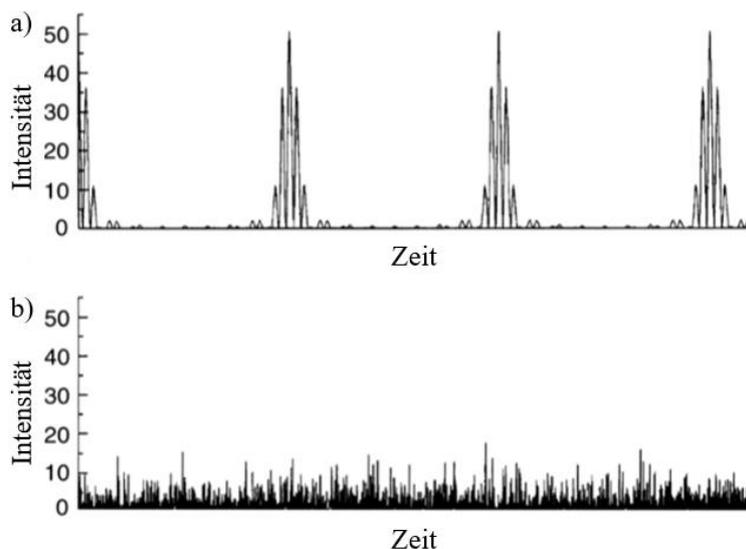


Abbildung 26 Prinzip der Modenkopplung [61]

In dem verwendeten Lasersystem werden die Moden passiv über eine Kerr-Linse gekoppelt. Bei der Kerr-Linsen-Modenkopplung nutzt man die Intensitätsabhängigkeit der Brechzahl als Mechanismus zur Erzeugung eines nichtlinearen Verlustes [63]. Da die Intensität eines Pulses auf der optischen Achse größer als am Rand ist, erfährt der Strahl dort einen höheren Brechungsindex. Der Brechungsindex für die meisten Materialien ist positiv, woraus folgt, dass der optische Weg für den zentralen, hochintensiven Teil des Strahls größer als für die Randbereiche mit geringerer Intensität ist [62]. So kommt es zu einer Phasenverschiebung des zentralen Strahlbereichs gegen die Ränder, wodurch sich der Radius der Phasenfront ändert, und der Strahl fokussiert wird. Analog zu seinem transversalen Intensitätsprofil erhält der Puls eine zusätzliche Phase, die wie eine Sammellinse den Puls fokussiert. Je größer die Intensität, desto stärker ist die Selbstfokussierung. So erfahren schwache Pulse oder kontinuierliche Strahlung große Verluste und können nicht passieren. Dieses Phänomen wird als Selbstphasenmodulation bezeichnet [64]. Mittels eines Spiegels kann eine exakte Rückführung des hohen Intensitätspulses zurück in den Kristall erreicht werden, wie in Abbildung 27 veranschaulicht [65].

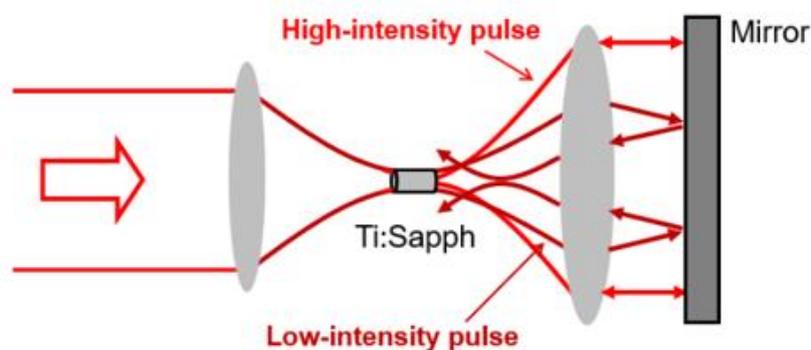


Abbildung 27 Funktionsprinzip einer Kerr-Linse [65]

4.1.1.3 Streckung, Verstärkung und Komprimierung der Pulse

Das Lasersystem ist nach dem Prinzip der Chirped Pulse Amplification (CPA) aufgebaut. Hier wird ein ultrakurzer Laserpuls mit niedriger Energie zunächst gestreckt (gechirped), um diesen weiter verstärken zu können, ohne den Verstärkerkristall und andere optische Komponenten dabei zu zerstören. Vor dem Austreten wird der Puls dann komprimiert, um einen ultrakurzen Laserpuls bei gleichzeitig hoher Energiedichte zu erhalten [63]. Abbildung 28 visualisiert die einzelnen Schritte der CPA.

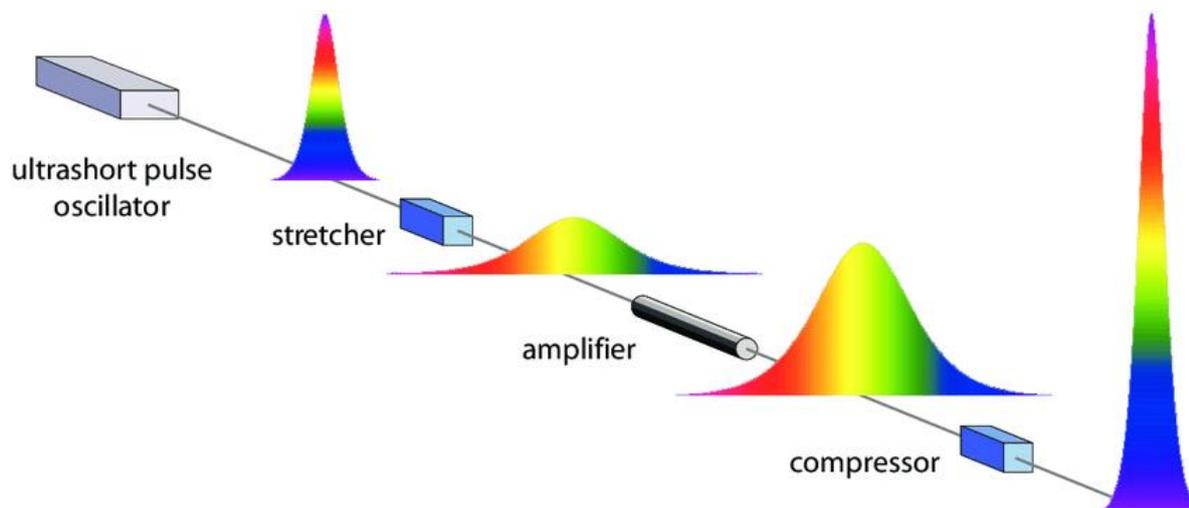


Abbildung 28 Puls-Formung in Ultrakurzpulslasern [63]

Streckung: Der Puls wird mithilfe eines Dispersionsstretchers um den Faktor 10^6 aufgeweitet. Die zeitliche und räumliche Streckung erfolgt mittels des Prinzips der Group-Velocity-Dispersion (GVD). Der Brechungsindex transparenter Materialien ist abhängig von der Wellenlänge. Wandert ein Puls durch ein solches transparentes Medium, so erfahren die verschiedenen Frequenzanteile unterschiedliche Veränderungen in ihrer Phase, was den Puls zeitlich und räumlich beeinflusst [66]. Die Geschwindigkeit für verschiedene Wellenlängen ist im Medium aufgrund des Brechungsindex unterschiedlich und der Puls wird infolgedessen beim Durchlaufen gechirped [67]. Abbildung 29 zeigt das an dem Beispiel für das schnellere blaue und das langsamere rote Licht im gleichen Medium [65].

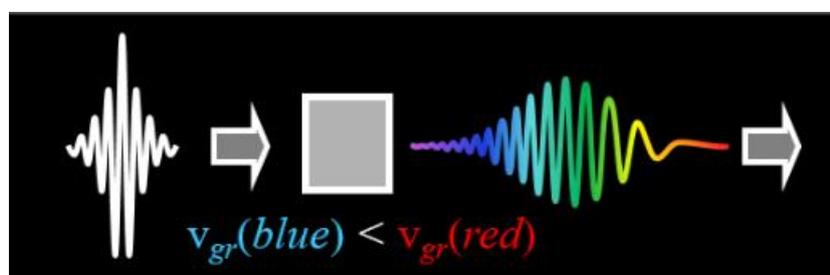


Abbildung 29 Prinzip der GVD veranschaulicht an den Gruppengeschwindigkeit v_{gr} , von rotwelligem (red) und blauwelligem (blue) Licht in einem transparenten Medium [65]

Verstärkung: Energiereiche Laserpulse (> 50 ns, 1 kHz, 25 mJ) vom Nd:YLF-Laser pumpen einen als Verstärkermedium dienenden Ti:Saphir-Kristall, wie in Abbildung 30 zu sehen ist. Der gechirpte Puls ist deutlich kürzer als der Pumpimpuls, welcher im Bereich von ns oder ms liegt. Mithilfe einer Timing-Unit werden die Pulse zeitlich aufeinander abgestimmt, um eine maximale Verstärkung zu erhalten. Durch wiederholtes Durchlaufen des Pulses durch den Verstärkerkristall wird die Energie kontinuierlich erhöht. Ein Problem dabei ist, dass die Fluoreszenz, die vom Verstärkungsmedium emittiert wird, wenn der fs-Puls nicht vorhanden ist, ebenfalls verstärkt wird, und sich zum Teil in dieselbe Richtung wie der fs-Puls ausbreitet. Diese Verstärkung von spontan emittierten Photonen in einem Laserverstärker wird als Amplified Spontaneous Emission (ASE) bezeichnet. Um das zu umgehen, wird in diesem System ein Mehrfachpass-Verstärker implementiert, welcher den Puls mehrmals durch den Kristall leitet und die ASE unterdrückt [65], [66].

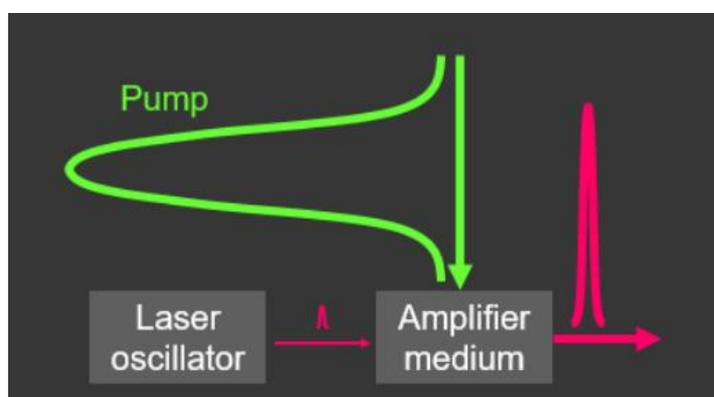


Abbildung 30 Puls-Verstärkung [65]

Komprimierung: Nach der Verstärkung wird der aufgeweitete Puls über einen aus vier Prismen bestehenden Prismenkompressor komprimiert, um den zuvor eingeführten positiven Chirp wieder auszugleichen. Der Prismenkompressor basiert nach dem Prinzip der Winkeldispersion und somit basierend auf den unterschiedlichen Weglängen der Wellenlängen durch das Medium selbst und zwischen den Prismen [67], [68].

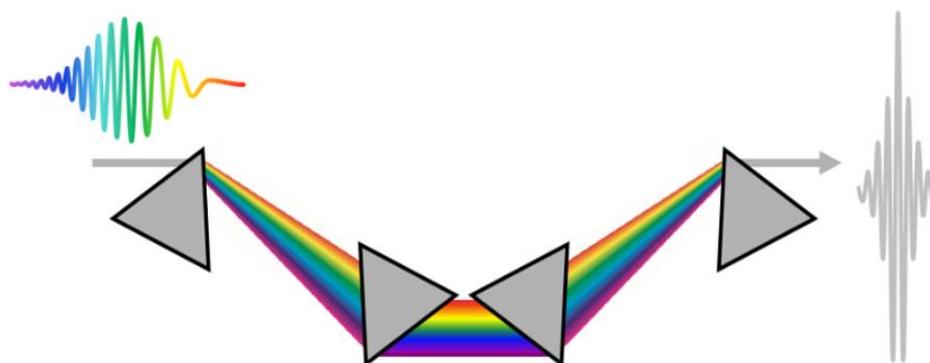


Abbildung 31 Puls-Kompression [65]

4.1.1.4 Funktionsweise Pockelszelle

Mittels einer Pockelszelle wird die Repetitionsrate des Oszillators von 75 MHz auf 1 kHz reduziert. Die Pockelszelle fungiert dabei als „Puls-picker“. Es handelt sich um ein Bauteil, welches den elektrooptischen Pockelseffekt nutzt, um Laserpulse zu separieren [67]. Wenn ein elektrisches Feld um ein doppelbrechendes Material, wie Lithiumniobat, KDP, RTP oder BBO, angelegt wird, verändert sich der Brechungsindex des Mediums, womit der Strahl, welcher hindurch propagiert, seine Polarisation ändert [65]. Das heißt, dass während des Einschaltens die Polarisation des Pulses so geändert wird, dass dieser durch die nachfolgenden optischen Elemente transmittiert wird. Je nach angelegter Spannung kann die Pockelszelle das Licht linear polarisieren, die Polarisation umkehren oder die Polarisation um einen bestimmten Winkel drehen. Wenn hingegen kein elektrisches Feld anliegt, ist die Pockelszelle transparent und das Licht kann ungehindert hindurch [67], [69].

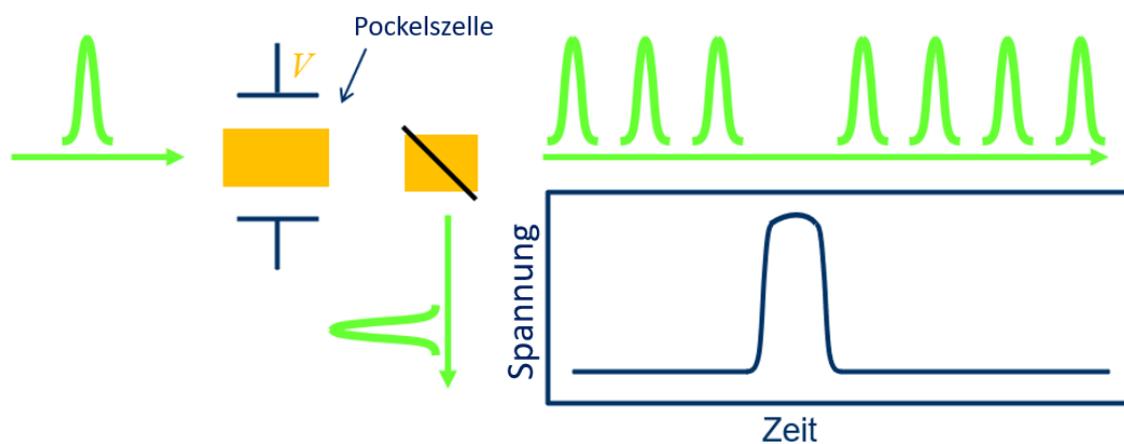


Abbildung 32 Funktionsweise Pockelszelle [65]

4.1.2 Äußere Strahlführung und Formung

Der komprimierte Strahl wird ausgehend vom Lasersystem über einen Umlenkspiegel ausgekoppelt. Im Weiteren passiert dieser eine $\lambda/2$ Platte und einen Polarisator. Über einen weiteren Umlenkspiegel gelangen die Pulse zu einer Fokussierlinse mit einer Brennweite von 80 mm, und abschließend zum Werkstück. In Abbildung 33 ist die Strahlführung schematisch dargestellt [41].

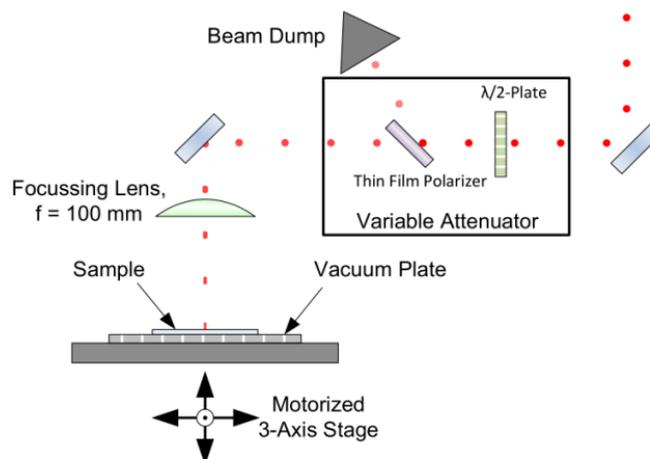


Abbildung 33 Äußere Strahlführung [41]

Über die $\lambda/2$ Platte kann die Polarisationsrichtung des einfallenden, linear polarisierten Strahls variiert werden. Die beiden orthogonalen linearen Polarisationszustände, die für Reflexion und Transmission am wichtigsten sind, werden als p- und s-Polarisation bezeichnet. Bei p-polarisiertem Licht ist das elektrische Feld parallel zur Einfallsebene polarisiert, während s-polarisiertes Licht senkrecht zu dieser Ebene ausgerichtet ist [70]. Wird der Polarisator im Brewster-Winkel durch die Strahlung getroffen, wird die gesamte p-polarisierte Strahlung transmittiert. Durch die vor dem Polarisator geschaltete $\lambda/2$ -Platte kann durch deren Rotation der Anteil der transmittierten p-polarisierten Strahlung und der s-polarisierten reflektierten Strahlung eingestellt werden. Dies ermöglicht es, die Leistung des transmittierten Teilstrahls direkt zu steuern. In Abbildung 34 ist das Prinzip des variablen Abschwächers veranschaulicht.

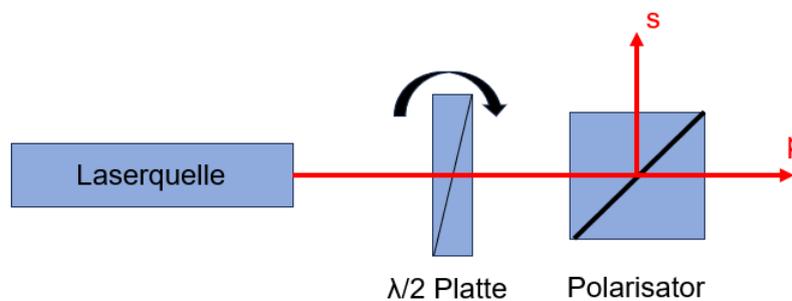


Abbildung 34 Prinzip variabler Abschwächer

Es kann bei Bedarf auch eine $\lambda/4$ -Platte in den Strahlengang eingeschwenkt werden, um eine Rückreflektion in den Laser selbst zu vermeiden. Man spricht dabei von einem sogenannten optischen Isolator. Ein typischer Aufbau hiervon besteht aus einer $\lambda/4$ -Platte und einem Polarisator (Abbildung 35).

Das Laserlicht durchläuft die $\lambda/4$ -Platte während der Hin- und Rückreflexion zwei Mal. Die Polarisation wird dabei von linear zu zirkular geändert. Da die Drehrichtung bei der Reflexion beim Spiegel nicht geändert wird, ergibt sich die Verzögerung von insgesamt 180 Grad aus dem Betrag der Phasendifferenz beim zweimaligen Durchgang durch die $\lambda/4$ -Platte. Mit der erhaltenen Verzögerung wird die Polarisationsrichtung um 90 Grad in Bezug auf die Einfallende gedreht, wodurch das reflektierte Licht den Polarisator nicht mehr passieren kann, und die Rückreflexion abgelenkt wird [71].

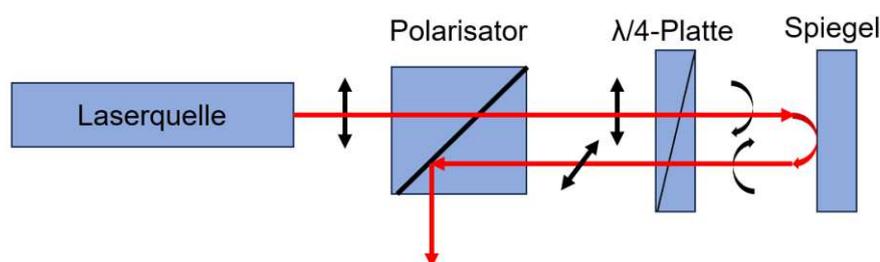


Abbildung 35 Prinzip optischer Isolator

4.1.3 Verfahrenanlage

Für die Manipulation der Proben kam eine drei-achsige Verfahrenanlage der Firma Aerotech zum Einsatz. Die Achsen wurden dabei über die Aerotech A3200 Software angesteuert, in welcher auch direkt die G-Code Programmierung vorgenommen wurde. Der G-Code regelt dabei die Anzahl der Laserpulse pro Fläche über den Vorschub. Die Anfangskoordinaten wurden mithilfe eines Justage-Lasers überprüft und dann in das Programm mittels eines G01 Befehl übernommen. Ein Beispiel für einen Code, der für die Kombination von Strukturierung und Perforierung der Probenbleche verwendet wurde, ist in Anhang Teil B aufgeführt. Die Blechproben wurden für die Bearbeitung auf Probenhalter geklebt und anschließend in eine Halterung eingesetzt, welche die Fixierung der Probe in x- und y-Richtung gewährleistet. Um ein Herunterfallen zu verhindern, wurde die Probenhalterung wiederum von hinten durch die Vakuumplatte angesaugt.

4.2 Weitere Versuchsaufbauten

Zur Durchführung verschiedener Vorversuche, die sich auf die Prüfung von Perforierungen, Oberflächenstrukturen und die Auswahl des geeigneten Materials konzentrieren, wurden spezielle Prüfstände konzipiert und konstruiert. Diese Prüfstände ermöglichen spezifische Experimente, die im Hinblick auf Durchlässigkeits- und Speicherfähigkeitsparameter von großer Bedeutung sind. Im Folgenden werden diese Prüfstände kurz erläutert.

4.2.1 Wassersäule

Der entwickelte Prüfstand zur Bestimmung der erforderlichen Betriebsdrücke zeichnet sich durch seinen simplen, aus mehreren grundlegenden Komponenten bestehenden Aufbau aus (Abbildung 36). Er besteht aus einem geteilten Kunststoffrohr, zwei Gewindestangen, einer Flachdichtung, und einem Deckel mit zwei Bohrungen.

Der Prüfkörper wurde in das geteilte Rohr eingelegt und sowohl oben als auch unten mit einer Flachdichtung abgedichtet. Mithilfe der Gewindestangen wurde der Deckel durch die Bohrungen von oben mit zwei Scheibenmuttern fixiert und festgeschraubt. Von der oberen Öffnung wurde das Fluid bis zu einer definierten Füllhöhe eingefüllt. Dabei wurde beobachtet, ob das eingesetzte (poröse) Material oder die perforierten Bleche das Fluid durchlassen und die Dauer, also die Durchflussrate, bestimmt.

Dies ist besonders wichtig, um Referenzwerte für Materialien und Perforierungen zu erhalten und somit den erforderlichen Förderdruck zu evaluieren.



Abbildung 36 Wassersäule

Das Funktionsprinzip des Versuchsaufbaus basiert auf der Gravitation, wodurch der hydrostatische Druck mit zunehmender Füllhöhe in der Wassersäule ansteigt. Der hydrostatische Druck kann über folgende Beziehung ermittelt werden:

$$p = h * \rho * g$$

Formel 5 Hydrostatischer Druck

Hierbei steht p für den relativen hydrostatischen Druck [Pa], ρ für die Dichte der Flüssigkeit [kg/m³], g für die Erdbeschleunigung [m/s²] und h für die Höhe der Flüssigkeitssäule [m].

4.2.2 Versuchsaufbau zur Speicherfähigkeit und Fluidverteilung

Der Versuchsaufbau wurde speziell auf die Abmessungen der in Kapitel 5.1 und 5.2 hergestellten Probenkörper zugeschnitten. Er basiert auf einem Grundkörper mit einem integrierten Ölreservoir (Abbildung 37). Dieser Grundkörper bildet das Kernstück der Anordnung und bietet die Möglichkeit, von der Seite Druckluft einzuleiten, um das Öl aus dem Reservoir durch den porösen Kunststoff (Poroplast) zu fördern. Die Fixierung und Einspannung des zu testenden Blechs erfolgten durch Verschraubungen. Um die Abdichtung auch unter Druckverhältnissen von innen zu gewährleisten, kam eine schmale Flachdichtung zwischen dem Deckel und dem Grundkörper zum Einsatz. Der Deckel wurde dünn ausgeführt, um die Strömungsverhältnisse auf dem strukturierten Blech im Windkanal so wenig wie möglich zu beeinflussen und die Wechselwirkungen zwischen dem Fluid und der Oberfläche natürlich abzubilden.

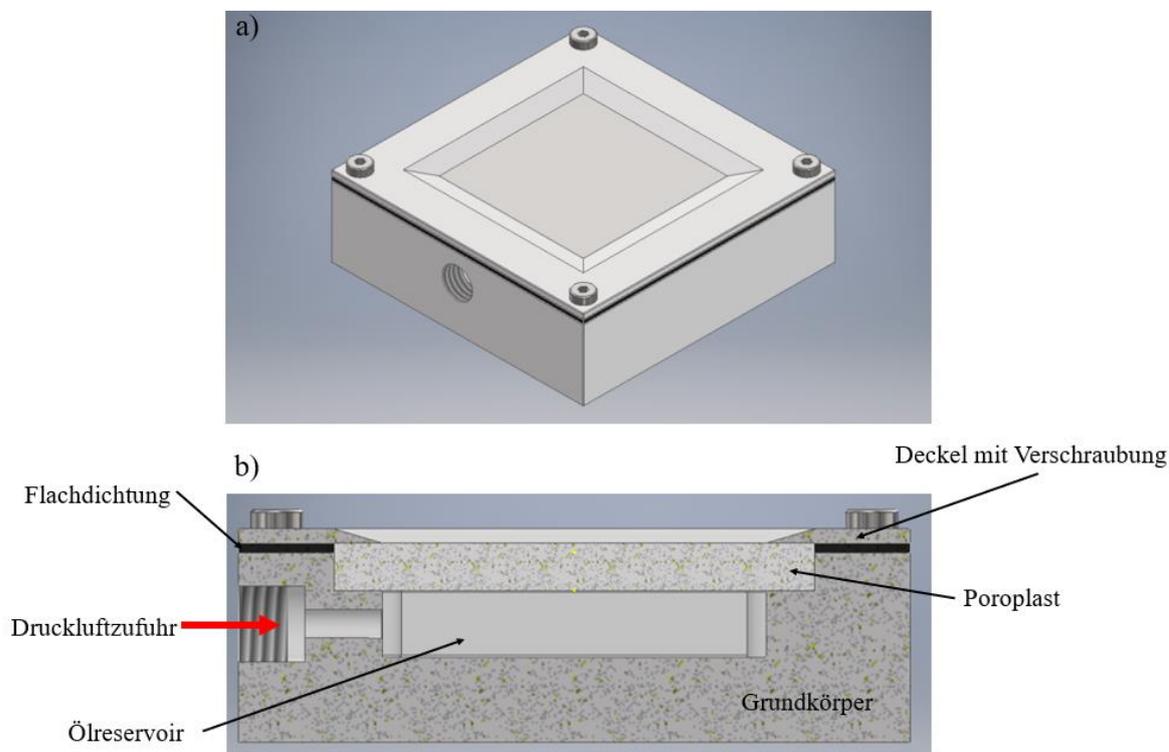


Abbildung 37 Konzeptionierter Versuchsaufbau in a) der isometrischen Ansicht und b) der Schnittansicht im 3D Programm Inventor

Der entwickelte Versuchsaufbau diente im experimentellen Teil für zwei verschiedene Versuche. Einerseits wurde der Effekt eines von unten applizierten Druck auf die gleichmäßige Verteilung von Öl auf perforierten Blechen untersucht und andererseits wurde der Versuchsaufbau auch für den Einsatz im Klima-Windkanal konzipiert, wo die Probe Windgeschwindigkeiten über 100 km/h ausgesetzt ist. Dabei steht die Fähigkeit der Oberflächenstruktur im Fokus, das Fluid trotz der hohen Staudrücke und turbulenter Strömungen zu halten und zu speichern.

Abbildung 38 zeigt den fertig montierten Versuchsaufbau. Der Aufbau ließ sich mithilfe einer bereits bestehenden Halterung und einem selbst entwickelten Verbindungsteil im Klima-Windkanal fixieren, auf welches im Weiteren genauer eingegangen wird.



Abbildung 38 Fertig montierter Versuchsaufbau für die in den Kapitel 5.1 und 5.2 beschriebenen Versuche

4.2.2.1 Halterung für den Klima-Windkanal

Um den Versuchsaufbau in Abbildung 38 im Klima-Windkanal positionieren zu können, war ein Verbindungsteil erforderlich. Dieses Teil fixierte den fertigen Versuchsaufbau auf einem Profilgelenk und ermöglichte so gleichzeitig die Einstellung in verschiedenen Winkeln. Abbildung 39 a) zeigt das konzipierte Verbindungsteil und Abbildung 39 b) das verstellbare Profilgelenk mit dem gefertigten Verbindungsteil.

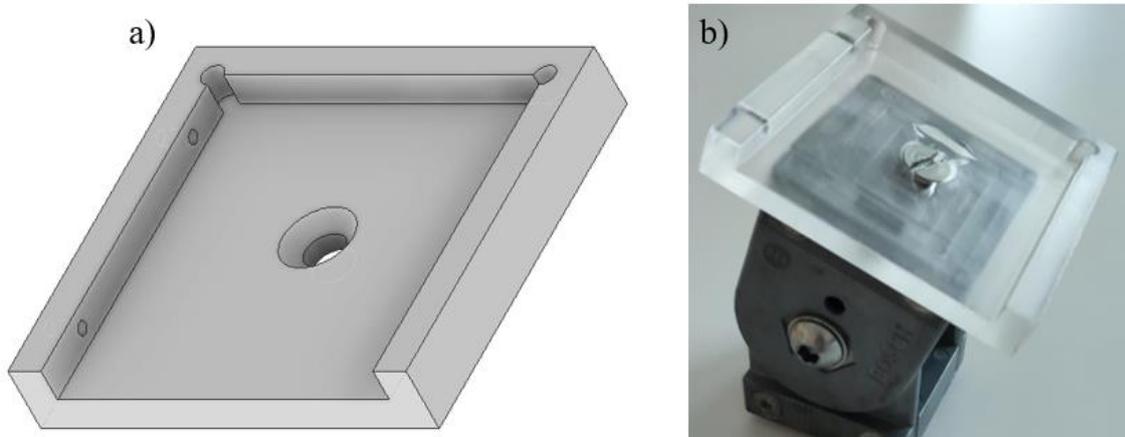


Abbildung 39 Verbindungsteil für die Halterung im Klima-Windkanal a) Konzept und b) montiert auf dem verstellbaren Profilgelenk

4.3 Konstruktion des Tragflächenprüfstandes

Eine zentrale Aufgabe dieser Arbeit war die Entwicklung und Konstruktion eines Prüfstands in Form eines Tragflächenprofils zum Testen neuartiger Anti-Icing-Oberflächen im Klima-Windkanal. Der folgende Abschnitt widmet sich der Konzeption und Konstruktion des mehrteiligen Aufbaus für den Prüfstand.

4.3.1 Anforderungen und Umsetzung

Es sollte eine zuverlässige und flexible Lösung geschaffen werden, die den Anforderungen an die aerodynamische Untersuchung von Tragflächenprofilen in Windkanalumgebungen gerecht wird. Zudem sollte der Aufbau so gestaltet sein, dass er an verschiedene Tragflächenabschnitte und Versuchsszenarien angepasst werden kann.

Die zentralen Anforderungen an den Prüfstand wurden mithilfe einer Übersicht, welche in Abbildung 40 zu sehen ist, veranschaulicht.

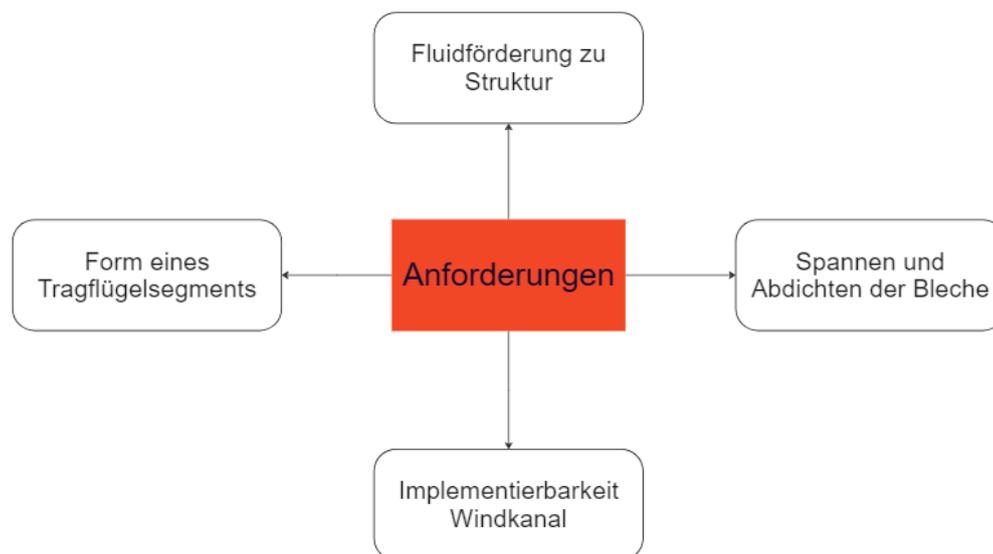


Abbildung 40 Zentrale Anforderungen

Spannen und Abdichten: Der Aufbau musste das zu testende Blech sicher auf dem Tragflächenprofil fixieren, ohne die aerodynamischen Eigenschaften des Profils zu beeinträchtigen. Die Befestigung sollte einfach anzubringen sein und gleichzeitig stabil genug, um den Kräften im Windkanal standzuhalten. Ebenso war es wichtig, dass das Blech effektiv gegen das Austreten von Flüssigkeiten von innen abgedichtet war. Gleichzeitig durfte die Spannvorrichtung keinen negativen Einfluss auf den Strömungsgang haben.

Fluidförderung zur Struktur: Während der Versuche musste eine kontinuierliche Zufuhr von Fluid erfolgen, um die Oberfläche der strukturierten Bleche konstant zu benetzen.

Implementierung im Windkanal: Der gesamte Aufbau musste den Anforderungen eines Windkanals gerecht werden, was heißt, dass er den Luftströmungen und Temperaturen im Windkanal standhalten können sollte, ohne die Messungen oder die Stabilität des Tragflächenprofils zu beeinträchtigen. Zusätzlich mussten Aufhängungen vorgesehen werden, die sowohl eine Befestigung im Windkanal als auch die Variation des Anströmwinkels des Profils ermöglichen.

Form eines Tragflügelsegments: Der Prüfstand musste über ausreichende Tragfähigkeit verfügen, um das Blech während der Versuche in der Form eines Tragflächenprofils zu halten und somit die korrekten aerodynamischen Bedingungen realistisch nachzubilden.

Um die gestellten Anforderungen zu erfüllen, wurden bestimmte Konstruktionsansätze gewählt. Der Aufbau wurde zunächst in zwei Untersysteme unterteilt, den Grundkörper und den Kern. Der Kern konnte durch Formschluss in den Grundkörper eingefügt werden und ist bei Bedarf austauschbar. Eine schematische Darstellung in Abbildung 41 zeigt den Aufbau, wobei ein beigeer Platzhalter den Kern und den umgebenden Grundkörper zur modularen Einfügung repräsentiert. Die gewählte modulare Bauweise ermöglichte eine größere Flexibilität in der Versuchsplanung.

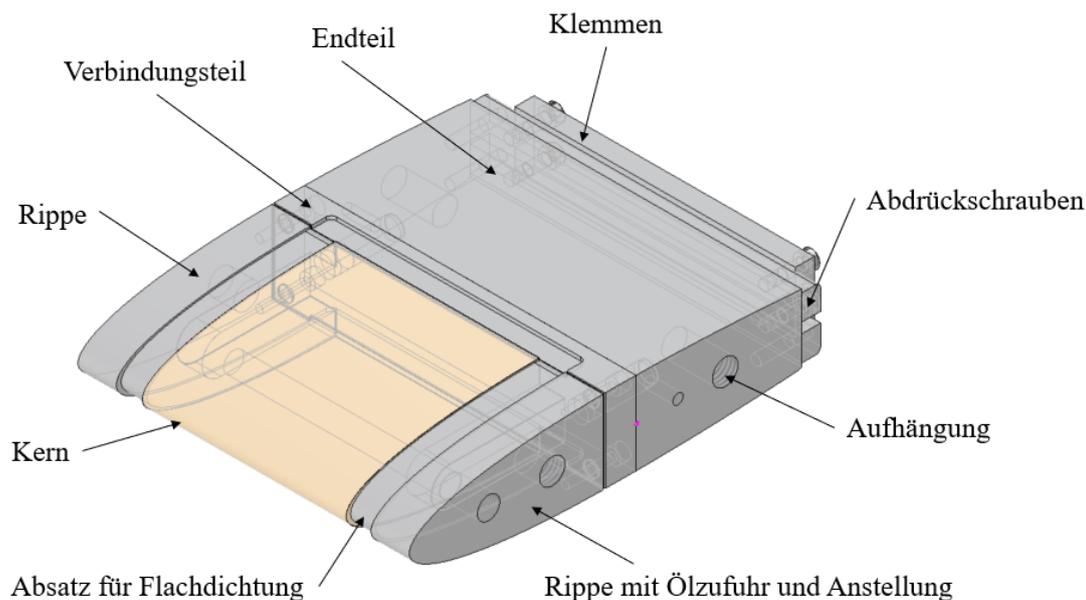


Abbildung 41 Grundkörper mit Kern ohne aufgespanntes Blech

Der Grundkörper setzte sich aus mehreren Komponenten zusammen, wie in Abbildung 41 zu sehen ist: Einem Befestigungsmechanismus, dem Spannsystem, einer Dichtung, der Aufhängung für den Windkanal, der Ölzufuhr sowie einer Möglichkeit zur fixierten Anstellung.

Das Blech wurde durch Klemmen gespannt, die mittels Abdrückschrauben vom Endteil nach hinten herausgedreht werden. Das gewährleistete, dass das aerodynamische Profil frei von jeglichen Störungen blieb. Für die Befestigung wurden Klemmen eingesetzt, die das Blech fixieren. Diese

Klemmvorrichtungen wurden so gestaltet, dass sie zu den Klemmflächen hin abgerundet sind, um das Blech nicht zu beschädigen.

Die Zuführung des Fluids erfolgte über eine Rippe, an der eine Bohrung vorgesehen wurde. Hier konnte ein einfacher Einschraubstutzen implementiert werden. Diese Bohrung leitete das Fluid zum Kern, wo die Distribution erfolgte.

Die Abdichtung des Kerns erfolgte durch eine Flachdichtung rund um die Absätze der Rippen und zusätzlich an einem weiteren Absatz am Verbindungsteil. Obwohl diese Dichtung auf der Abbildung 41 nicht sichtbar ist, gewährleistete sie die Abdichtung des Kerns nach außen hin durch die Spannwirkung des Blechs.

4.3.2 Konstruktion des Grundkörpers

Die dreidimensionale Konstruktion erfolgte mithilfe von Autodesk Inventor, wobei der Fokus zunächst auf der Implementierung des NACA-0012 Flügelprofils für alle Komponenten lag. Dieses Profil wurde gewählt, um gegebenenfalls einen Vergleich mit bereits vorausgegangen Untersuchungen, für welche ebenfalls das NACA-0012 Profil verwendet wurde, herzustellen [18]. Dazu wurde eine Interpolation eines bereitgestellten Probenstücks über die maximale Breite von 34 mm (b_{MAX}) durchgeführt, um auf die Länge des Profils mit 285 mm (L_{Chor}) schließen zu können. Mithilfe des Airfoil Generators "airfoiltools" [72] wurde eine CSV-Datei erstellt, die in die Skizze in Inventor integriert wurde. Diese Datei beinhaltete das Profil der Tragfläche in Form von mehreren Datenpunkten, die auf zwei Achsen bezogen wurden. Anschließend wurden in Inventor die Punkte mittels der Spline-Funktion verbunden, um die Grundskizze zu erstellen. Aus dieser Grundskizze wurden alle weiteren Teile extrudiert. Bei Abweichungen oder benötigten Absätzen, wie zum Beispiel für die Flachdichtung, konnte die Grundskizze entsprechend skaliert werden. Die untenstehende Abbildung zeigt das zu implementierende Profil der Tragfläche mit den verwendeten Variablen.

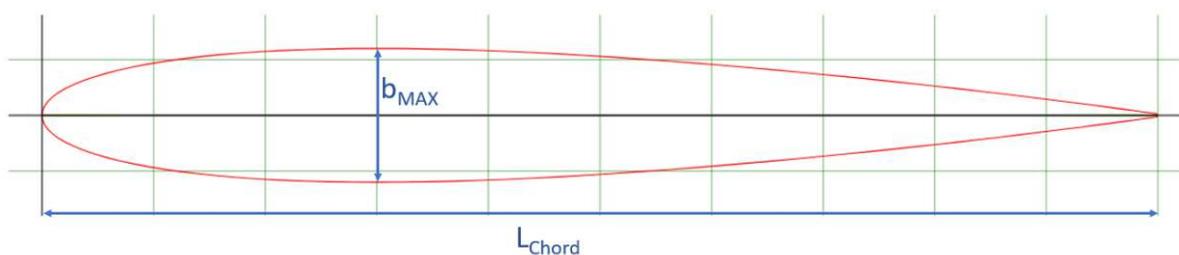


Abbildung 42 NACA-0012 Profil [25]

Im folgenden Abschnitt werden die bedeutendsten Bauteile einzeln abgebildet, beschrieben und ihre genaue Funktion erläutert.

4.3.2.1 Rippen

Bei der Konstruktion der Rippen wurde mit der Extrusion der Grundskizze begonnen. Für den Formschluss mit dem Kern wurde ein Passfederprofil verwendet, um die Fertigung zu erleichtern. Für die aufliegende Flachdichtung wurde ein Absatz erzeugt, wobei die Skizze entsprechend skaliert wurde. An der Rückseite jeder Rippe wurden jeweils zwei Bohrungen vorgesehen, um das Verbindungselement anzuschrauben. Zusätzlich dazu, wurde auf einer der Rippen die Ölzufuhr mittels einer Bohrung für einen Einschraubstutzen vorgesehen. Außerdem wurden seitlich zwei M10 Gewindebohrungen angebracht, um über einer eingedrehten Gewindestange den Anströmwinkel einstellen zu können.

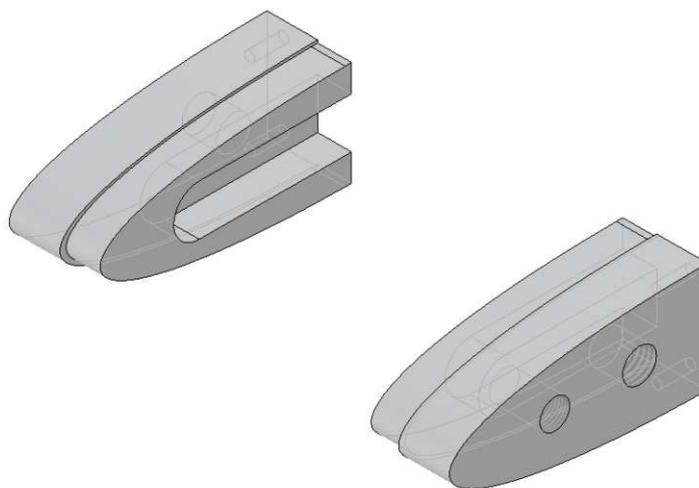


Abbildung 43 Rippen Ansicht vorne-seitlich

4.3.2.2 Verbindungsteil

Dieses Bauteil hatte die Funktion, die Rippen mit dem Endteil zu verbinden, und schaffte des Weiteren die Möglichkeit den Kern auszuwechseln. An der hinteren Seite wurden dazu vier Bohrungen angebracht, um die Rippen zu befestigen. Zusätzlich gab es zwei Bohrungen für Zylinderstifte, welche das Bauteil mit dem Endteil, mithilfe einer Presspassung und Klemmung verbanden.

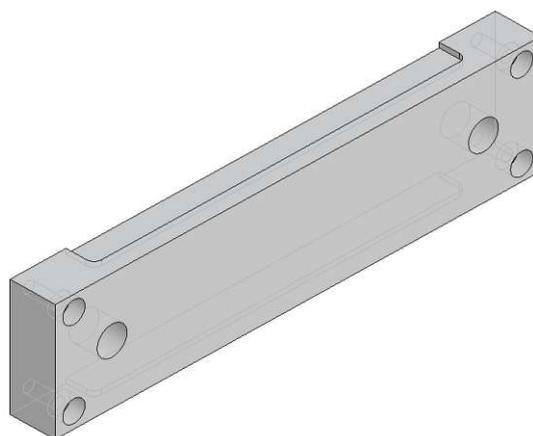


Abbildung 44 Verbindungsteil Ansicht hinten-seitlich

4.3.2.3 Endteil

Da dieses Bauteil das massivste war, diente es als Hauptträger für die Aufhängung im Windkanal. Es wurde mit zwei Gewindebohrungen an der Seite ausgestattet, um das Hauptgewicht des Prüfstandes zu tragen. Der Anschluss nach vorne zum Verbindungsteil erfolgte mittels zweier Passstifte, die an der Seite zum Endteil eine Spielpassung und an der Seite zum Verbindungsteil eine Presspassung aufwiesen. Durch die Kraft der Verschraubung und über die Länge der Passstifte in der Spielpassung wurde ein Biegemoment eingeleitet. Dadurch entstand an der Seite der Presspassung, welche als Einspannung betrachtet werden kann, ein konstantes Biegemoment von beiden Seiten, das den Aufbau verklemmte und stabilisierte. In Abbildung 46 ist der Klemmmechanismus veranschaulicht.

Die Klemmen wurden hinten mithilfe von Abdrückschrauben fixiert, wobei beim Eindrehen dieser das Blech, durch das Abdrücken der Klemmen nach hinten, gespannt wurde.

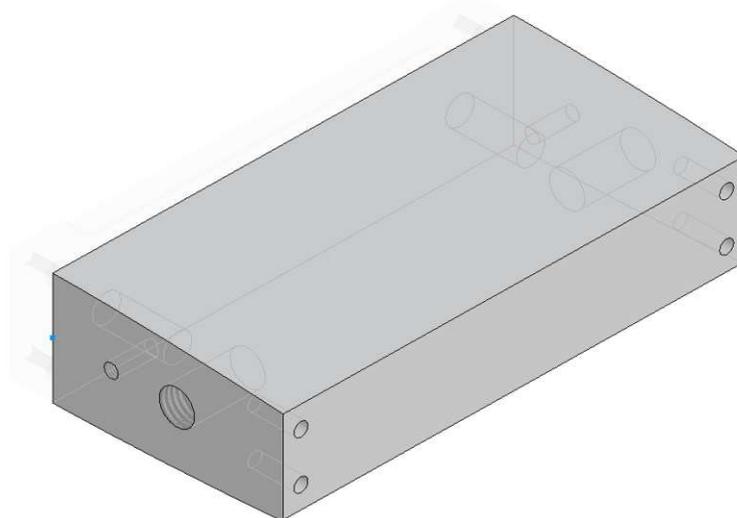


Abbildung 45 Endteil Ansicht hinten-seitlich

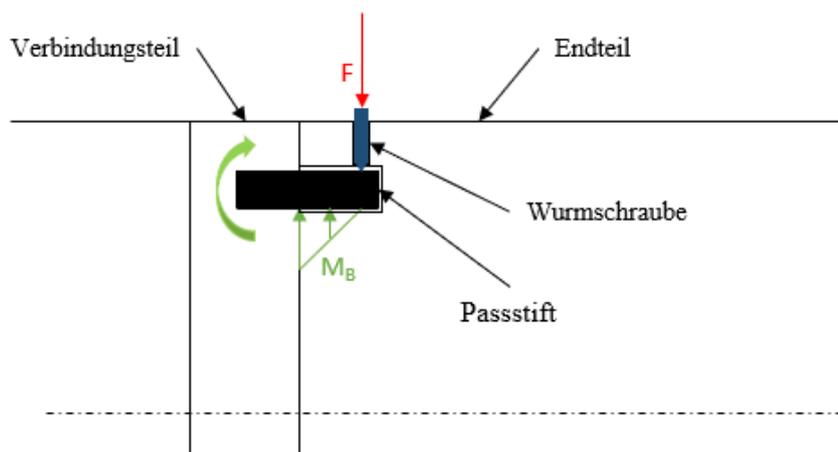


Abbildung 46 Klemmmechanismus Passstift

4.3.3 Auswahl und Konstruktion des Kerns

Die Hauptanforderung an den Kern beziehungsweise das Kernmaterial bestand darin, eine kontinuierliche und gleichmäßige Ölzufuhr von hinten zur Tränkung der Oberfläche des Blechs zu gewährleisten, sowie das Blech zu tragen und in Form zu halten. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurden verschiedene Ansätze und Konzepte untersucht. Einer dieser Ansätze beinhaltete die Auswahl eines porösen Materials, das in der Lage ist, die Flüssigkeit zu speichern und kontrolliert abzugeben. Hierbei wurden verschiedene Möglichkeiten in Betracht gezogen, darunter gesinterte poröse Materialien, poröser Kunststoff, Schaumkeramiken, selbst gedruckte Microlattices und Metallschäume. Während dieser Untersuchungen wurde eine umfassende Korrespondenz mit verschiedenen Herstellern geführt, insbesondere in Bezug auf die Anwendung im Luftfahrtbereich.

Neben den porösen Materialien wurden auch massive Kernsysteme in Betracht gezogen. Eines der entwickelten Konzepte ist eine Adaption des TKS-Systems, auf welches bereits in Kapitel 3.1.4 eingegangen wurde.

Um den passenden Kern zu finden, wurden diverse Vorversuche durchgeführt. Diese Vorversuche konzentrierten sich auf Aspekte wie Absorption, Abgabe, Tragfähigkeit und Gesamtstruktur. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen wurden verschiedene Versuchsaufbauten dafür entwickelt und eingesetzt, wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben.

Im nächsten Abschnitt werden die einzelnen Konzepte individuell vorgestellt, die durchgeführten Vorversuche erläutert, protokolliert und im Anschluss die Eignung für den Versuchsaufbau diskutiert. Dies bildet die Grundlage für die Auswahl und Implementierung des optimalen Kernmaterials.

4.3.3.1 Poroplast

Der Name "POROPLAST" beruht auf dem mikroporösen Polyethylen, das mithilfe eines Sinterprozess hergestellt wird. Der polymere Grundwerkstoff wird durch Verfahren wie Mahlen, Fraktionieren und Mischen aufbereitet, um die bestmöglichen Eigenschaften für den vorgesehenen Verwendungszweck zu erzielen. Verschiedene Materialtypen mit unterschiedlichen Porengrößen wurden von der Firma Alfred Durst Filtertechnik GmbH zur Verfügung gestellt. Anfangs wurde die Idee eines massiven Kerns aus diesem Material in Betracht gezogen. Allerdings führten die hohen Kosten für eine maßgeschneiderte Anfertigung dazu, das Material vorerst nur an der für die Arbeit entscheidenden Stelle, der Leading Edge – der Tragflächenvorderkante, einzusetzen.

Um den geeigneten Materialtyp zu ermitteln, wurden verschiedene Vorversuche an Testsamples mit den Abmessungen 50x50x5 mm durchgeführt.

1. Absorptionsverhalten

Zu den ersten Experimenten gehörte die Abschätzung des Absorptionsverhaltens. Dabei wurden verschiedene Fluide mit unterschiedlichen Dichten und Oberflächenspannungen verwendet, wie in Tabelle 2 aufgeführt. Diese Flüssigkeiten wurden in einer definierten Menge von 0.1 ml auf die Materialoberfläche aufgebracht und dort für eine Einwirkungszeit von 5 Minuten belassen.

Referenz	Fluid	Oberflächenspannung bei 20°C [mN/m]	Dichte [kg/m ³]	Viskosität bei 20° [mm ² /s]
1	Wasser	72.7	997	1.0
2	Olivenöl	~32.5	916	107.5
3	Ethylenglykol	47.7	1110	20.8
4	Seifenwasser	~60.0	997	1.0
5	Silikonöl	21.5	970	~1000.0

Tabelle 2 Eigenschaften der verwendeten Fluide für die Absorptionsversuche

Nach der Einwirkungszeit von 5 Minuten wurden Aufnahmen gemacht. Auf diesen sind die verschiedenen Fluidtropfen mit Referenznummern entsprechend Tabelle 2 gekennzeichnet. Eine Zusammenfassung dieser Aufnahmen mit dem dazugehörigen Materialtyp ist in Tabelle 3 zu finden.

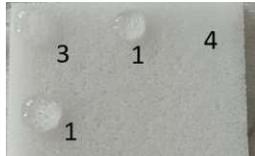
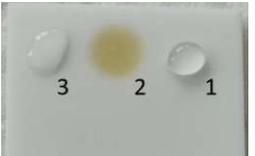
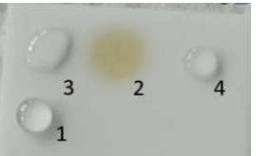
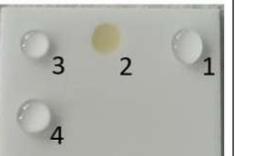
Materialtyp	163	180	114	309
Porengröße	100-200µm	40µm	20µm	10µm
Aufnahme				

Tabelle 3 Ergebnisse des Absorptionsverhalten bei den Poroplast-Proben

Alle untersuchten Materialoberflächen erwiesen sich als hydrophob. Das zunächst aufgrund seiner geringeren Oberflächenspannung eingesetzte Olivenöl wurde in allen Versuchen direkt aufgenommen. Ein klarer Unterschied zeigte sich auch beim Benetzungswinkel von Wasser und Ethylenglykol, welcher bei diesem Fluid weitaus geringer war. Beim Materialtyp 163 wurden nur Tests mit Fluiden höherer Oberflächenspannung durchgeführt, da hier aufgrund der großen Porengröße gesichert war, dass das Öl direkt aufgenommen wurde, was sich auch erwartungsgemäß in den nachfolgenden Untersuchungen bestätigt hat. Der Tropfen aus Seifenwasser wurde hier teilweise vom Material absorbiert. Bei den Materialtypen 180 und 114 zeigte sich eine zusätzliche Verteilung des Öls um den initialen Tropfen herum, welche jedoch bei Materialtyp 180 deutlich gleichmäßiger ausfiel. Bei der kleinsten Porengröße (Typ 309) war keine Absorption um die Tropfen erkennbar, was auf eine eingeschränkte Transportfähigkeit des Öls im Material schließen lässt. Bei allen Tests wurde selbst bei längerer Einwirkzeit (>1 Stunde) kein Öl aus den Samples abgegeben, was für die Speicherfähigkeit von Ölen in dem Material spricht. Wasser und Glykol konnten durch reine Auflage nicht vom Material aufgenommen werden. Als nächster Schritt wurde der Druck als zusätzliche Variable eingeführt, um das Förderverhalten genauer zu analysieren und herauszufinden, welcher Druck erforderlich ist, um Fluide durch die Struktur zu transportieren.

Insgesamt erwies sich der Materialtyp 180 als am vielversprechendsten, basierend auf seiner guten Absorptionsfähigkeit, der Transportfähigkeit durch Material und seiner Speicherfähigkeit. Im Verlauf von weiteren Versuchen wurde das Absorptionsverhalten mit dem später verwendeten Silikonöl erprobt. Da das Material im Rahmen von späteren Versuchen ohnehin mit Silikonöl getränkt wurde, wurde eine Menge von 1 ml auf die Probenoberfläche aufgetragen. Hierbei ließ sich bereits eine leichte Abgabe an die Umgebung und das darunterliegende Tuch feststellen.

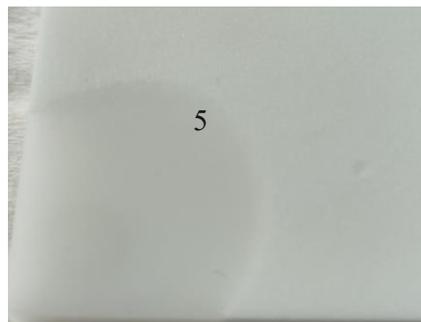


Abbildung 47 Materialtyp 180 mit Silikonöl (5, siehe Tabelle 3)

2. Abschätzung des Betriebsdruck

Für diesen Versuch wurde der Aufbau gemäß Kapitel 4.2.1 verwendet. Die 5 mm dicken Samples wurden seitlich mit Dichtungsband abgedichtet und zwischen den beiden Flachdichtungen platziert. Anschließend wurde der Versuchsaufbau verschraubt und von oben Wasser, bis zur zuvor definierten Füllmarke, eingegossen. Es wurde dabei bewusst nur Wasser verwendet, da dieses in den vorherigen Versuchen am stärksten vom Material abgestoßen wurde. So konnte eine Obergrenze für den maximal erforderlichen Betriebsdruck abgeleitet werden, die Verschmutzung minimiert und eine einfache

schnelle Durchführung ermöglicht werden. Diese Versuche wurden mit den vier verschiedenen Materialtypen durchgeführt.

Wasser wurde in einer definierten Füllhöhe von 0.1 m eingefüllt. In der Folge wurde der relative hydrostatische Druck mithilfe von Formel 6 berechnet, und dieser als den maximalen wirkenden Druck auf das Material angenommen.

$$p = h * \rho * g$$

Formel 6 Hydrostatischer Druck

Dieser wirksame Druck auf das Material betrug für alle Typen 970 Pa, was in etwa 0.01 bar entspricht. Die Ergebnisse für die gemessenen Durchflusszeiten Δt sind in Tabelle 4 dargestellt. Mit dieser Zeit ließ sich mittels folgender Formel auf die Volumendurchflussrate \dot{V} rückschließen, welche ebenfalls in Tabelle 4 aufgeführt wird:

$$\dot{V} = \frac{V}{\Delta t}$$

Formel 7 Volumendurchflussrate

Die Auswertung der Ergebnisse gestaltete sich teilweise herausfordernd, insbesondere beim Materialtyp 163 mit der größten Porengröße. Hier strömte das Wasser direkt beim Eingießen mit einer hoher Volumendurchflussrate durch das Material. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Wassermenge vor dem Eingießen direkt abgemessen. Es war ebenfalls wichtig zu beachten, dass der auf das Material wirkende Druck mit abnehmender durchfließender Wassermenge abnimmt.

Materialtyp	Wasservolumen [cm ³]	Wirksamer relativer Druck [Pa]	Durchlaufzeit [min:s]	\dot{V} [cm ³ /s]
163	12.56	970	00:26	0.483
180	12.56	970	05:20	0.039
114	12.56	970	07:30	0.028
309	12.56	970	-	-

Tabelle 4 Volumendurchfluss Poroplast

Beim Materialtyp 163 war eine sehr hohe Durchflussrate zu beobachten. Die Materialtypen 180 und 114 hingegen ermöglichten einen gleichmäßigen und kontinuierlichen Durchfluss des Fluids. Beim Materialtyp 309, mit der kleinsten Porengröße, konnte bei einem relativen Druck von 0.01 bar kein Fluidfluss festgestellt werden.

Für die untersuchte Anwendung mit einem eher geringen Fluidstrom war es wichtig, eine gleichmäßige Tränkung der Oberfläche zu gewährleisten. Basierend auf den erzielten Ergebnissen wurde somit die Entscheidung getroffen, das Material des Typs 180 in die Konstruktion zu integrieren. Der Materialtyp 180 erfüllte alle Anforderungen bezüglich Speicherfähigkeit, Förderfähigkeit und Tragfähigkeit.

Allerdings waren die Kosten des Materials zu hoch, um den gesamten Kern aus diesem porösen Kunststoff zu fertigen. Daher wurde entschieden, das Material vorerst nur an der für diese Arbeit wichtigsten Stelle, der Tragflächenvorderkante, einzusetzen.

Basierend darauf wurde ein Konzept entwickelt, bei dem das Kernsystem aus zwei Teilen besteht (Abbildung 48): Eine dünne Poroplast-Leiste, um nur die Tragflächenvorderkante mit Fluid zu versorgen, und ein solides Aluminiumteil, welches diese mittels eines Schwalbenschwanz Formschluss trägt. Die Poroplast-Leiste besaß eine ausreichende Tragfähigkeit, um das gespannte laserstrukturierte und perforierte Blech zu unterstützen. Im tragenden Aluminiumteil wurden zwei Ölbohrungen vorgesehen, um das Silikonöl zum porösen Teil zu transportieren.

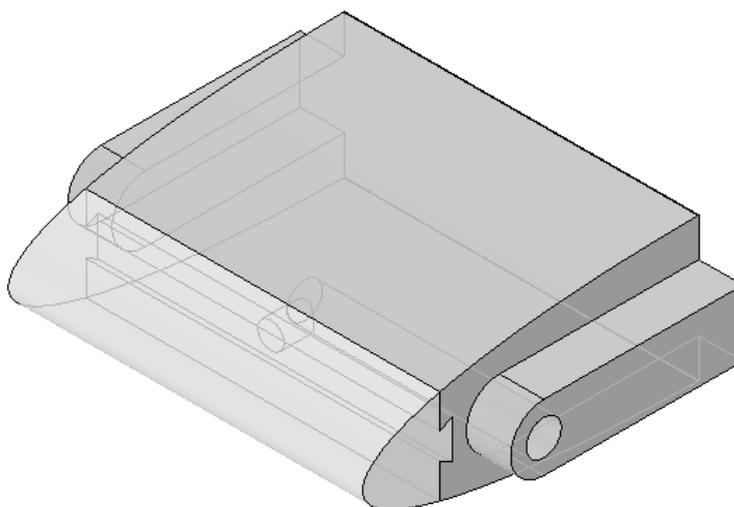


Abbildung 48 Poroplast-Leiste mit tragendem Aluminiumteil

4.3.3.2 Poröse Faser

Das Unternehmen Porex konnte mehrere Proben von porösen Faserkunststoffen zur Verfügung stellen. Diese auf Polymer basierenden Fasern sind durch einen Sinterprozess an Berührungspunkten miteinander verbunden und schaffen so Hohlräume, wodurch sie porös werden, und Flüssigkeiten halten können (Abbildung 49).

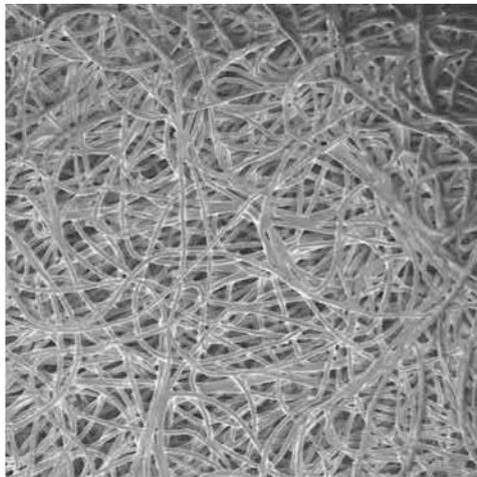


Abbildung 49 Poröse Fasern [73]

Grundsätzlich eignen sich diese Materialien hervorragend für Anwendungen im Bereich des Fluidmanagements, da die Fasern in idealen Kapillarstrukturen ausgerichtet sind. Durch Adaption der Porengröße können zudem Parameter wie die Fließgeschwindigkeit und Absorptionsfähigkeit gegenüber Fluiden gezielt eingestellt werden [73].

Die Materialproben zeichneten sich durch ihre dünne Form aus, waren sehr elastisch und konnten stark verformt werden. Sie boten zwar nicht die Tragfähigkeit wie andere Konzepte, ermöglichten aber durch die verschiedenen Faserparameter die gezielte Einstellung des Ölflusses. Besonders interessant war, dass dieses Material teils ausgeprägte hydrophobe Eigenschaften aufweist, aber gleichzeitig Silikonöl in Vorversuchen sehr gut aufnehmen und speichern konnte. Für die Vorversuche wurden auch hier wieder die definierte Menge Silikonöl von 0.1 ml auf die Oberfläche gegeben und die Absorption und Abgabe beobachtet. Dabei wurde bei allen Materialien ein ausgezeichnetes Absorptions- und Haltevermögen für Silikonöl festgestellt. Dadurch wurde in Erwägung gezogen, dieses Material als Zwischenschicht in das TKS- oder Microlattice-Kernsystem zu integrieren (siehe Kapitel 4.3.3.4 und Kapitel 4.3.3.5), falls eine zu hohe Ölabgabe in diesen Systemen auftreten würde.

Abbildung 50 zeigt die drei verschiedenen Materialtypen mit aufgebrachtem Silikonöl. In Tabelle 5 sind die genauen Materialspezifikationen zusammengefasst.



Abbildung 50 Porex Samples

Materialtyp	Porengröße [μm]	Dicke [mm]	Eigenschaften	Material
9948	7-12	3.7	hydrophob	Polyethylen
BM20	6	1.0	hydrophil	Gesintertes PFTE
9619	7-12	1.6	hydrophob	Polyethylen

Tabelle 5 Porex Materialspezifikationen

4.3.3.3 Spumix Keramikschaum

Ein weiterer Ansatz für poröses Grundmaterial, der in Betracht gezogen wurde, sind die Schaumkeramiken (siehe Abbildung 51) vom Wiener Unternehmen Spumix. Dieses Material war leicht zu verarbeiten und zu trennen, wobei auch hier eine direkte Absorption des Silikonöls in die Struktur beobachtet werden konnte.

Jedoch ließ sich schnell erkennen, dass das Material für die geplante Anwendung viel zu spröde war, da sich bereits bei der bloßen Handhabung kleine Partikel ablösten, und somit auf die mangelnde Eignung für den Tragflächenprüfstand hinweisen. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurden keine weiteren Versuche durchgeführt, da das Material nicht den Anforderungen entspricht.



Abbildung 51 Spumix Keramikschaum

4.3.3.4 TKS-Adaption

Die Inspiration für diese Version des Kerns wurde von dem in den 1960er Jahren entwickelten TKS-System abgeleitet (Kapitel 3.1.4). In diesem System wird ein in einem Hohlraum hinter der Vorderkante der Tragfläche gespeichertes Fluid verwendet, um Vereisung zu verhindern [24]. Eine Veranschaulichung des TKS-Systems ist in Abbildung 52 zu sehen.

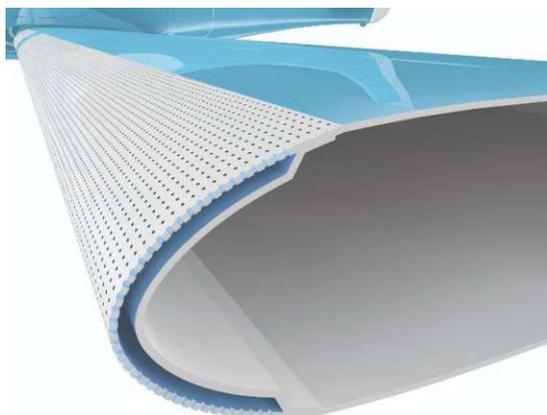


Abbildung 52 TKS Ice-Protection System [24]

Ein ähnliches Konzept wurde für diese Version des Kerns übernommen. Bei diesem Ansatz wird kein poröses Grundmaterial verwendet, sondern jener schmale Spalt genutzt, der sich zwischen dem Blech und dem Kern bildete, und durch eine kleine Aussparung am Kern geschaffen wurde. Eine Aufnahme der entwickelten Konstruktion in einer Schnittansicht ist in Abbildung 53 zu sehen. Die Formintegrität des Blechs im Tragflächenprofil wurde durch den tragenden Absatz der Rippen, auf welchen zusätzlich die Flachdichtung aufliegt, gewährleistet.

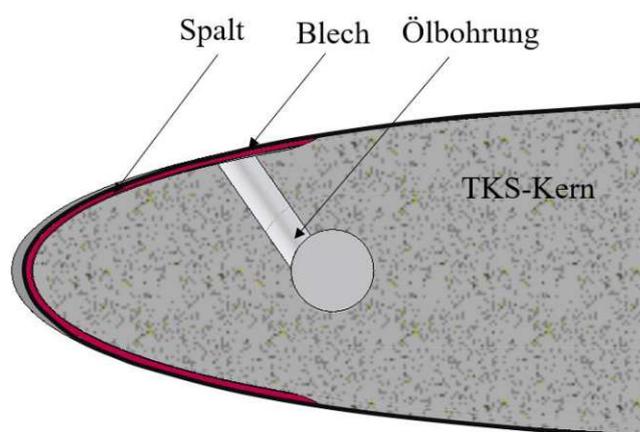


Abbildung 53 TKS-Adaption Kern Schnittansicht

Das Ziel war, dass sich hinter dem Blech ein dünner, gleichmäßiger Film aus Öl bildet, der die perforierte Oberfläche tränkt und so die Ausbildung einer SLIPS Oberfläche ermöglicht. Dazu wurden Ölbohrungen an der oberen Fläche des Kerns vorgesehen, von denen aus das Fluid mit Druck auf der Aussparung nach unten hin verteilt wurde. Abbildung 54 zeigt das entsprechend konstruierte System.



Abbildung 54 TKS-Kern

4.3.3.5 Microlattice (3D-Druck)

Dieser Ansatz nutzte die Möglichkeit, poröse Strukturen mittels 3D-Druck selbst herzustellen. Er wurde direkt am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien mithilfe eines MSLA-Druckers (Elegoo Saturn S) umgesetzt. Für die Umwandlung massiver Teile in poröse Strukturen wurde das Programm Netfabb von Autodesk verwendet, welches die Transformation von Bauteilen oder Bauteilabschnitten in sich periodisch wiederholende Gitterstrukturen ermöglicht. Auf diese Weise ließen sich durchlässige Teile erzeugen. Die Größe der Gitterstrukturen konnte im Programm adaptiert werden, wobei verschiedene Variationen der Einheitszelle zur Verfügung stehen, die periodisch wiederholt werden können. Für diesen Ansatz wurde eine rhombische Dodekaeder Einheitszelle ausgewählt (Abbildung 55).

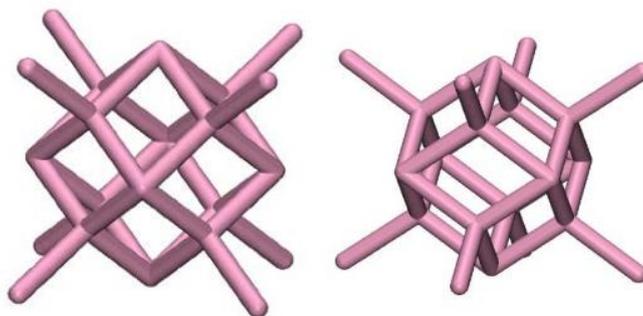


Abbildung 55 Rhombische Dodekaeder Einheitszelle aus zwei Winkeln [74]

Die Wahl dieser Einheitszelle beruhte auf positiven Ergebnissen aus verschiedenen Studien bezüglich ihrer Kompressionseigenschaften, da sie bereits an einer Vielzahl von Materialien auf ihre Druckfestigkeit untersucht wurde [75], [76]. Ähnlich wurde der Kern im Versuchsaufbau durch das Aufspannen des Blechs größtenteils gestaucht und auf Druck belastet. Ein Beispiel für eine solche Struktur bei einer Titan-Legierung ist in der Abbildung 56 zu sehen.

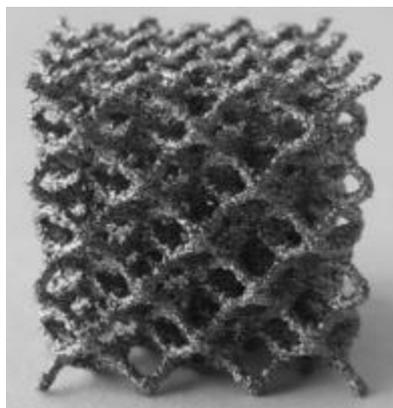


Abbildung 56 Rhombisches Dodekaeder in Gitter Struktur bei einer Titan-Legierung [75]

Beim ersten Druck wurden die Parameter ungünstig ausgewählt, was dazu führte, dass keine Poren im hergestellten Material entstanden und somit auch keine Durchlässigkeit gegeben war. Es muss hierbei angemerkt werden, dass durch kleinere Einheitszellen zwar eine höhere Tragfähigkeit erzielt wird, dies jedoch auf Kosten der Porosität des Materials geschieht [74]. Insbesondere war die Dicke der einzelnen Balken zu hoch und die Abstände zwischen den Einheitszellen zu gering. Abbildung 57 zeigt diese fehlerhafte erste Iteration des hergestellten Kerns.

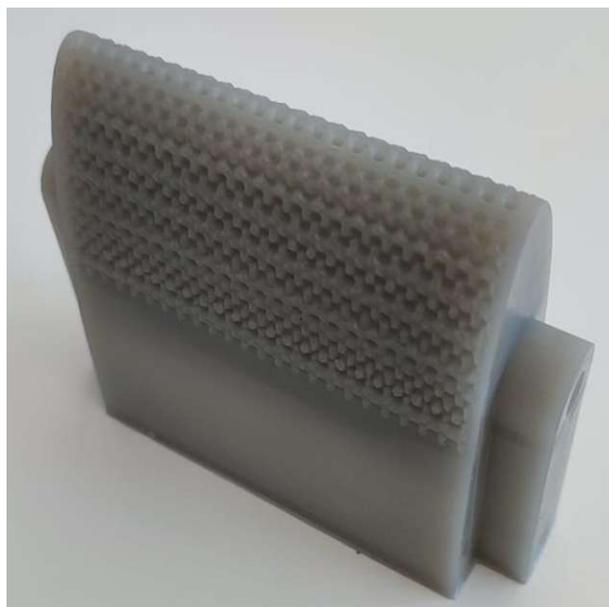


Abbildung 57 Erste Iteration des Microlattice-Kerns

Infolgedessen mussten sowohl die Dicke als auch die Abstände der Einheitszellen angepasst werden, um in der zweiten und dritten Iteration so die gewünschte poröse Kernstruktur zu erzeugen. Um Druckharz einzusparen, ist im massiven Teil unten ein Hohlraum integriert.

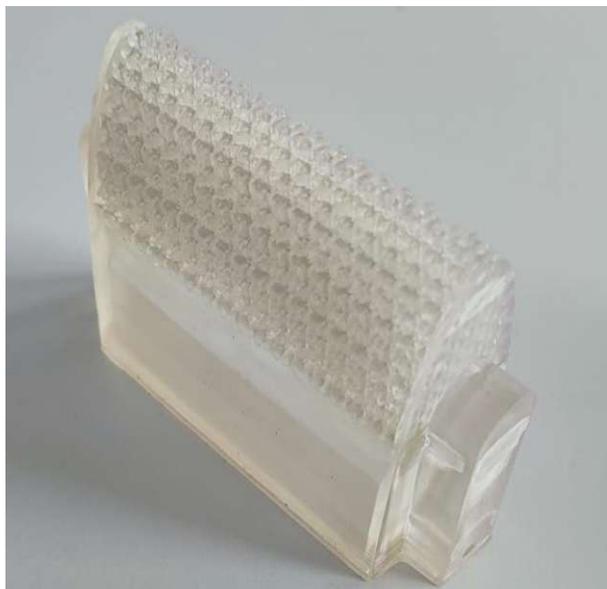


Abbildung 58 Zweite Iteration des Microlattice-Kerns

Die erste Iteration des Kerns wurde mit Siraya Tech Fast Grey gedruckt, während die zweite aufgrund der Verfügbarkeit mit Siraya Tech Blue gedruckt wurde. Die verwendeten Druckparameter der verschiedenen Versionen sind in Tabelle 6 aufgeführt, wobei die Variablen x , y und z die Größe der Einheitszelle entlang der entsprechenden Koordinatenachsen darstellen. Dieser Ansatz eröffnete die Möglichkeit einer anpassbaren Modifikation der Gitterstruktur, um sowohl den Anforderungen an Tragfähigkeit als auch an Porosität gerecht zu werden.

Iteration	x [mm]	y [mm]	z [mm]	Dicke [mm]
1	3.3	3.3	3.3	1.5
2	4.5	4.5	4.5	1.25
3	4.0	4.0	4.0	1.0

Tabelle 6 Parameter für die Rhombische Dodekaeder Einheitszelle

4.3.3.6 Metallschäume

Mit dem Einsatz von Metallschäumen wurde ein weiterer Ansatz in Bezug auf bereits existierende poröse Materialien in Betracht gezogen. In diesem Zusammenhang wurde Kontakt zu verschiedenen Firmen und Herstellern aufgenommen. Leider war keines der Unternehmen in der Lage, kostengünstig Produktproben zur Verfügung zu stellen. Da bereits alternative Lösungen untersucht wurden und aufgrund der hohen Kosten wurde der Ansatz verworfen. Daher war es nicht möglich, die Eignung dieses Materials für die vorliegenden spezifischen Anforderungen zu prüfen.

4.3.3.7 Zusammenfassung und Auswahl

In Tabelle 7 sind die verschiedenen Ansätze mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen nochmals zusammengefasst.

Konzept	Umsetzung	Vorteile	Nachteile
Poroplast	Ja	<ul style="list-style-type: none"> - Gutes Halteverhalten - Kontrollierte Ölabgabe - Leicht - Hydrophob - Tragfähig 	<ul style="list-style-type: none"> - Sonderanfertigung nötig - Hohe Kosten
Porex	In Kombination mit anderen Konzepten (TKS-Adaption)	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrophob - Gute Speicherfähigkeiten - Kontrollierte Ölabgabe 	<ul style="list-style-type: none"> - Kein Stützen der Form - Geringe Tragfähigkeit
Spumix-Keramikschaum	Nein	<ul style="list-style-type: none"> - Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr spröde - Ständiges Ablösen von Materialpartikeln
TKS-Adaption	Ja	<ul style="list-style-type: none"> - Parameter wie Spalthöhe nachträglich adaptierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Speicherfähigkeit - Keine Stützwirkung im Bereich des Leading Edge
Microlattice	Ja	<ul style="list-style-type: none"> - Leicht adaptierbar - Porengröße selbst einstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Lange Druckdauern - Aufwendiges Design des Gitters
Metallschaum	Nein	<ul style="list-style-type: none"> - Diverse Porengrößen verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Kosten

Tabelle 7 Zusammenfassung Kernkonzepte

Demnach wurde entschieden, drei vielversprechende Ansätze umzusetzen: Die TKS-Adaption, die Poroplast-Leiste und der 3D-gedruckte Microlattice. Jedes dieser Kernkonzepte ist in Abbildung 59 nochmals im Grundsystem implementiert abgebildet.

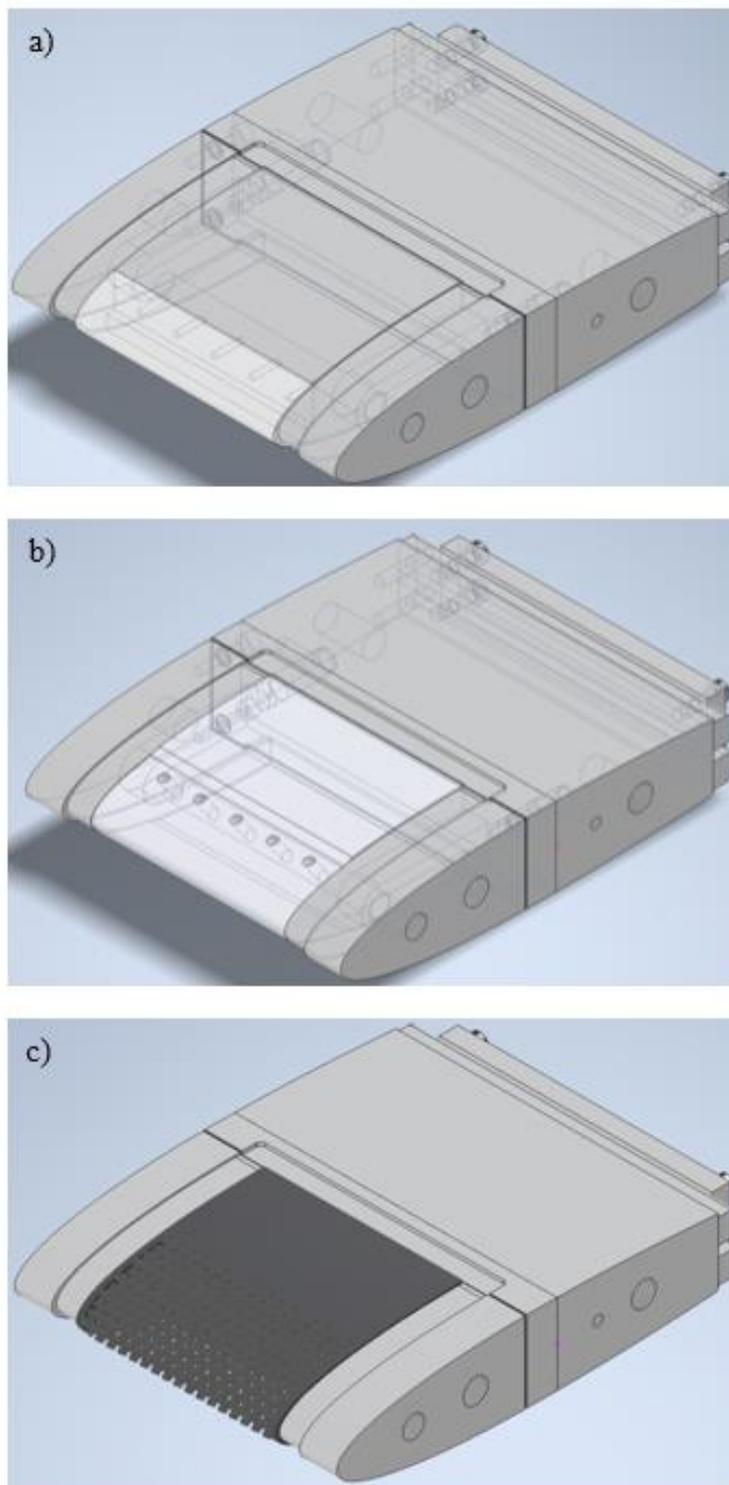


Abbildung 59 Ausgewählte Kernkonzepte implementiert im Grundsystem mit a) Poroplast-Kern, b) TKS-Adaption und c) Microlattice-Kern

4.3.4 Zusammenbau

Die Fertigung der einzelnen Bestandteile fand in den Werkstätten des Institutes für Fertigungstechnik und Photonische Technologien statt. Eine Übersichtsaufnahme aller Einzelteile, mit Referenznummern gekennzeichnet, ist in Abbildung 60 zu sehen. Zusätzlich enthält Tabelle 8 eine Stückliste mit Anzahl und Beschreibung dieser Einzelteile.

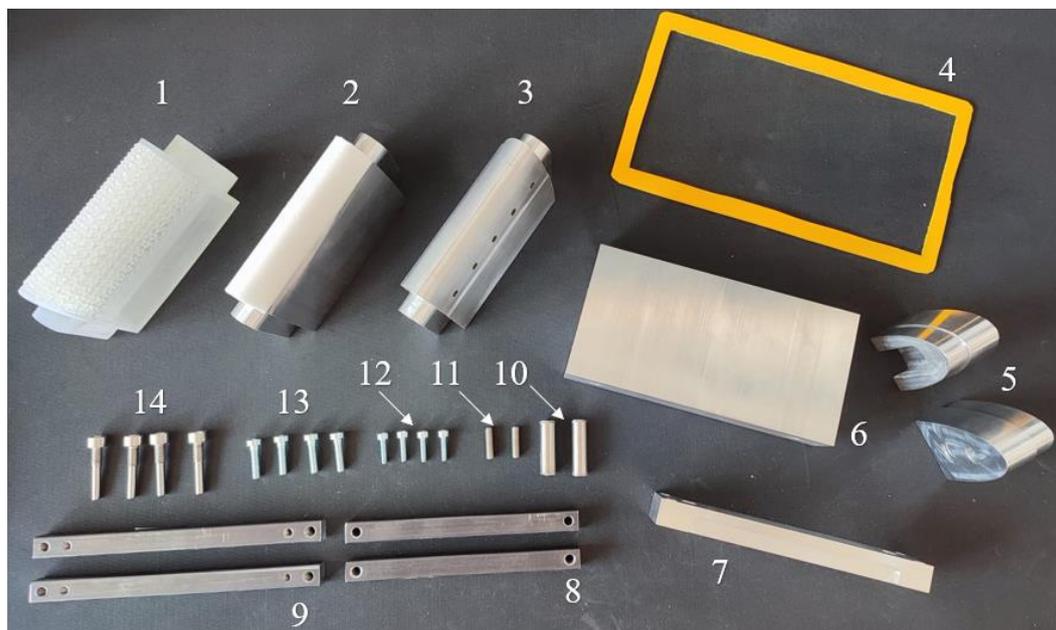


Abbildung 60 Einzelteile für Zusammenbau

Referenz	Anzahl	Beschreibung
1	1	Microlattice-Kern
2	1	Poroplast-Kern
3	1	TKS-Kern
4	1	Schablone Flachdichtung
5	2	Rippen
6	1	Endteil
7	1	Verbindungsteil
8	2	Klemme Teil 1
9	2	Klemme Teil 2
10	2	Passstifte, 8 mm x 27 mm
11	2	Wurmschrauben, M3 x 15 mm
12	4	Zylinderkopfschrauben, M3 x 10 mm
13	4	Zylinderkopfschrauben, M4 x 15 mm
14	4	Abdrückschrauben M5 x 22.5 mm

Tabelle 8 Stückliste Tragflächenprüfstand

Im Folgenden sind die wichtigsten Montageschritte chronologisch erklärt.

Als erstes wurde der gewählte Kern für den Versuchsaufbau in die Rippen eingelegt. Auf Abbildung 61 ist dies mithilfe des Poroplast-Kerns veranschaulicht.

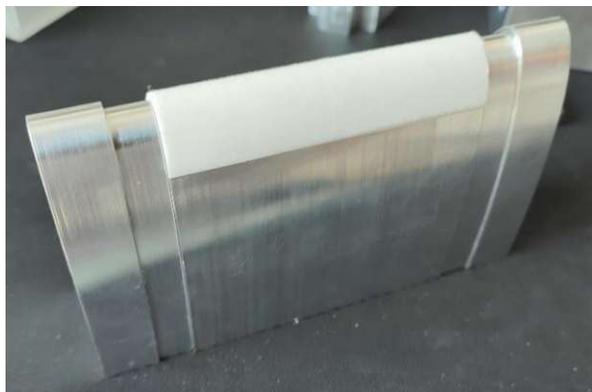


Abbildung 61 Einlegen des Kernkörpers in die Rippen

Im nächsten Schritt wurde das Verbindungsteil mittels vier Schrauben (siehe Referenznummer 12 in Tabelle 8) von hinten verschraubt. Hierfür bot es sich an, wie in Abbildung 62 zu sehen, den Körper auf die Seite zu legen, und die diagonal liegenden Schrauben nacheinander festzuziehen.

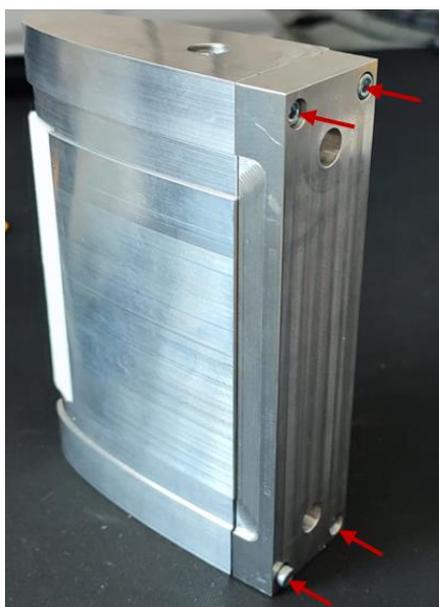


Abbildung 62 Anschrauben Verbindungsteil

Nach dem Verschrauben wurden die Passstifte in das Verbindungsteil eingesteckt und das Endteil darauf montiert. Auf Abbildung 63 ist zu sehen, wo genau die Wurmschrauben angebracht wurden. Um die Klemmung durch diese zu gewährleisten, wurden die Wurmschrauben im aufgestellten Zustand des Körpers montiert, wodurch das Eigengewicht des Kerns und der Rippen eine flächige Auflage vom Verbindungsteil auf dem Endteil gewährleistet.

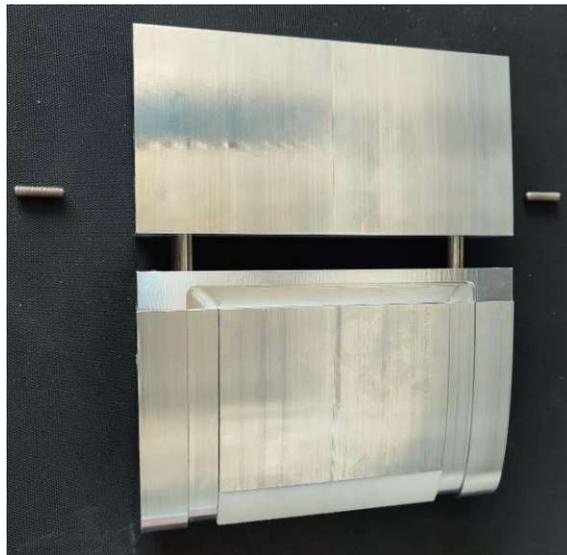


Abbildung 63 Verbinden des Endteils mit dem Verbindungsteil

Die beiden Teile der Klemmen wurden jeweils mit zwei Zylinderkopfschrauben (siehe Referenznummer 14, Tabelle 8) an den inneren Bohrungen miteinander verschraubt, wie in Abbildung 64 dargestellt.



Abbildung 64 Montage Klemmen

Für die äußeren Bohrungen des unteren Klemmenteils wurden speziell angefertigte Abdrückschrauben verwendet. Nach dem Einstecken der Klemmen wurden zuletzt die Flachdichtung und der Einschraubstutzen am Tragflächenprüfstand montiert. Eine Aufnahme des fertigen Zusammenbaus ist in Abbildung 65 zu sehen. Sowohl für die Flachdichtung als auch für das zu testende Blech waren spezielle Maße nötig, um sie am Prüfstand anbringen zu können. Diese Vorgaben sind in Abbildung 66 zu sehen. In Anhang A sind alle technischen Zeichnungen für die Fertigung zusammengefasst.

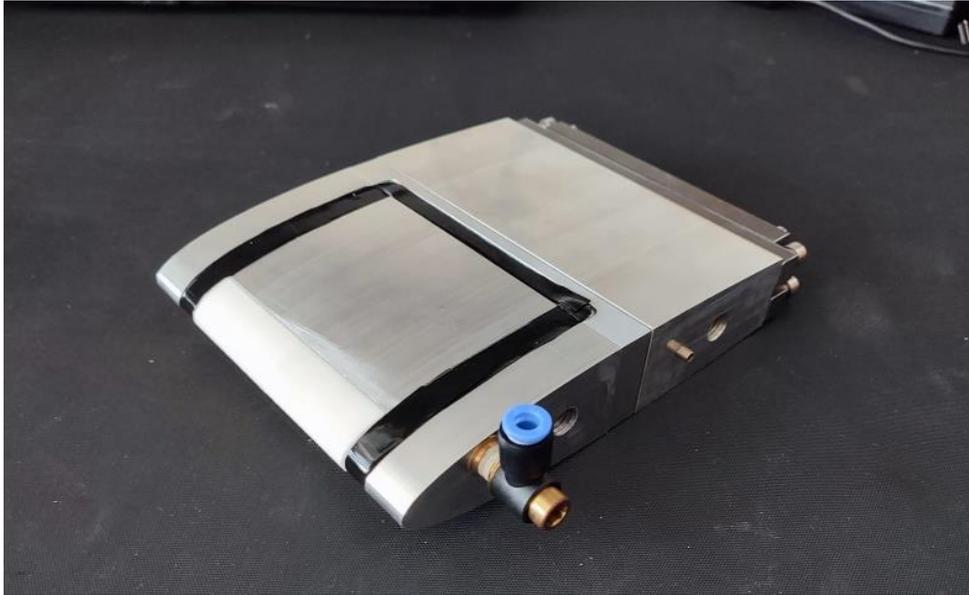


Abbildung 65 Fertiger Tragflächenprüfstand mit eingelegter Flachdichtung und Einschraubstutzen ohne eingespanntes Blech

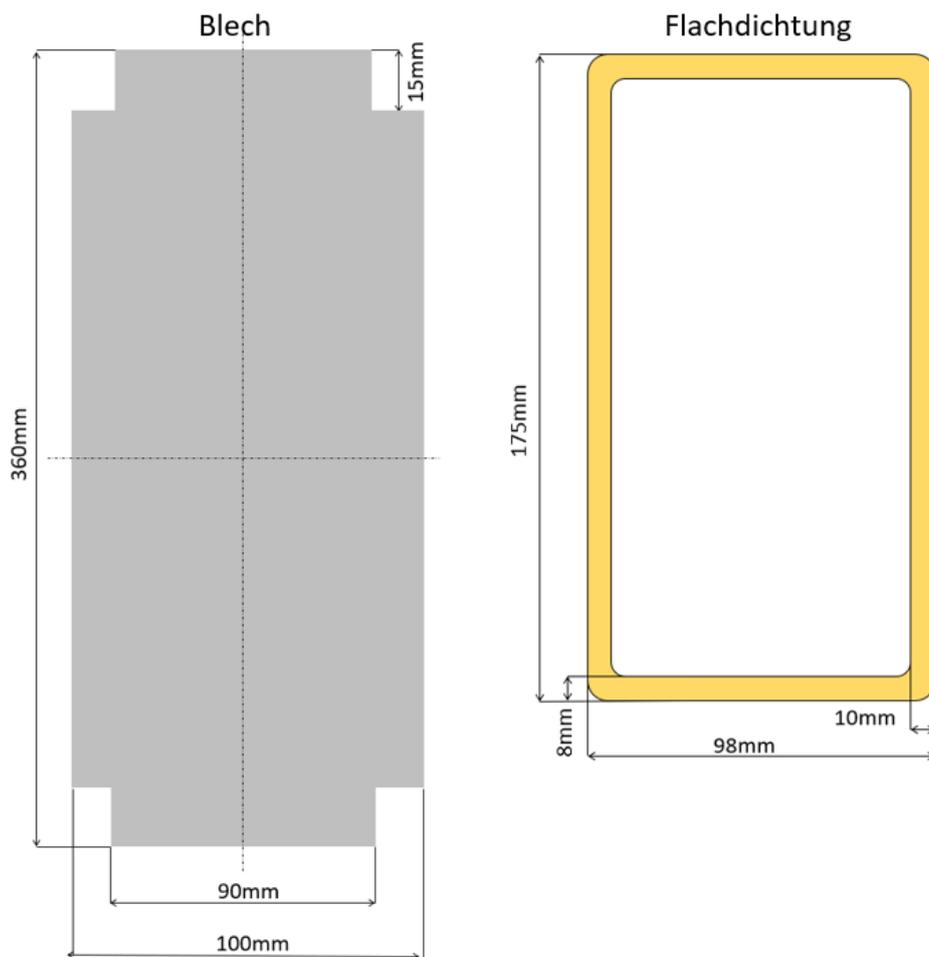


Abbildung 66 Abmessungen Blech und Flachdichtung

4.3.5 Einbau in den Klima-Windkanal

Um den Tragflächenprüfstand im Windkanal des Laserlabors zu implementieren, war eine weitere selbstgebaute Konstruktion erforderlich. Diese bestand aus einer Grundplatte und vier symmetrisch seitlich angeschraubten Stehern, in die der Tragflächenprüfstand mithilfe von M10 Gewindestangen eingelegt wurde. Diese Stangen wurden außen an den Stehern mit Muttern gesichert und konnten bei Bedarf innen mit Unterlegscheiben verstärkt werden. Da ein verstellbarer Anstellwinkel erforderlich war, um verschiedene Flugphasen simulieren zu können, wurden Berechnungen durchgeführt, um die genauen Abmessungen und Geometrien der Teile zu bestimmen. Anstatt ein 3D-Programm wie Inventor zu verwenden, wurden die Konstruktion und Zeichnungen manuell erstellt, um ein Gefühl für die Proportionen und Größen zu bekommen. Für den Bereich des Anstellwinkels wurden Winkel von 25° für den Steigflug und -5° für den Landeanflug gewählt. Diese Werte entsprechen in etwa den Anstellwinkeln, die bei gewöhnlichen Passagierflugzeugen im Flugverlauf vorkommen. Mit diesen Winkeln wurden die benötigten Höhen- und Breitenmaße der Stützen berechnet. Abbildung 67 veranschaulicht die Geometriebestimmung.

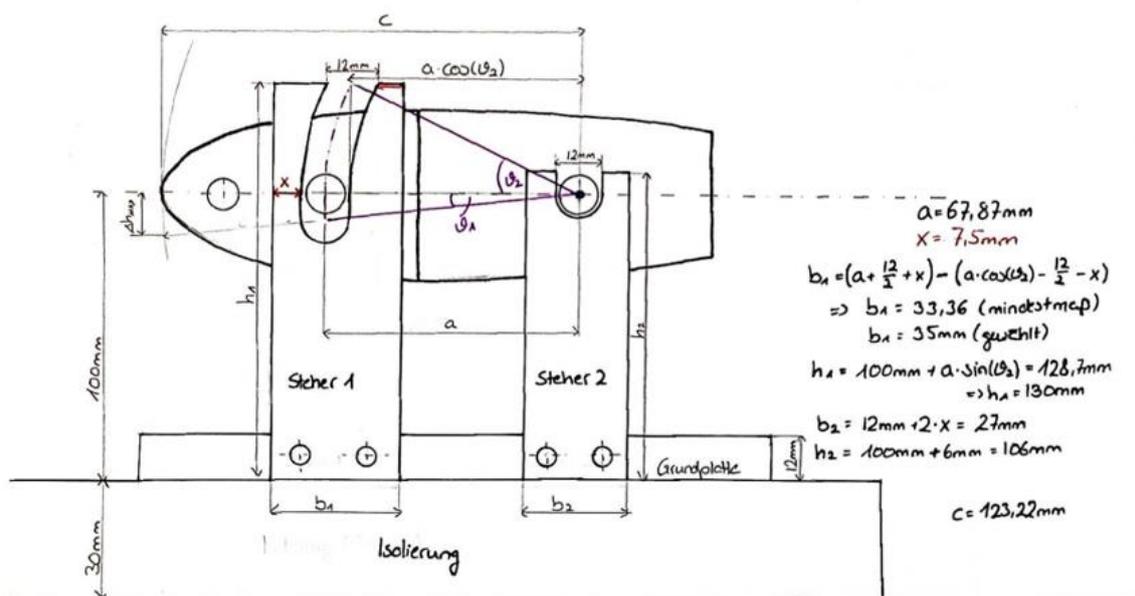


Abbildung 67 Geometriebestimmung für die Halterung im Klima-Windkanal

Die Abmessungen der Grundplatte wurden basierend auf der Breite des Tragflächenprüfstands und dem verfügbaren Raum in Testsektion des Klima-Windkanals festgelegt. Die Stützen wurden im mittleren Bereich der Grundplatte platziert, um die Möglichkeit zu erhalten, bei Bedarf auf dem hinteren Teil zusätzliche Befestigungen für zukünftige Prüfstände anzubringen. In Abbildung 68 der fertige Zusammenbau zu sehen.

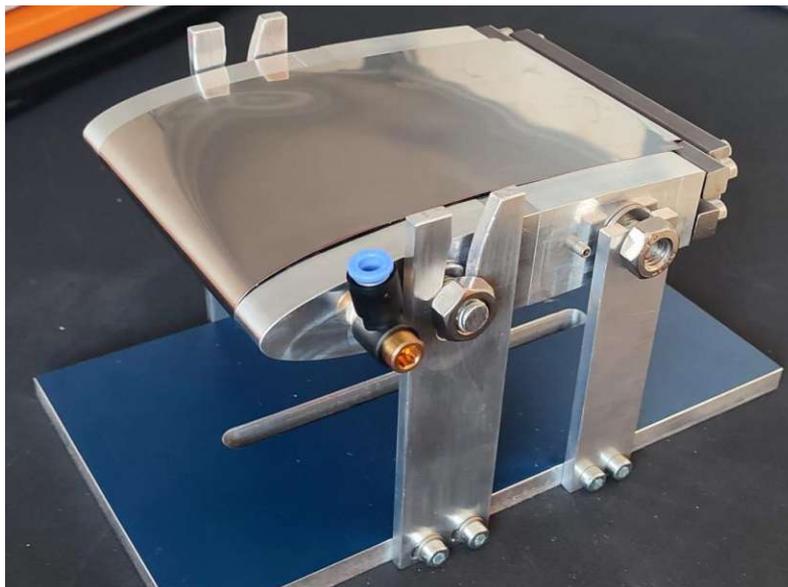


Abbildung 68 Eingebauter Tragflächenprüfstand mit eingespanntem Blech angebracht in der Halterung für den Klima-Windkanal

4.4 Optische Mikroskopie

4.4.1 Reichert Zetopan Mikroskop

Zur visuellen Inspektion der Proben wurde das vorhandene Mikroskop verwendet. An das Monokular wurde eine Nikon D90 Spiegelreflexkamera angeschlossen, welche mit einem PC verbunden war. Dies ermöglichte Aufnahmen und die Echtzeit-Anzeige der Oberfläche bei verschiedenen Vergrößerungsstufen. Das Mikroskop diente somit als erstes Einschätzungsinstrument zur Analyse der Probenoberflächen und Perforierungen.



Abbildung 69 Mikroskop Reichert Zetopan mit angeschlossener Kamera Nikon D90

4.4.2 Zeiss AxioImager Mikroskop

Zur Bewertung der Qualität der Perforierungen und zur Sicherstellung ihrer durchgängigen und gleichmäßigen Verteilung auf dem Blech wurden mikroskopische Untersuchungen unter Gegenlicht durchgeführt. Das Zeiss AxioImager Mikroskop erwies sich hierfür als ideales Instrument, da es eine breite Palette von Einstellungsmöglichkeiten bietet, darunter auch Hell- und Dunkelfeldaufnahmen. Besonders die Kombination aus Dunkelfeld und Gegenlicht wurde genutzt, um die kleinen Perforierungen im Blech möglichst deutlich abzubilden.



Abbildung 70 Zeiss AxioImager Mikroskop

4.5 Kontakt- und Abrollwinkelmessung

Durch die Modifikation von Oberflächen können sowohl der Kontakt- als auch der Abrollwinkel erheblich verändert werden. Um die Benetzungseigenschaften der strukturierten Oberflächen als auch der später hergestellten SLIPS zu beurteilen, wurden mehrere Versuchsreihen zur Bestimmung der Kontakt- und Abrollwinkel durchgeführt. Die Messungen wurden dabei mithilfe des Contact Angle Systems OCA der Firma DataPhysics realisiert. Mithilfe der dazugehörigen Software konnte der entstehende Kontaktwinkel zwischen aufgebrachtem destilliertem Wasser und der Oberfläche gemessen werden. Für die Bestimmung des Abrollwinkels verfügt das System zusätzlich über eine eingebaute Neigungseinheit (Tilting Unit), mit der die gesamte Apparatur um bis zu 90° geneigt werden kann.

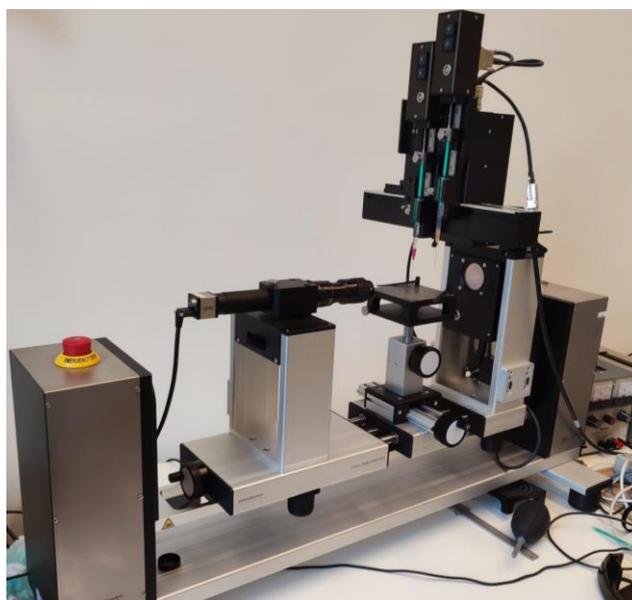


Abbildung 71 Kontaktwinkelmessgerät mit Neigungseinheit

4.6 Klima-Windkanal

Für die Vereisungsmessungen sowie die Messung zur Speicherfähigkeit der Strukturen wurden in einem Klima-Windkanal Versuche durchgeführt. Dieser besteht aus Kanalgrundrohren, aus denen zwei Kreisläufe gebildet werden. Der Kühlkanal wird dabei von Gefrierschränken gekühlt und entzieht dem Klima-Windkanal über einen Wärmetauscher die Wärme. Die Strömung wird durch einen Impeller-Antrieb erzeugt, während der Kühlkanal von einem Axiallüfter betrieben wird. Die Proben wurden mithilfe von Halterungen in der Testsektion montiert.

Die Vereisung wurde über eine Wasserzufuhr an einer Zerstäuber Düse eingeleitet. Eine zentrale Steuereinheit ermöglicht die Bedienung des Klima-Windkanals, wodurch Versuchsparameter wie Temperatur, Windgeschwindigkeit und Einspritzung reguliert werden konnten [77].

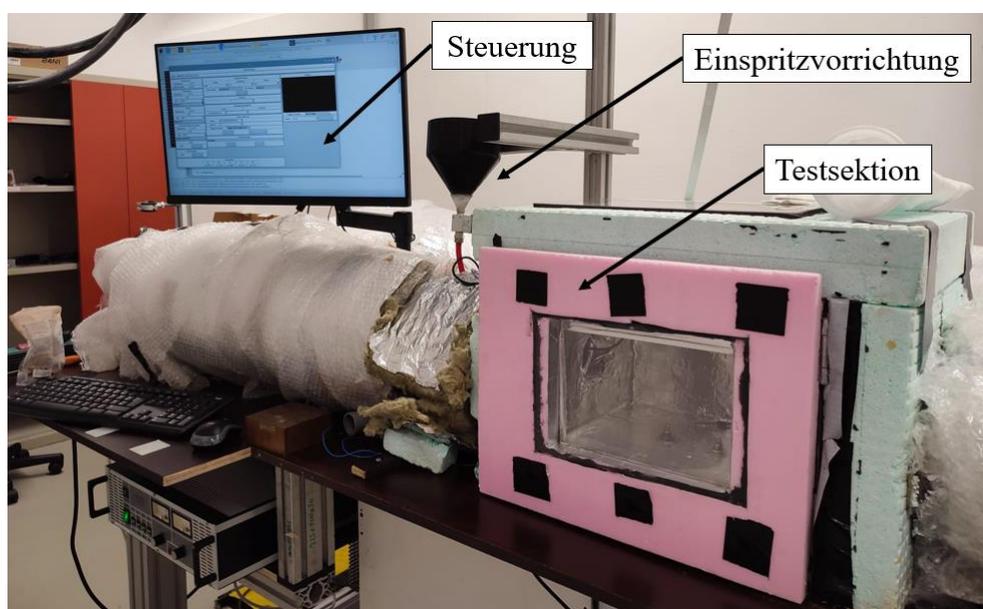


Abbildung 72 Wesentliche Bestandteile des Klima-Windkanals

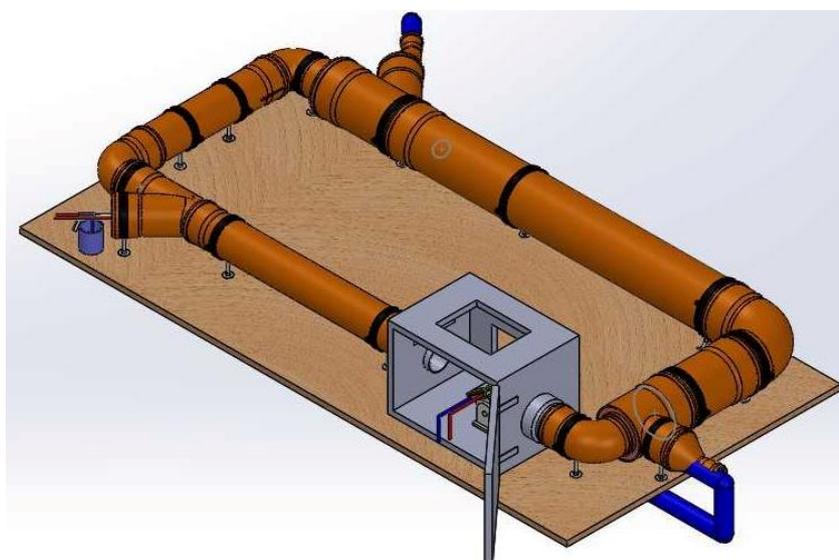


Abbildung 73 Schematischer Aufbau des Klima-Windkanals

5 Experimenteller Teil

Der experimentelle Teil der Arbeit widmet sich der Herstellung und Prüfung der Blechproben. Für alle Oberflächenmodifikationen wurden Zuschnitte mit einer Dicke von 50 μm verwendet, wobei jedoch je nach Versuch und Versuchsaufbau unterschiedliche Abmessungen der Bleche eingesetzt wurden. Vor diesem Hintergrund geht dieses Kapitel detailliert auf die genaue Vorgehensweise und die erzielten Ergebnisse ein.

5.1 Erzeugung von Perforierungen

Um das Öl von hinten auf die strukturierte Oberfläche zu transportieren, wurden durch den Femtosekundenlaser, siehe Kapitel 4.1, durchlässige Perforationen in die Bleche eingearbeitet. Dieser Ansatz ist neu, daher mussten zuerst die Prozessparameter ermittelt werden, die eine durchgehende Perforierung ermöglichen, ohne das Material dabei zu stark zu beschädigen.

5.1.1 Bestimmung der Perforationsparameter

Um diese passenden Parameter zu ermitteln, wurde zunächst eine Testmatrix erstellt. In dieser wurden die kritischen Einflussgrößen, genauer gesagt die Pulsanzahl (die Anzahl der auf eine Stelle treffenden Laserpulse) und die Hatch-Größe (der Abstand zwischen den einzelnen Perforierungen), variiert. Dafür wurden jeweils 5x5 quadratische Bereiche von 4 mm² erzeugt. Die Hatch-Größe wurde entlang der x-Achse variiert, die Pulsanzahl entlang der y-Achse. Eine Veranschaulichung dieser Testmatrix ist in Abbildung 74 dargestellt.

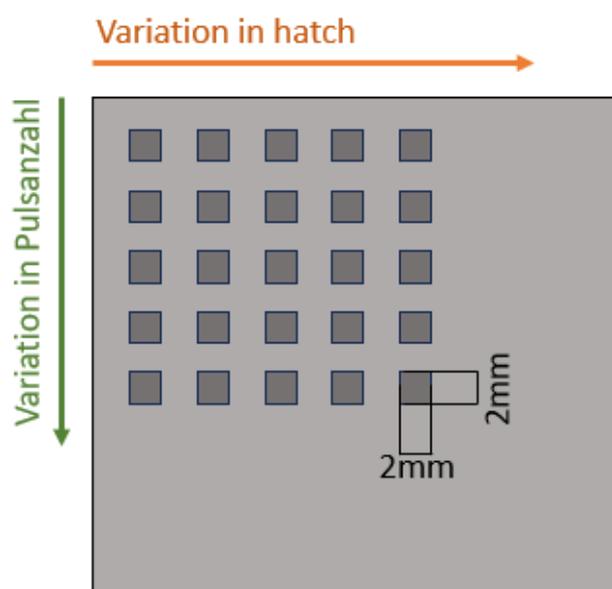


Abbildung 74 Herstellung der Test-Matrix für die Perforationen

Die erforderlichen Zeiten pro Variation und Fläche wurden im Voraus mithilfe der Hatch-Größe und der Pulsanzahl berechnet, um eine bessere Abschätzung der Dauer zu bekommen. Je kleiner die Hatch-Größe, desto mehr Perforierungen auf einer Fläche werden hergestellt. Je höher die Pulsanzahl, desto höher ist der Energieeintrag in das Material und der zeitliche Aufwand.

Alle Perforationen wurden mit einer durchschnittlichen Laserleistung von 250 mW durchgeführt. Das entsprechende Programm für die Testmatrix sowie alle folgenden Bearbeitungen wurden mithilfe der Software CIMCO Edit erstellt. Anschließend wurden die einzelnen Bereiche unter dem Lichtmikroskop (siehe Kapitel 4.4.1) untersucht, um eine erste Abschätzung vorzunehmen. Die in Abbildung 75 zusammengefassten Aufnahmen wurden mit einer 50-fachen Vergrößerung aufgenommen. Die Bereiche, in denen die Perforierungen die Probenoberfläche einerseits nicht zu stark beschädigt hatten, und bei denen andererseits mit dem bloßen Auge Lichtdurchlässigkeit erkennbar war, sind grün markiert. Zusätzlich gab es Bereiche, in denen die Struktur ungleichmäßig oder zu dicht perforiert wurde (gelb markiert), sowie Bereiche, in denen die Struktur zerstört oder keine durchgängigen Löcher erzeugt werden konnten (rot markiert).

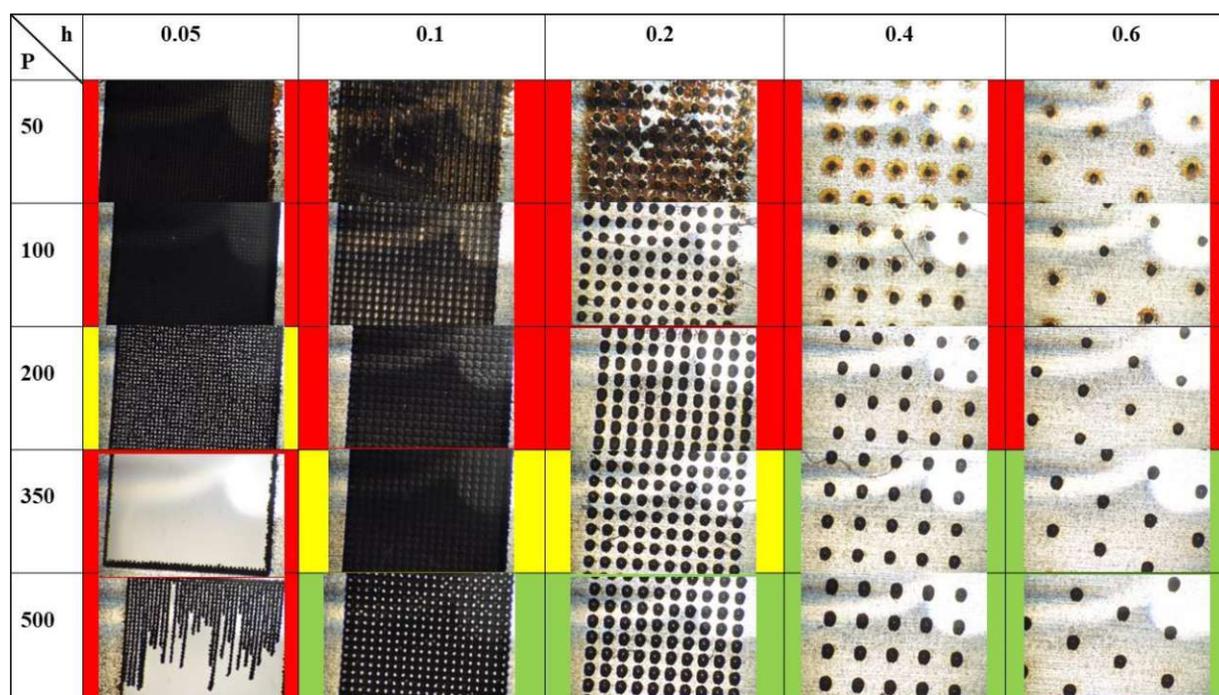


Abbildung 75 Perforationsmatrix

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig anzumerken, dass eine unvollständige Perforation neben einer zu niedrigen Pulsanzahl oder zu geringen Laserleistung auch andere Gründe haben kann. Zum Beispiel könnte das Blech nicht komplett eben aufgelegt oder nicht in der Brennebene des fokussierten Laserstrahls gelegen haben, oder es ein Leistungsabfall während der Bearbeitung aufgetreten sein.

Basierend auf diesen ersten Erkenntnissen wurde entschieden, weitere Perforierungen mit den Parametern gemäß Tabelle 9 auf insgesamt 50 x 50 mm großen Blechen durchzuführen und diese anschließend mit einem speziellen Durchlichtmikroskop genauer zu untersuchen. In besagter Tabelle finden sich auch Notationen, um die nachfolgenden Aufnahmen einheitlich zu betiteln. Dabei steht H für die Hatch-Größe und P für die Pulsanzahl. Darüber hinaus wurden mit den hergestellten Proben auch erste Versuche zur Durchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten durchgeführt. Die Fläche, auf der sich die Perforierungen befinden, beträgt dabei 40 x 40 mm, um eine Einspannung bei den weiteren Untersuchungen zu ermöglichen.

Hatch [mm]	Leistung [mW]	Anzahl der Pulse	Bezeichnung
0.4	250	500	H0.4P500
0.5	250	500	H0.5P500
0.6	250	350	H0.6P350

Tabelle 9 Zusammenfassung Perforationssparameter und Notation für die Durchlichtmikroskopie

5.1.2 Untersuchungen am Lichtmikroskop

Für eine höhere Auflösung und die Integration von Gegenlicht wurden weitere Untersuchungen am Lichtmikroskop AxioImager von Zeiss durchgeführt, welches in Kapitel 4.4.2 beschrieben ist. Dabei wurden Aufnahmen im Dunkelfeld mit 50-facher Vergrößerung und Gegenlicht gemacht, um die Lichtdurchlässigkeit zu evaluieren. Auf allen weiteren Abbildungen sind die jeweiligen Aufnahmen pro Variation nochmals im direkten Vergleich zu sehen, sowohl im Hellfeld als auch im Dunkelfeld.

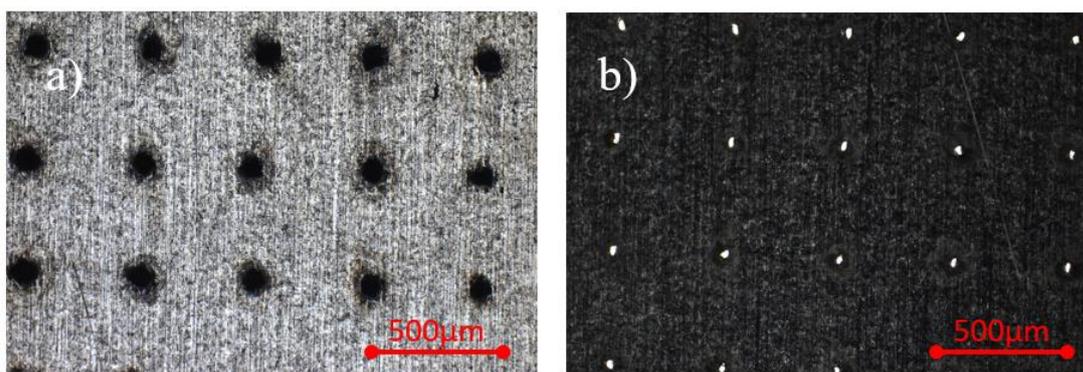


Abbildung 76 Aufnahmen der Perforierungen H0.4P500 im a) Hellfeld und b) Dunkelfeld mit Gegenlicht

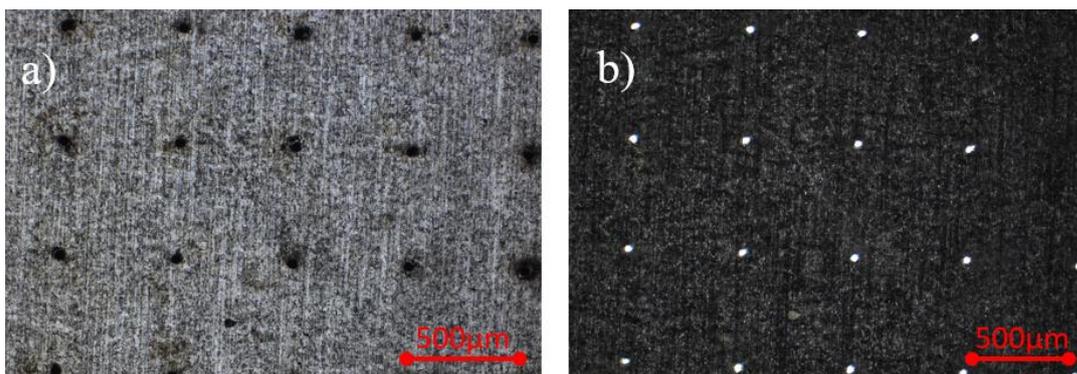


Abbildung 77 Aufnahmen der Perforierungen H0.5P500 im a) Hellfeld und b) Dunkelfeld mit Gegenlicht

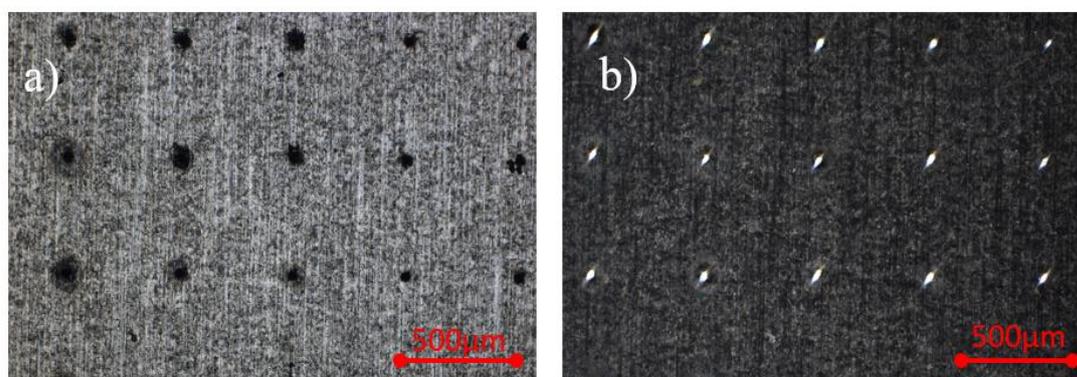


Abbildung 78 Aufnahmen der Perforierungen H0.6P350 im a) Hellfeld und b) Dunkelfeld mit Gegenlicht

Alle hergestellten Proben zeigten, dass die Perforierung gleichmäßig und durchlässig hergestellt werden konnte. Im nächsten Schritt wurde daher der Fokus daraufgelegt, wie gut Fluid durch eben diese perforierten Bleche gefördert werden kann. Basierend auf diesen Ergebnissen zeigte sich, dass eine Pulsanzahl von 350 pro Perforierung bereits ausreicht, um eine durchgängige und gleichmäßige Bohrung zu erreichen. Ein Unterschied in der Hatch-Größe ist bei den Aufnahmen kaum erkennbar, was aber auch auf die geringe Varianz der Werte zurückzuführen ist. In den weiteren Versuchen zur Durchlässigkeit wurde evaluiert, welche maximale Hatch-Größe für eine flächige Verteilung von Fluid auf der Oberfläche ausreicht, um die Bearbeitung so schnell und effizient wie möglich zu gestalten.

5.1.3 Versuche zur Durchlässigkeit und Verteilung von Fluiden

Um die Durchlässigkeit der Perforierungen für Fluide sowie den erforderlichen Druck für die Fluidförderung zu bestimmen, wurde der Versuchsaufbau verwendet, wie er in Kapitel 4.2.2 zu sehen ist. Dieser verfügte über einen seitlichen Anschluss, mit dem Druckluft in das Ölreservoir geleitet wird, welche das dort lagernde Silikonöl gemäß Tabelle 2, nach oben durch die Perforierungen drückte. Eine Aufnahme des eingespannten Versuchsaufbaus mit Druckluftzufuhr ist in Abbildung 79 zu sehen. Um eine gleichmäßige Verteilung unter dem Blech zu gewährleisten, wurde das bereits erprobte Poroplast-Material als Zwischenspeicher verwendet. Das zu testende Blech wurde daher über diesem mittels der Abdeckung eingespannt, und im nächsten Schritt Luftdruck appliziert.

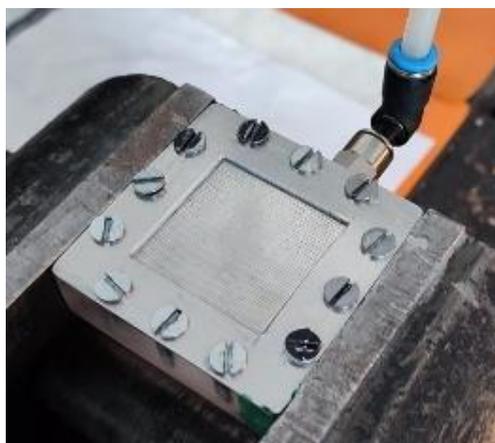


Abbildung 79 Verteilung des Silikonöls durch die Perforierungen im Blech

Der gleiche Versuch wurde mit allen drei Perforationsvariationen durchgeführt, wie in Tabelle 11 zu sehen ist. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse für den erforderlichen Druck und die Verteilung abgebildet. Der Druck wurde dafür direkt an der Druckluftzufuhr abgelesen und die Verteilung visuell und qualitativ beurteilt.

Variation	Erforderlicher Druck	Verteilung
H0.4P500	>1 bar	Gleichmäßig
H0.5P500	>1 bar	Gleichmäßig
H0.6P350	>1 bar	Gleichmäßig

Tabelle 10 Erforderlicher Druck zur Förderung und Verteilung des Silikonöls ermittelt an den perforierten Blechen

Die Versuche zeigten, dass sich bereits ohne Applizieren von externem Druck eine feine, gleichmäßige Ölschicht ausbildet, was darauf hinweist, dass die Perforierungen das Öl durch den Kapillareffekt sehr gut transportieren. Außerdem wurde durch das Anlegen eines geringen Drucks eine stetige Ölförderung erreicht. Bei der ersten Variation wurde festgestellt, dass bei zu hohem Druck (ab etwa 1.5 bar) das Blech leicht deformiert wurde. Es wurde außerdem beschlossen, die Hatch-Größe auf 1.0 mm zu

erhöhen, da erstens kein signifikanter Unterschied in der Verteilung oder dem erforderlichen Druck in Abhängigkeit von der Hatch-Größe festgestellt wurde, und zweitens in allen Versuchen mehr als ausreichend Fluid auf der Struktur vorhanden war. Daher wurde für alle weiteren Versuche, in denen eine Fluidförderung nötig war, die Hatch-Größe 1.0 mm gewählt.

5.2 Vorversuche zu den Oberflächenstrukturen

5.2.1 Fertigung der strukturierten Oberflächen

Auch die Strukturierung der Blechproben erfolgte mittels des Femtosekundenlasers, wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Es wurden insgesamt drei verschiedene Strukturen erzeugt, deren Bearbeitungsparameter der Laserstrukturierung in Tabelle 11 zusammengefasst sind.

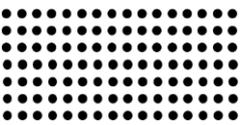
Struktur-Referenz	Typ	Muster	Bahnbreite [μm]	Pulsanzahl	Mittlere Leistung [mW]
1	DIMPLES		50	20	200
2	LINIEN		50	350	250
3	LIPSS		160	350	200

Tabelle 11 Bearbeitungsparameter der hergestellten Oberflächenstrukturen mittels Femtosekundenlaser

Aufgrund der höheren Leistung bei geringerer Bahnbreite ist der Energieeintrag in die Blechproben bei der DIMPLES- und LINIEN-Struktur am höchsten. Die Strukturierung erfolgte hier mittels DLA, siehe Kapitel 3.2.1, direkt im Fokus des Laserstrahls, was eine tiefere und rauere Struktur zur Folge hatte. Bei diesen Strukturen neigten die Blechproben außerdem dazu, sich aufzurollen, da der thermische Energieeintrag in das Material zum Aufbau von Eigenspannungen führte. Deshalb wurden die Blechproben zusätzlich mit doppelseitigem Klebeband von hinten fixiert, um die Strukturen möglichst gleichmäßig aufzubringen. Aufgrund der langen Bearbeitungszeit, insbesondere bei den DIMPLES-Strukturen durch die geringen Bahnbreite, wurde die Laserleistung während der Bearbeitung regelmäßig kontrolliert. Da die Herstellung der LIPSS nicht im Fokus erfolgt, musste vor der Bearbeitung die Verfahrensanlage, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, in der z-Achse um 0.2 mm verschoben werden.

Im Anschluss wurden die Bleche mit einer Laserleistung von 250 mW perforiert. Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche wurden diese, wie bereits beschrieben, mit einer Hatch-Größe von 1.0 mm und einer Pulsanzahl von 350 hergestellt. Die Bleche wurden anschließend im Ultraschallbad gereinigt und in Plastiktüten verpackt. Ansonsten fand keine weitere Nachbehandlung statt.

5.2.2 Evaluierung des Speichervermögens der Oberflächenstrukturen

Das Ziel dieser Versuche war es, das Speichervermögen von Silikonöl in den strukturierten Oberflächen durch Anströmversuche, gemäß der in Tabelle 2 angegebenen Werte, zu evaluieren. Diese Untersuchungen dienen dazu, eine Abschätzung darüber zu erhalten, wie dauerhaft und beständig die erzeugten SLIPS-Oberfläche gegenüber hohen Staudrücke und turbulenter Strömungen durch Anströmung sind, und ob sich die jeweilige Struktur grundsätzlich für die Herstellung von beständigen SLIPS eignet.

Um zunächst eine Referenz für die Unterschiede zwischen einer unbenetzten und benetzten Oberfläche mit Silikonöl zu erhalten, wurde eine nicht perforierte LINIEN-Struktur zur Hälfte mit 0.1 ml Silikonöl benetzt, und das Fluid vorsichtig mit einem Blasebalg verteilt. Anschließend wurden in den verschiedenen Bereichen der Probe Aufnahmen unter dem Lichtmikroskop gemacht. Diese Aufnahmen sind in Abbildung 80 zu sehen und dienen als Referenz zum Erkennen von benetzten, teilbenetzten und unbenetzten (trockenen) Bereichen.

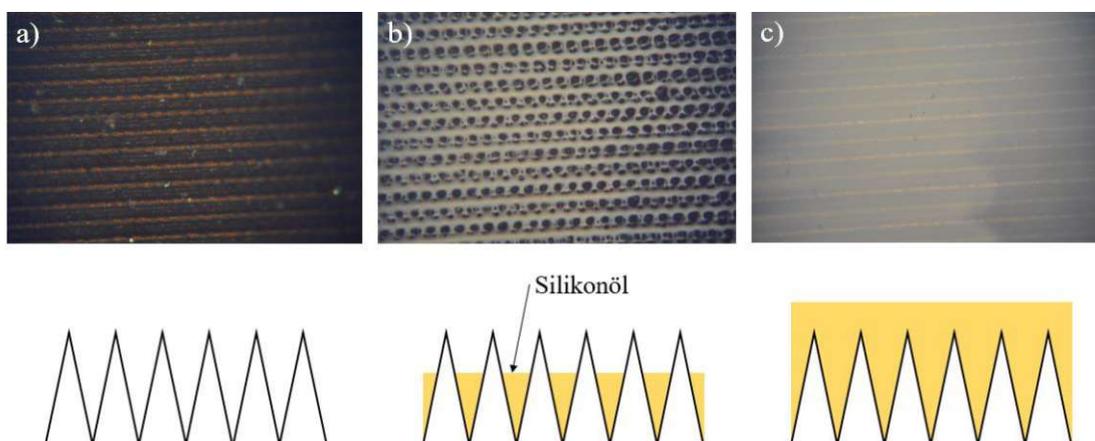


Abbildung 80 Benetzungsreferenz von Silikon-Öl auf einer LINIEN Oberflächen-Struktur ohne Perforierungen im a) unbenetzten, b) teilbenetzten, und c) benetzten Zustand

Für die eigentlichen Anströmversuche wurde eine definierte Menge von 0.2 ml Silikonöl auf die jeweilige Oberflächenstruktur aufgetragen und auch hier, aufgrund der hohen Viskosität des Fluids, vorsichtig mit einem Blasebalg verteilt. Die Probe wurde im Anschluss in den Versuchsaufbau, beschrieben in Kapitel 4.2.2, eingespannt und im Klima-Windkanal mittels der Halterung, beschrieben in Kapitel 4.2.2.1, fixiert. Abbildung 81 zeigt den Versuchsaufbau im Klima-Windkanal mit eingebautem Blech. Im nächsten Schritt wurden die benetzten Oberflächen einer Windgeschwindigkeit von etwa 106 km/h für eine definierte Zeit ausgesetzt. Die genauen Parameter für die Anströmversuche sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

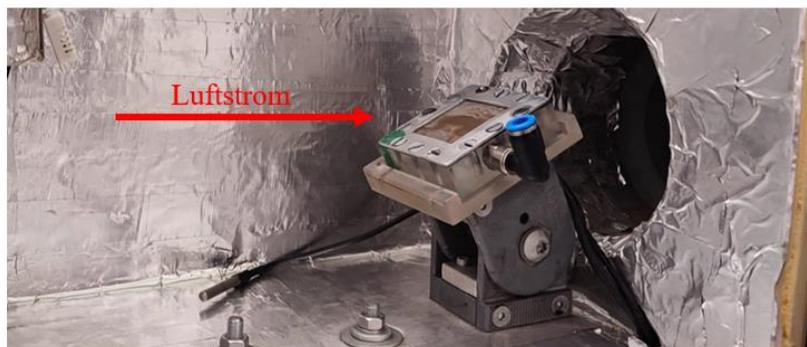


Abbildung 81 Eingebauter Versuchsaufbau für die Anströmversuche im Klima-Windkanal

Windgeschwindigkeit	105-108 km/h
Antriebsleistung	50 %
Temperatur in der Testsektion	0 bis -3 °C
Anströmwinkel	30.0 °
Anströmdauer	100 s

Tabelle 12 Parameter für den Klima-Windkanal während der Anströmversuche

Anschließend wurde eine Untersuchung unter dem Lichtmikroskop durchgeführt, um festzustellen, ob die Struktur das Fluid hält oder ob dieses aufgrund der Scherkräfte abgetragen wurde. Mit den drei verschiedenen Strukturen wurden dabei sich grundlegend unterscheidende Ergebnisse erzielt.

Die DIMPLES-Struktur konnte das Silikonöl nachweislich sehr gut speichern, da nach dem Anströmversuch keinerlei Veränderungen in der Benetzung erkennbar waren. Die einzigen Unterschiede zum ursprünglichen Zustand waren Verunreinigungen aus dem Klima-Windkanal, die auf dem Öl hafteten. Diese Problematik trat fortlaufend trotz dem mehrmaligen gründlichen Reinigen des Klima-Windkanals durch mehrere Filterstufen auf, hatte aber hier speziell bei dieser Struktur keinen Einfluss auf den Benetzungszustand.

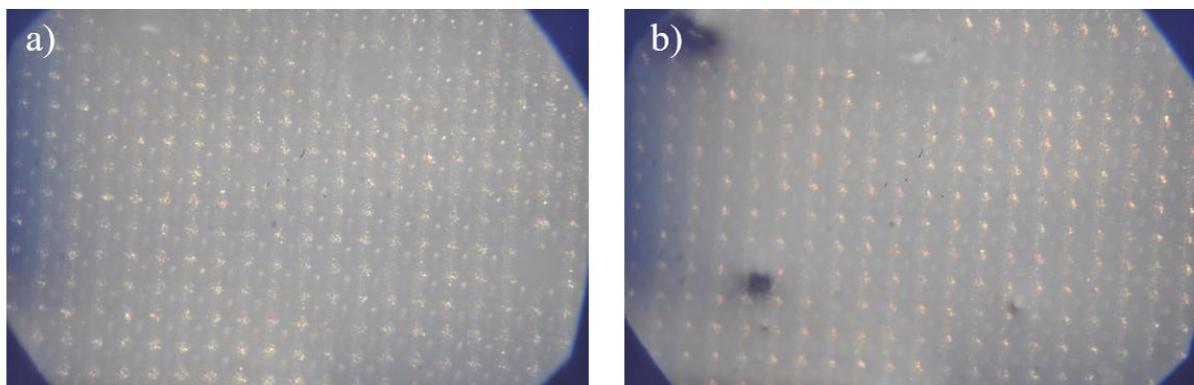


Abbildung 82 Benetzungszustände der DIMPLES-Struktur aufgenommen a) direkt nach der Benetzung und b) nach dem Anströmversuch im Klima-Windkanal

Die LINIEN-Struktur konnte das das Silikonöl weitestgehend gut halten. Nach dem Anströmversuch waren jedoch vereinzelte runde Stellen zu finden, in denen die Benetzung unterbrochen, und das Silikonöl nicht von der Struktur gehalten wurde, wie in Abbildung 83 zu sehen.

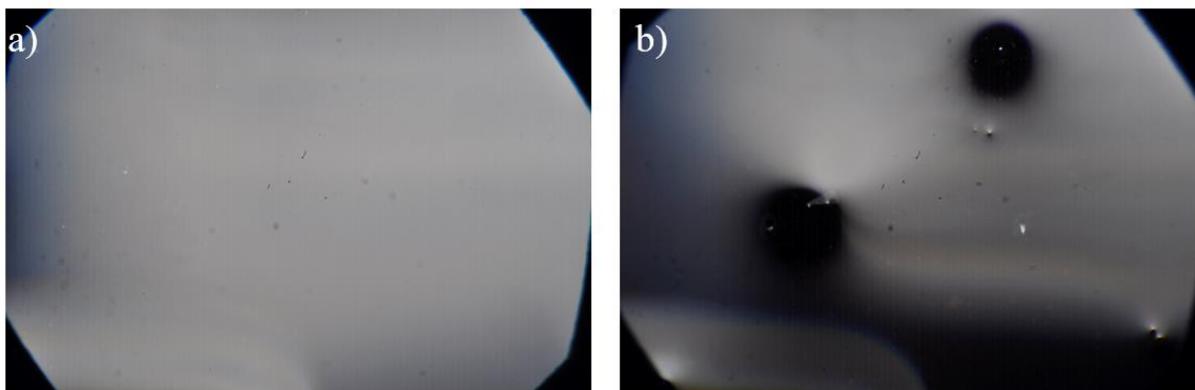


Abbildung 83 Benetzungszustände der LINIEN-Struktur aufgenommen a) direkt nach der Benetzung und b) nach dem Anströmversuch im Klima-Windkanal

Die Oberfläche mit der LIPSS-Struktur konnte das Fluid am wenigsten halten. Schon direkt beim Benetzen trat Öl durch die Perforierungen aus, was bei den vorherigen Untersuchungen der anderen Strukturen nicht zu beobachten war. Darüber hinaus waren die Bereiche um die Strukturen herum nur sehr schwach benetzt, wie in Abbildung 84 klar zu erkennen ist. Nach dem Anströmversuch wurden große unbenetzte Flecken in der Aufnahme sichtbar, wo das Silikonöl vollständig abgetragen wurde. Die Ergebnisse lassen sich durch die aufgrund der verschiedenen Herstellungsverfahren deutlichen Unterschiede in der Strukturtiefe der Oberflächen erklären.

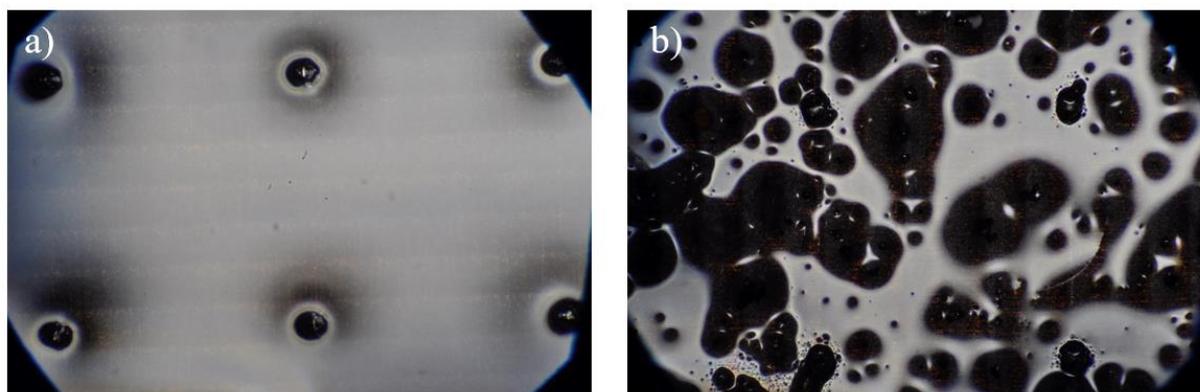


Abbildung 84 Benetzungszustände der LIPSS-Struktur aufgenommen a) direkt nach der Benetzung und b) nach dem Anströmversuch in Klima-Windkanal

Proben, die im Fokus (siehe oben) hergestellt wurden, besitzen demnach eine rauere Oberfläche im Vergleich zu den LIPSS-Strukturen, was das Speichern und Halten von Fluiden erleichtert. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wurden in den abschließenden Vereisungsversuchen nur Oberflächen mit DIMPLES-Struktur berücksichtigt. Dies begründet sich darin, dass die SLIPS auf dieser Oberfläche am besten erhalten bleiben, was auf die voraussichtlich ausgeprägtesten Unterschiede im folglich getesteten Vereisungsgrad schließen lässt.

5.2.3 Kontakt- und Abrollwinkelmessung der Probenoberfläche

An den Proben wurden zur Charakterisierung der Benetzungseigenschaften statische Kontaktwinkelmessungen und dynamische Abrollwinkelmessungen mit Hilfe des Kontaktwinkelsoniometers durchgeführt, wie in Kapitel 4.5 beschrieben. Das Ziel dieser Versuchsreihe war es, Unterschiede in den Kontakt- und Abrollwinkel sowohl zwischen den verschiedenen Strukturen als auch zwischen den verschiedenen Benetzungszuständen mit Silikonöl innerhalb der Strukturen festzustellen. Diese Messungen wurden analog zum vorherigen Versuchsaufbau an denselben Proben durchgeführt, womit sich für jede Struktur drei untersuchte Zustände ergaben. Für die Messungen im benetzten Zustand wurden wieder 0.2 ml hochviskoses Silikonöl appliziert. Zusätzlich wurden diese Untersuchungen auch an einer unstrukturierten Blechprobe, siehe Tabelle 13, durchgeführt, um einen Referenzwert zu erhalten. Um den Kontaktwinkel zu messen, wurde mithilfe einer Dosiervorrichtung ein 10 μ l-Tropfen auf die Oberfläche aufgebracht. Dieser Tropfen wurde von einer Kamera erfasst, und der Winkel anhand der Drei-Phasen-Punkte gemessen. Die Messung wurde dreimal wiederholt und der Mittelwert berechnet. Abbildung 85 zeigt dies exemplarisch für eine unbenetzte (trockene) LIPSS-Struktur.

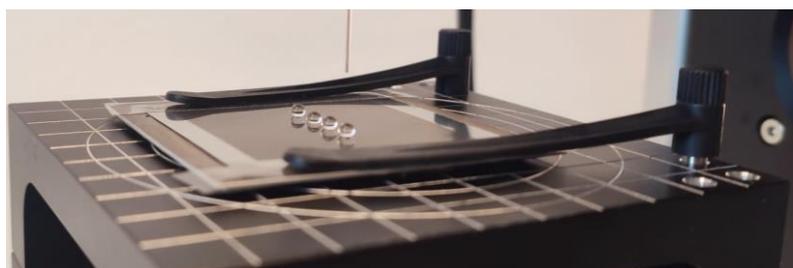


Abbildung 85 Statische Kontaktwinkelmessung an einer unbenetzten LIPSS-Struktur

Für die Messung des Abrollwinkels wurde ein Tropfenvolumen von 30 μ l auf die Oberfläche abgesetzt. Anschließend wurde die gesamte Apparatur mithilfe der Neigeeinheit gekippt, bis der Tropfen abrollte. Es gestaltete sich teilweise schwierig, den genauen Wert zu bestimmen, da die Tropfen gerade bei den benetzten Zuständen bereits sehr früh begannen, abzurollen.

Kontaktwinkel (Mittelwert)	Abrollwinkel
108.3 °	67.0 °

Tabelle 13 Referenzwerte für eine unbehandelte, unbenetzte Stahlblechprobe

In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der Messreihen und Aufnahmen der einzelnen Versuche für alle Strukturen und Benetzungszustände aufgeführt.

5.2.3.1 DIMPLES-Struktur

Auf Abbildung 86 sind zwei Messungen des Kontaktwinkels für die DIMPLES-Struktur im unbenetzten und benetzten Zustand zu sehen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 14 zusammengefasst, inklusive der Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen. Die Messungen im unbenetzten Zustand wiesen größere Abweichungen zueinander auf, während die Messungen im benetzten Zustand, sowohl vor als auch nach dem Anströmversuch, nur geringfügige Unterschiede zeigten. Insgesamt waren die Kontaktwinkel im benetzten Zustand deutlich niedriger als die im unbenetzten Zustand. Im benetzten Zustand begann der Tropfen, sowohl vor als auch nach dem Anströmversuch, sehr früh abzurollen, während er im unbenetzten Zustand fest an der Struktur haftete, und sich selbst bei einer Neigung von 90.0° nicht von der Struktur bewegte.

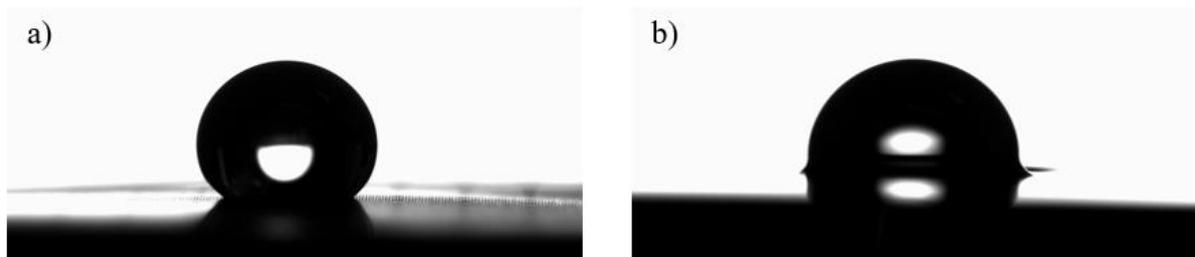


Abbildung 86 Kontaktwinkelmessung der DIMPLES-Struktur im a) unbenetzten (Messung 2) und b) benetzten Zustand (Messung 1)

Messung	Unbenetzt	Benetzt	Nach Anströmversuch
Messung des statischen Kontaktwinkels			
1	136.1 °	89.1 °	90.1 °
2	147.5 °	93.1 °	88.1 °
3	126.3 °	88.2 °	87.3 °
Mittelwert	136.6 °	90.1 °	88.5 °
Standardabweichung	8.7 °	2.1 °	1.2 °
Messung des Abrollwinkels			
1	> 90.0 °	< 5.0 °	< 5.0 °

Tabelle 14 Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung der DIMPLES Struktur in verschiedenen Benetzungszuständen

5.2.3.2 LINIEN-Struktur

Abbildung 87 zeigt zwei exemplarische Kontaktwinkelmessungen der LINIEN-Struktur. Auch hier war ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Zuständen zu erkennen, da die Benetzung der Struktur auch hier wieder zu einer deutlichen Verringerung des Kontakt- und Abrollwinkels führte. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

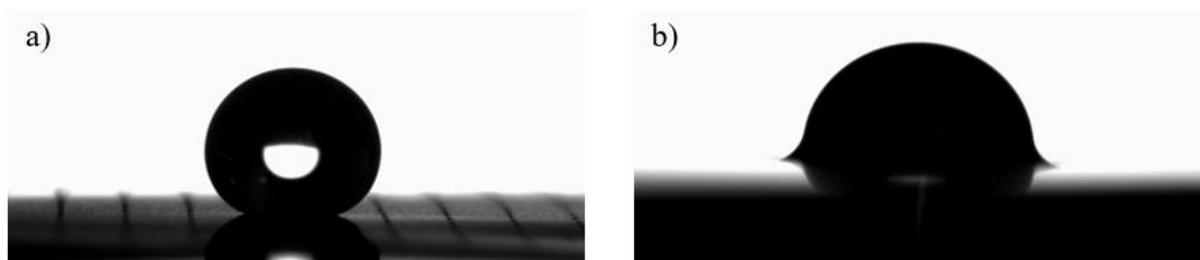


Abbildung 87 Kontaktwinkelmessung der LINIEN-Struktur im a) unbenetzten (Messung 2) und b) benetzten Zustand (Messung 2)

Messung	Unbenetzt	Benetzt	Nach Anströmversuch
Messung des statischen Kontaktwinkels			
1	158.1 °	65.8 °	90.5 °
2	157.0 °	84.6 °	79.2 °
3	146.2 °	78.3 °	88.3 °
Mittelwert	153.7 °	76.2 °	86.0 °
Standardabweichung	5.4 °	7.8 °	4.9 °
Messung des Abrollwinkels			
1	> 49.3 °	< 5.0 °	< 5.0 °

Tabelle 15 Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung der LINIEN-Struktur in verschiedenen Benetzungszuständen

5.2.3.3 LIPSS-Struktur

Die unbenetzte LIPSS-Struktur zeigte das stärkste hydrophobe Verhalten, wie auch in Abbildung 88 a) erkennbar ist. Die Abweichungen aller gemessenen Kontaktwinkel für die LIPSS-Struktur waren in allen Messungen am geringsten, wie aus den Werten für die Standardabweichung ersichtlich wird. Der Abrollwinkel war hier für die unbenetzten Strukturen mit 21.4° am niedrigsten, was auf die weniger raue und tiefere Struktur im Vergleich zu den anderen Proben zurückzuführen ist. Auch hier konnte der Abrollwinkel durch das Benetzen der Struktur auf $< 5.0^\circ$ gesenkt werden. Alle Messergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

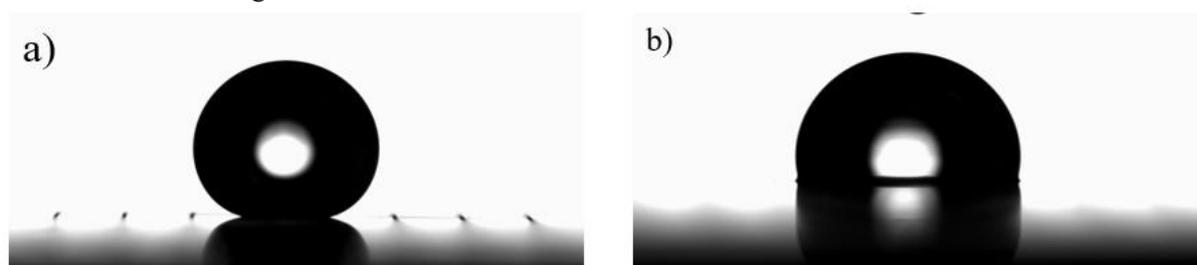


Abbildung 88 Kontaktwinkelmessung der LIPSS-Struktur im a) unbenetzten (Messung 1) und b) benetzten Zustand (Messung 3)

Messung	Unbenetzt	Benetzt	Nach Anströmversuch
Messung des statischen Kontaktwinkels			
1	158.3 °	104.0 °	102.8 °
2	157.9 °	103.1 °	104.0 °
3	159.5 °	103.5 °	102.2 °
Mittelwert	158.6 °	103.3 °	103.0 °
Standardabweichung	0.7 °	0.4 °	0.7 °
Messung des Abrollwinkels			
1	$> 21.4^\circ$	$< 5.0^\circ$	$< 5.0^\circ$

Tabelle 16 Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung der LIPSS Struktur in verschiedenen Benetzungszuständen

5.2.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Tabelle 17 fasst alle errechneten Mittelwerte des statischen Kontaktwinkels und Abrollwinkels für alle Strukturen und Zustände zusammen. Durch jede Art der Strukturierung wurde der Kontaktwinkel im unbenetzten Zustand im Vergleich zum unbehandelten Zustand deutlich erhöht. Die unbenetzten LINIEN- und LIPSS-Strukturen können mit einem Kontaktwinkel von über 150.0° sogar als superhydrophob bezeichnet werden. Die Kontaktwinkel wurden durch das Auftragen von Silikonöl wieder verringert, was zu erwarten war, da hier die Benetzung zwischen zwei fluiden Phasen stattfindet.

Der Abrollwinkel sowohl der benetzten Strukturen als auch der angeströmten Proben konnte im Vergleich zu den unbenetzten Proben mit $< 5.0^\circ$ stark reduziert werden. Die genaue Messung gestaltete sich allerdings als schwierig, da bereits geringe Unebenheiten der Probenoberfläche die Tropfen zum Abrollen brachten.

Zustand	Unbenetzt	Benetzt	Nach Anströmversuch
Mittelwert des statischen Kontaktwinkels			
Unbehandelt	108.3 °	-	-
DIMPLES	136.6 °	90.1 °	88.5 °
LINIEN	153.7 °	76.2 °	86.0 °
LIPSS	158.6 °	103.3 °	103 °
Abrollwinkel			
Unbehandelt	67.0 °	-	-
DIMPLES	$>90.0^\circ$	$<5.0^\circ$	$<5.0^\circ$
LINIEN	$>49.3^\circ$	$<5.0^\circ$	$<5.0^\circ$
LIPSS	$>21.4^\circ$	$<5.0^\circ$	$<5.0^\circ$

Tabelle 17 Zusammenfassung der Kontakt- und Abrollwinkelergebnisse aller Strukturen

Die Messungen nach den Anströmversuchen gestalteten sich aufgrund der kleinen Verunreinigungen und Staubpartikel im Windkanal als problematisch. Es könnte sein, dass diese Partikel die gemessenen Werte beeinflusst haben. Eine Aufnahme einer solchen mit Partikeln verunreinigte Messung ist in Abbildung 89 zu sehen, wo der hohe Grad an Verschmutzung im Vergleich zu den anderen Aufnahmen deutlich erkennbar ist. Dennoch weisen die ermittelten Werte nur geringfügige Abweichungen im Vergleich zu den Messungen im benetzten Zustand auf. Dies lässt darauf schließen, dass der größte Einfluss immer noch von der Benetzung mit Silikonöl ausgeht.



Abbildung 89 Kontaktwinkelmessung einer verunreinigten, benetzten LIPSS-Struktur nach einem Anströmversuch

5.3 Vereisungsversuche im Windkanal

5.3.1 Bestimmung der Vereisungsparameter

Für die Vereisungsversuche wurde ebenfalls der Klima-Windkanal verwendet, wie in Kapitel 4.6 beschrieben. Aufgrund der Wärmeentwicklung des Antriebs musste dieser so eingestellt werden, dass die Versuchszeit unterhalb einer kritischen Temperatur möglichst lange gehalten werden konnte und die Regenerationszeit zurück auf -8 °C möglichst kurz war.

Vor diesem Hintergrund wurde der Temperaturbereich für die Vereisung auf -8 bis -3 °C festgelegt. Je länger die Temperatur gehalten werden kann, desto mehr Eisbildung kann grundsätzlich beobachtet werden. Gleichzeitig legt die Entscheidung bezüglich der Antriebsleistung die Windgeschwindigkeit fest, und darf somit auch nicht zu niedrig sein. In diesem optimalen Bereich wurde der Kanal probeweise einmal mit 25% der maximalen Antriebsleistung betrieben, und einmal mit 50%. Abbildung 90 zeigt den Temperaturgradienten über die Zeit für die zwei gewählten Motorantriebsleistungen, und die daraus resultierende Versuchsdauer innerhalb des gewählten Temperaturbereichs.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde entschieden, die Vereisungsversuche mit einer Antriebsleistung von

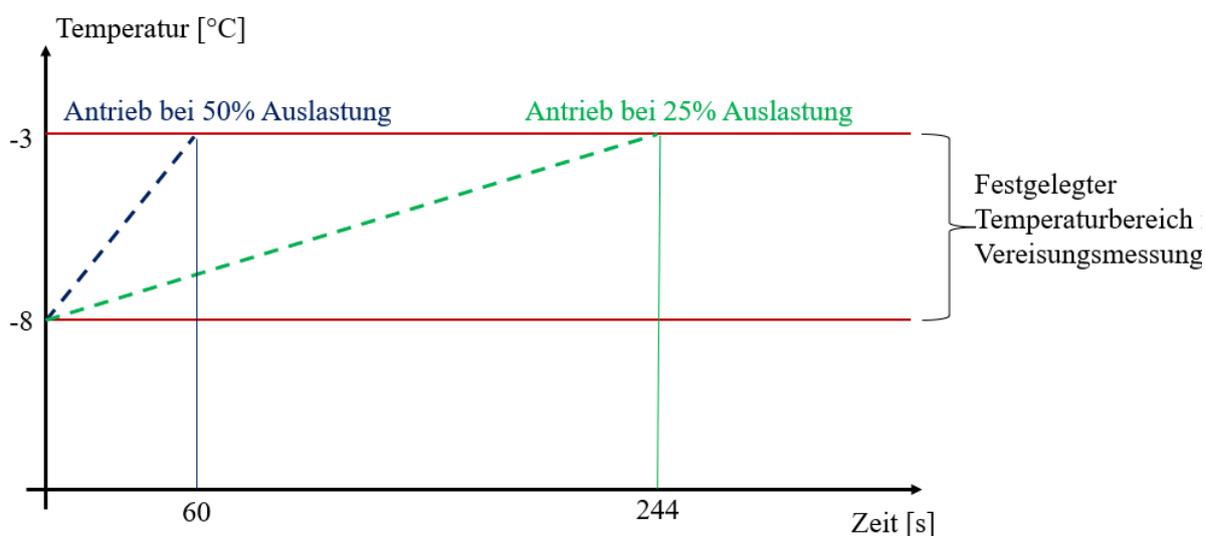


Abbildung 90 Bestimmen der geeignetsten Antriebsparameter für Vereisungsversuche im Klima-Windkanal

25% durchzuführen, um eine möglichst lange Vereisungsdauer zu ermöglichen und dadurch eine bessere gravimetrische Differenzierung der akkumulierten Eismassen zu ermöglichen. Folglich lag die maximale Messdauer bei 244 Sekunden, wobei die tatsächliche Versuchsdauer in Abstimmung mit den Einspritzparametern auf 200 Sekunden festgelegt wurde. Die genauen Parameter der Einspritzvorrichtung, welche die Tropfen kontrolliert abgibt und diese durch die Strömung auf die Probenoberfläche treffen lässt, sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Antriebsleistung	25 %
Temperatur bei Start der Einspritzung	-8 °C
Temperaturbereich während der Messung	-8 bis -3 °C
Windgeschwindigkeit	65-70 km/h
Versuchsdauer	200 s
Tröpfchen-Pulse	400
Pause	0.4 s
Pulsdauer	0.1 s
Temperatur eingespritztes Wasser	0 bis 3 °C
Winkel der Probenoberfläche zur waagerechten	30.0 °

Tabelle 18 Parameter für die Vereisungsversuche im Klima-Windkanal

5.3.2 Bestimmung des Vereisungsgrads

Die Vereisungsversuche wurden, wie bereits in Kapitel 5.2.2 erwähnt, aufgrund der vorherigen Versuche ausschließlich mit den DIMPLES-Strukturen durchgeführt, da diese das beste Haltevermögen für das verwendete Silikonöl zeigten und der Abrollwinkel im benetzten Zustand sehr gering war.

Die Vereisungsversuche wurden grundsätzlich in den beiden Variationen des vollständig unbenetzten Zustands, und des einmalig benetzten Zustands durchgeführt. Um eine Referenz zu generieren, wurden außerdem zusätzlich Vereisungsversuche an einem unbehandelten Stahlblech vorgenommen. Für jede dieser Variationen wurden drei aufeinanderfolgende Messungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau entsprach dem in Abbildung 81 dargestellten Aufbau. Die Bestimmung des Vereisungsgrades erfolgte sowohl gravimetrisch mit einer Feinwaage als auch visuell mittels Fotoauswertung.

5.3.2.1 Gravimetrische Messung

Die gravimetrischen Messungen wurden mithilfe einer Präzisionswaage vom Hersteller Radwag, Modell WPS 2100/C/2, mit einer Auflösung von 0.01 g durchgeführt. Der gesamte Versuchsaufbau wurde vor und nach den Vereisungsmessungen als Einheit in einer Schale gewogen. Dieser Ansatz wurde gewählt, da das Abnehmen der Blechproben zum Schmelzen und Abbrechen des Eises hätte führen können, was das Ergebnis verfälscht hätte. Dabei wurde der Fehler, der durch die zusätzliche Anhaftung am Versuchsaufbau selbst entstand, in Kauf genommen. Für jede Versuchsreihe wurden insgesamt drei individuelle Vereisungsmessungen durchgeführt. Alle Messergebnisse sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Messung	Startgewicht vor der Vereisung [g]	Gewicht nach der Vereisung [g]	Gewichtszunahme [g]
Versuchsreihe 1, Variante: Unbehandeltes Blech			
1	305.4	308.4	3.0
2	305.4	309.0	3.6
3	305.4	310.5	5.1
Mittelwert	305.4	309.3	3.9
Standardabweichung	0.0	0.9	-
Versuchsreihe 2, Variante: DIMPLES-Struktur, unbenetzter Zustand			
1	309.2	314.0	4.8
2	309.2	315.7	6.5
3	309.2	313.9	4.8
Mittelwert	309.2	314.5	5.4
Standardabweichung	0.0	0.8	-
Versuchsreihe 3, Variante: DIMPLES-Struktur, benetzter Zustand			
1	306.4	310.4	4.0
2	306.5	310.2	3.7
3	306.4	310.2	3.8
Mittelwert	306.4	310.3	3.8
Standardabweichung	0.0	0.1	-

Tabelle 19 Ergebnisse der gravimetrischen Messung vor und nach Vereisung der Referenz und DIMPLES-Proben in verschiedenen Zuständen

Die unbehandelten Blechproben der ersten Versuchsreihe wiesen im Schnitt eine Gewichtszunahme durch Eis von 3.9 g auf, bei den unbenetzten strukturierten Proben der zweiten Versuchsreihe hingegen wurde die höchste durchschnittliche Eiszunahme von 5.4 g gemessen. Das höhere Startgewicht der zweiten Versuchsreihe ist auf ein zusätzlich innen aufgelegtes Blech zwischen der Probe und dem Poroplast-Material zurückzuführen, um einen möglichen Austritt von Silikonöl in die Struktur zu verhindern, was die Messergebnisse hätte verfälschen können.

Die signifikante Zunahme der Vereisung, die in der zweiten Versuchsreihe bei den unbenetzten strukturierten Proben beobachtet wurde, könnte möglicherweise auf die rauere und trockenere Oberfläche im Vergleich zu den anderen Proben zurückzuführen sein. Diese bietet einerseits mehr Angriffspunkte für die Eisbildung, während die Rauheit zu einer höheren Haftung der Wassertropfen führen könnte. Darauf wiesen auch bereits die Vorversuche wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben hin, in

denen DIMPLES-Strukturen, die am wenigsten ausgeprägten hydrophoben Benetzungseigenschaften aufwiesen. Zusammenfassend wurde hier folglich keine Anti-Icing-Wirkung beobachtet.

Für die DIMPLES-Probe im benetzten Zustand in Versuchsreihe 3 wurde vor den Versuchen 0.2 ml Silikonöl (vgl. Tabelle 2) aufgetragen und verteilt. Auf eine erneute Benetzung nach den Versuchen wurde bewusst verzichtet, um zusätzlich zu untersuchen, ob die Vereisung innerhalb der Messreihe durch einen möglichen Abbau des Ölfilms zunimmt. Die Menge der Vereisung blieb jedoch über alle Versuche relativ konstant, dahingehend konnte also keine Korrelation festgestellt werden. Zusätzlich war zu beobachten, dass sich das Eis direkt nach den Versuchen sehr leicht ablösen ließ, bzw. direkt nach dem Versuch von allein abfiel. Dabei wurde auch festgestellt, dass der Ölfilm der Struktur über alle Versuche erhalten blieb.

Insgesamt konnten mit dieser Versuchsreihe durch die gravimetrischen Messungen bereits Tendenzen in den unterschiedlichen Vereisungsgraden erkannt werden. Gleichzeitig wurden auch, wie im nächsten Abschnitt dokumentiert, visuelle Differenzen in der Vereisung erfasst.

5.3.2.2 Visuelle Bewertung der Vereisungszustände

Die drei Aufnahmen in Abbildung 91 zeigen jeweils einen Vereisungsversuch einer Variation im direkten Vergleich. Die Eisbildung nahm dabei sichtbar verschiedene Formen an. Bei der unbenetzten Blechprobe, in a) zu sehen, gefror das auftreffende Wasser in kleinen Ansammlungen. Bei der unbenetzten strukturierten Probe b) bildete sich hingegen während des Versuchs eine durchgängige, festsitzende, solide Schicht an Eis. Bei c), der benetzten strukturierten Probe, entstanden kleine, auf der Probenoberfläche „schwimmende“ Eisinseln. Diese ließen sich sehr leicht auf der Oberfläche verschieben und ablösen, wobei eine klare Trennung von Wasser und dem Silikonöl zu erkennen war. Es ist anzumerken, dass innerhalb derselben Variation keine sichtbaren Veränderungen des Vereisungszustandes über die drei Durchgänge des jeweiligen Vereisungsversuchs zu erkennen waren.



Abbildung 91 Aufnahmen nach den Vereisungsversuchen bei a) dem unbenetzten Blech, b) der unbenetzten DIMPLES-Struktur und c) der benetzten DIMPLES-Struktur

5.3.3 Vereisungsversuche am Tragflächenprüfstand

Für die Vereisungsversuche am Tragflächenprüfstand wurde zunächst die Halterung, wie in Kapitel 4.3.5 dargestellt, in den Klima-Windkanal eingebaut. Das zu testende Blech wurde entsprechend den Abmessungen, die in Abbildung 66 zu sehen sind, zugeschnitten. Anschließend wurde es auf den Tragflächenprüfstand aufgespannt und in der Halterung befestigt (Abbildung 92).



Abbildung 92 Tragflächenprüfstand mit unbehandeltem Blechzuschnitt eingebaut in die Testsektion des Klima-Windkanals

In der ersten Versuchsreihe wurde ein unbehandeltes 75 μm dickes Stahlblech verwendet, um Referenzwerte für den Vereisungsgrad zu generieren. Für die zweite Versuchsreihe wurde auf das Probenblech die DIMPLES-Struktur aufgebracht und anschließend perforiert. Die Bearbeitung erfolgte auch hier wieder mithilfe des Femtosekundenlasers (Kapitel 4.1), sodass sich zentral im Blechzuschnitt ein Quadrat mit den Abmessungen 80x80 mm für die Laserbearbeitung befand. Auf Abbildung 93 ist die Bearbeitung des 80x80 mm Blechzuschnitts zu sehen. Das Probenblech wurde, um ein Aufrollen und Wölben während der Bearbeitung zu vermeiden, mit doppelseitigem Klebeband auf einer Metallunterlage aufbracht und diese wiederum am Vakuumschisch fixiert.

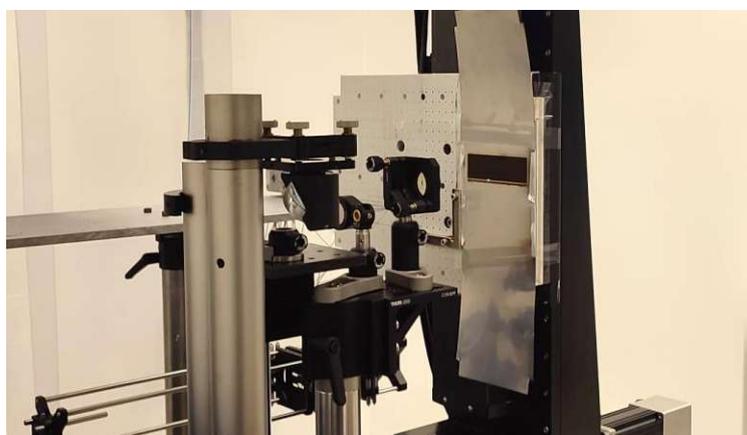


Abbildung 93 Herstellung der DIMPLES-Struktur auf einem Blechzuschnitt für den Tragflächenprüfstand mittels Femtosekundenlaser

5.3.3.1 Versuche ohne zusätzliche Silikonölaufuhr

Es wurden je drei Versuche für zwei Versuchsreihen durchgeführt. Das strukturierte Blech wurde für die zweite Versuchsreihe zu Beginn mit 0.8 ml Silikonöl benetzt. Dieser Wert wurde von den vorherigen Versuchen übernommen und auf die größere Fläche umgerechnet.

Um den Tragflächenprüfstand und die Bleche zwischen den Versuchen von anhaftendem Wasser und Eis zu reinigen, wurden diese mit Druckluft abgeblasen und die unstrukturierten Flächen mit Aceton gereinigt. Damit der Wärmeeintrag in den Klima-Windkanal durch den Prüfstand so gering möglich war, wurde der gesamte Aufbau vor und zwischen den Versuchen in einem externen Gefrierfach gelagert. Die Vereisungsparameter für die Versuche entsprachen denjenigen, die in Tabelle 18 aufgeführt sind, bis auf den Anstellwinkel des Tragflächenprofils, welcher für die Versuche auf 0.0° gegenüber der Waagerechten festgelegt wurde.

Die Ergebnisse der Versuche wurden sowohl mithilfe gravimetrischer Messungen, wie in Tabelle 20 dokumentiert, als auch visuell in den Aufnahmen, die in Abbildung 94 zu sehen sind, zusammengefasst. Für die gravimetrische Messung wurde auch hier der Tragflächenprüfstand als Ganzes vor und nach der Vereisung gewogen, da das Ausspannen des Bleches einerseits die Eisstruktur voraussichtlich zerstört hätte, als auch andererseits die Gewichtsmessung durch beginnendes Aufschmelzen verfälscht hätte.

Messung	Startgewicht vor der Vereisung [g]	Gewicht nach der Vereisung [g]	Gewichtszunahme [g]
Unbehandeltes Stahlblech, 75 μm			
1	1968.0	1974.7	6.7
2	1968.4	1976.0	7.6
3	1969.2	1976.3	7.1
Mittelwert	1968.5	1975.7	7.1
Standardabweichung	0.5	0.7	-
DIMPLES-Struktur, benetzt, 50 μm			
1	1957.2	1964.5	7.3
2	1958.1	1965.5	7.4
3	1957.6	1962.1	4.5
Mittelwert	1957.6	1964.0	6.6
Standardabweichung	0.4	1.4	-

Tabelle 20 Ergebnisse der gravimetrischen Messung des unbehandelten Stahlblechs und der benetzten DIMPLES-Struktur am Tragflächenprüfstand

Die durchschnittliche Gewichtszunahme der unbehandelten Blechprobe betrug 7.1 g. Die Zunahme des Startgewichts könnte auf die Ansammlung von Kondensat am Tragflächenprüfstand aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung zurückzuführen sein. Visuell konnte die Bildung einer Klareisschicht beobachtet werden (Abbildung 94 a), wobei zusätzlich festgestellt wurde, dass das Eis stark an der Blechoberfläche haftete, was das Ablösen erschwerte.

Die durchschnittliche Gewichtszunahme der behandelten Struktur betrug 6.4 g. Hierbei war ein deutlich leichteres Ablösen der Eisschicht im Vergleich zur unstrukturierten Probe zu beobachten, so kam es bei der zweiten Messung teilweise zum sogenannten „Shedding“, also zum Abbrechen größerer Eisansammlungen an der Vorderkante (Abbildung 94 b). Dies hatte auch einen sichtbaren Abtrag von Silikonöl von der Oberfläche zur Folge, weshalb für die nächste Messung eine Nachbenetzung mit 0.2 ml erfolgte. Da das Shedding bereits bei Windgeschwindigkeiten von ca. 70 km/h zu beobachten war, lässt dies auf eine geringe Eisadhäsion an der Oberfläche schließen. Auch die Eisbildung unterschied sich visuell von der vorherigen Versuchsreihe. Im Vergleich zu diesen bildete sich das Eis eher rauer aus und behielt, wie auch schon in den Vorversuchen, eine Inselform, die auf der Oberfläche zu „schwimmen“ schien. Eine ausreichende Anti-Icing Wirkung konnte hier jedoch noch nicht festgestellt werden.



Abbildung 94 Aufnahmen der Vereisung am Tragflächenprofil am a) unbehandelten Blech und b) benetzten Blech

5.3.3.2 Versuche mit zusätzlicher Silikonölaufuhr

Für die finalen Versuche wurde während des Vereisens erstmals die Fluidförderung durch den Poroplast-Kern verwendet, um die Blechprobe kontinuierlich mit Silikonöl zu versorgen. Dazu wurde auf einem Blechzuschnitt eine 60x80 mm große DIMPLES-Struktur mit Perforierungen hergestellt. Das Programm für diese Bearbeitung ist im Anhang Teil B zu finden. Der zu bearbeitende Ausschnitt wurde hier kleiner gewählt, da bereits die Herstellung der 80x80 mm großen Fläche mit einer Bearbeitungsdauer von über 48 Stunden sehr zeitintensiv war. Außerdem wurden aufgrund der Schwierigkeiten beim Ablösen des Klebebands nur noch mehrere kleine Ausschnitte davon verwendet, was aber gleichzeitig zu einer geringfügigen Wölbung des Bleches während der Strukturierung führte. Um dennoch im nächsten Schritt durchgängige Perforierungen zu erhalten, wurden diese mit einer Leistung von 250 mW und einer höheren Pulszahl von 600 hergestellt. Zusätzlich wurde während der Bearbeitung stufenweise mit der z-Achse verfahren, um die Wölbung des Blechs zu kompensieren.

Die Ölförderung erfolgte über einen simplen, selbst hergestellten Aufbau, um Verunreinigungen zu minimieren. Dazu wurde der Deckel der Silikonölflasche so modifiziert, dass mittels zweier Bohrungen zwei Schläuche abgedichtet montiert werden konnten, um eine Förderung direkt aus der Flasche zu ermöglichen. Ein Schlauch reichte bis zum Boden der Flasche, während der andere knapp über der Füllhöhe endete. Über diesen zweiten Schlauch wurde Luftdruck appliziert, wodurch das Silikonöl durch den Druck in der Flasche zum Tragflächenprüfstand gefördert wurde. Um die aufgespannte Blechprobe vor Beginn des Versuchs initial mit Silikonöl zu benetzen, wurde ein Luftdruck von 0.75 bar aufgebracht. Dadurch trat das Öl fast sofort aus den Perforierungen aus. In Abbildung 95 ist der Benetzungsvorgang einmal nach a) 30 Sekunden und b) zwei Minuten dargestellt, wobei sich nach zwei Minuten bereits deutlich erkennbar eine durchgängige Schicht aus Silikonöl über der Leading Edge gebildet hatte. Anschließend wurde der Tragflächenprüfstand in den Klima-Windkanal eingesetzt.

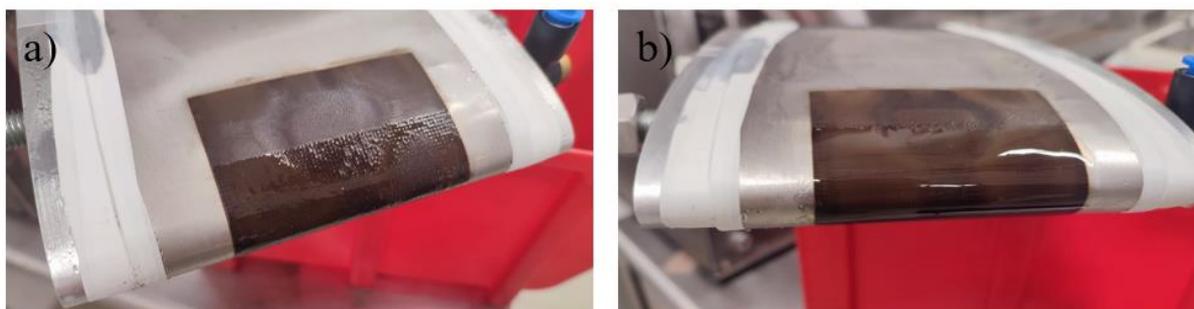


Abbildung 95 Benetzung der Oberflächenstruktur durch den Poroplast-Kern nach a) 30 Sekunden und b) zwei Minuten

Bei der anfänglichen Benetzung kam es zum seitlichen Austreten von Silikonöl, insbesondere im Bereich des Verbindungsteils zwischen Blech und Flachdichtung. Aus diesem Grund wurde hier zusätzlich ein Dichtband angebracht.

Für die finalen Versuche wurde bewusst auf die gravimetrischen Messungen verzichtet, da diese durch die ständige Zu- und Abtragung von Öl stark verfälscht worden wären. Sie dienten dazu, das Zusammenspiel aller Komponenten des Tragflächenprüfstandes zu testen und die Eisbildung mittels Bildanalyse zu qualifizieren.

Der erste Vereisungsversuch wurde gemäß den Parametern in Tabelle 18 durchgeführt. Dabei bildeten sich, wie zuvor beobachtet, zunächst inselartige Eisansammlungen. Im Laufe der Zeit sammelte sich weiteres Wasser an, was schließlich zu einer durchgehenden, rauen Eisschicht führte. Diese Schicht haftete jedoch, wie in den vorherigen Versuchen, nicht fest an der SLIPS-Oberfläche und konnte fast vollständig entfernt werden. Die infundierte Oberfläche blieb danach völlig intakt. Abbildung 96 zeigt die entstandene Eisschicht nach dem Vereisungsversuch.



Abbildung 96 Aufnahme der Vereisung am Tragflächenprofil mit kontinuierlicher Silikonölversorgung

Zusätzlich wurden Aufnahmen mittels Videokamera gemacht, um den Hergang der Eisbildung genau zu beobachten. In Abbildung 97 sind drei Aufnahmen im Abstand von 10 Sekunden zu sehen, auf denen zu erkennen ist, wie sich die Wassertropfen auf der Oberfläche bewegen. Es kam nicht zu einem direkten Anfrieren; vielmehr bewegten sich die Tropfen langsam dem Strömungsverlauf folgend nach hinten, sobald sie sich auf der SLIPS-Oberfläche befanden. In der weiteren Bewegung entlang des Tragflächenprofils froren die zurückfließenden Tropfen, wobei es gleichzeitig zur Wasseranhaftung um diese initialen Tropfen kam. Diese Art der Eisbildung erklärt die raue inselförmige Ausbildung der Vereisung. Es wurde festgestellt, dass sich die Eisschicht um die Wassertropfen selbst bildet und keinerlei Haftung zur Oberfläche selbst aufwies. Die Bewegung der Tropfen verlangsamte sich stetig aufgrund der zunehmenden akkumulierten Masse über das Profil. So kam es zur immer weiteren Eisanhaftung, was final in einer durchgängigen rauen Eisschicht resultierte. Abbildung 97 veranschaulicht den genauen Mechanismus der Eisbildung, der aus den Aufnahmen ersichtlich wurde. Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeit bei diesem Versuch, etwa 70 km/h, wurde entschieden, einen weiteren Versuch mit höherer Geschwindigkeit durchzuführen, um zu bewerten, ob die erhöhte Geschwindigkeit das Eis von der Oberfläche abtragen würde, bevor es zu einer Akkumulation kommt.

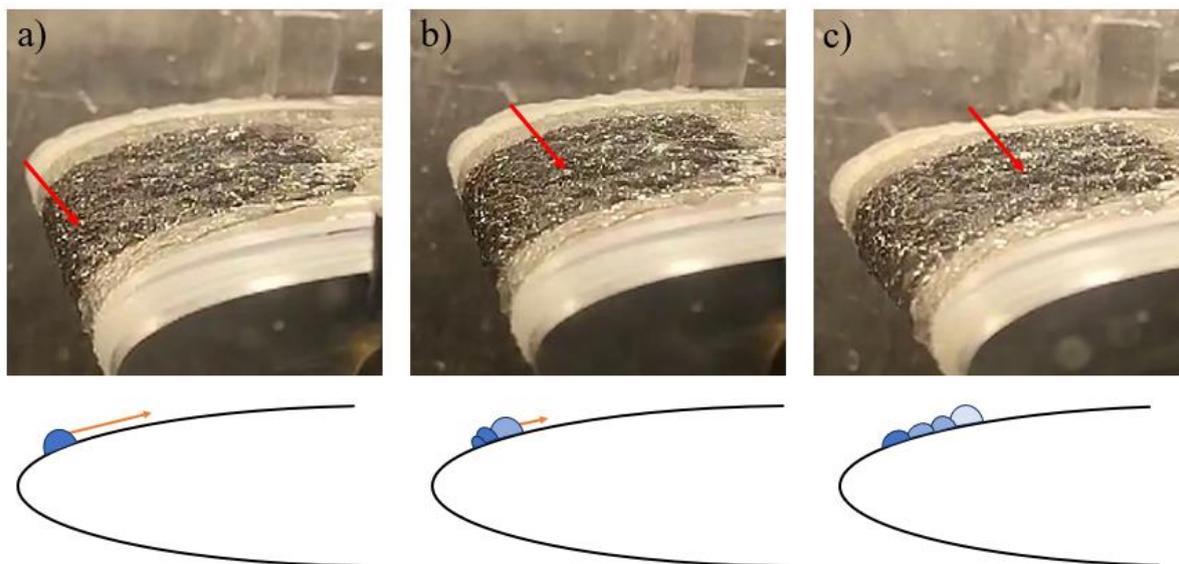


Abbildung 97 Bewegung eines gefrierenden Wassertropfens an der Oberflächenstruktur mit kontinuierlicher Versorgung. a) initialer Kontakt des Wassertropfens mit der Oberfläche, b) Ansammlung weiterer Wassertropfen um den initial gefrierenden Wassertropfen und c) weiteres Wachsen der Eisansammlung

Die Versuchsdauer für den zweiten Versuch mit 100% der Antriebsleistung (~ 150 km/h) betrug nur etwa eine Minute, da der Wärmeeintrag des Antriebs die Dauer einschränkte in welcher der Temperaturbereich von -8°C bis -3°C gehalten werden konnte. Der Versuch wurde daher manuell bei Überschreiten der -3°C Marke gestoppt.

Während des Versuchs konnte keinerlei Eisanhaftung an der SLIPS beobachtet werden. Die geringe Haftung der Wassertropfen an der Oberfläche führte dazu, dass sie durch die höheren Geschwindigkeiten direkt nach hinten abgetragen wurden und während ihrer Bewegung über das Tragflächenprofil zu kleinen Eiskristallen gefroren. Auf der Leading Edge selbst konnte keine Eisakkumulation beobachtet werden. In Abbildung 98 ist ein direkter Vergleich zwischen dem ersten Versuch und dem zweiten Versuch nach einer Minute zu sehen.

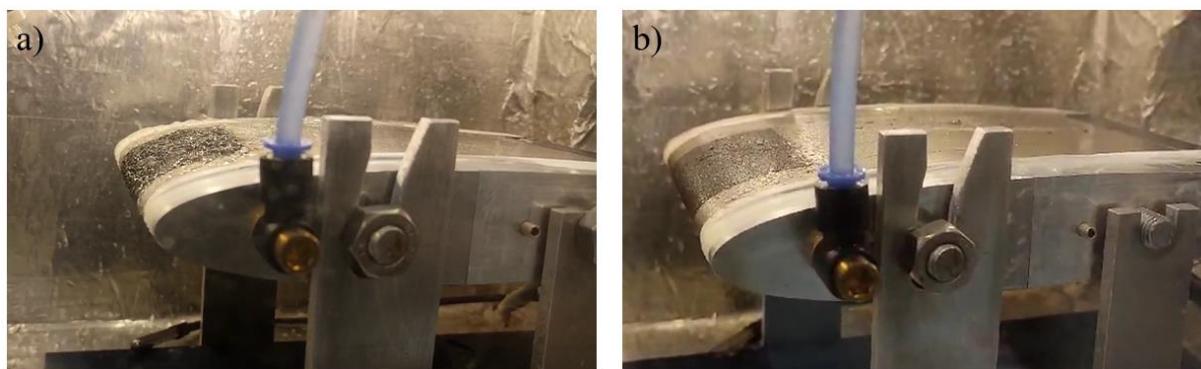


Abbildung 98 Aufnahmen des Vereisungsgrades im direkten Vergleich nach einer Minute bei a) 25% (65-70 km/h) und b) 100% Antriebsleistung (~ 150 km/h)

In Tabelle 21 sind die geänderten Parameter nochmals im Vergleich zum ersten Versuch zu sehen.

	Versuch 1	Versuch 2
Motorleistung	25 %	100 %
Versuchsdauer [min:s]	3:20	1:20
Temperaturbereich während der Messung	-8 bis -3 °C	-8 bis -3 °C
Windgeschwindigkeit	65-70 km/h	~150 km/h

Tabelle 21 Direkter Vergleich der Vereisungsparameter bei den Versuchen mit kontinuierlicher Silikonölaufuhr

Zusammenfassend konnte beobachtet werden, dass das Abrollen der Wassertropfen in diesem Versuch aufgrund der höheren Geschwindigkeit deutlich schneller erfolgte als im ersten Versuch. Die nachfolgenden Tropfen hatten keine Möglichkeit, an den vorherigen Tropfen festzufrieren, weshalb sich keine zusammenhängende Eisschicht ausbilden konnte. Dieser Versuch, zusammen mit den Erkenntnissen zur genauen Eisbildung im ersten Vereisungsversuch in Kapitel 5.3.3.1, legt nahe, dass die Abrollgeschwindigkeit der Wassertropfen der kritische Parameter war, der den Vereisungsgrad in diesen Versuchen bestimmte.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tragflächenprüfstand entwickelt, um die Vereisungseigenschaften von Proben mit laserstrukturierten, mit Öl infundierten Oberflächen (SLIPS) zu untersuchen. Der gesamte Entwicklungsprozess, angefangen vom ersten Konzept bis zur Fertigstellung des finalen Aufbaus, wurde ausführlich dokumentiert. Dies ermöglichte die Durchführung der relevanten Versuchsreihen und die Erfassung wichtiger Daten. Während der Konstruktionsphase wurde ein umsetzbares und den verfügbaren Ressourcen angemessenes Konzept entwickelt, was bis zur Fertigstellung des Aufbaus ohne große Änderungen beibehalten wurde. Die Anforderungen an den Tragflächenprüfstand bezüglich Formintegrität, Fluidförderung, Abdichtung und Implementierung in den am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien entwickelten und für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen genutzten Klima-Windkanal wurden klar definiert und konnten größtenteils erfolgreich umgesetzt werden. Die konstruktive Aufteilung in zwei Komponenten, den Kern und den Grundkörper, ermöglichte einen modularen Aufbau, welcher je nach Versuchsanforderungen angepasst werden konnte.

Für die Auswahl einer geeigneten Laserstrukturierung für die Herstellung von SLIPS, als auch andererseits beim Festlegen geeigneter Perforierungsparameter, um die Öldurchlässigkeit der Proben für den Tragflächenprüfstand zu gewährleisten, wurden Vorversuche an kleinen Blechproben durchgeführt. Im Zuge dessen wurde ein weiterer Versuchsaufbau konstruiert. Basierend auf den erhaltenen Ergebnissen wurde entschieden, die DIMPLES-Struktur zu verwenden, da sie im Gegensatz zur LINIEN- und LIPSS-Struktur die besten Eigenschaften bezüglich der Speicherfähigkeit von Fluiden aufwies. Die Perforationsparameter wurden mit einem Abstand von 1 mm und einer Pulszahl von 350 festgelegt, da damit eine gleichmäßige und durchgängige Perforation erreicht wurde.

Die folgenden Vereisungsversuche wurden mithilfe des Klima-Windkanals über eine entsprechende Einspritzvorrichtung mit Zerstäuberdüse und gleichzeitiger Kühlung durch Gefrierschränke und Wärmetauscher eingeleitet. Durch die Durchführung mehrerer Versuchsreihen an den Strukturen, sowohl im benetzten (SLIPS) als auch im unbenetzten Zustand, sowie an unbehandelten Stahlblechen als Referenz, konnten sowohl im Versuchsaufbau für kleine Bleche als auch am Tragflächenprüfstand, die sich bildenden Eisformen, sowie die akkumulierte Eismasse visuell und gravimetrisch bewertet werden.

Letzteres konnte dabei insbesondere die Unterschiede zwischen unbenetzten und einmalig mit Silikonöl benetzten laserstrukturierten Oberflächen deutlich demonstrieren. In Abbildung 99 sind die Ergebnisse für die Vorversuche an den kleinen Blechproben in Kapitel 5.3.2.1 für die jeweils drei durchgeführten Versuche dargestellt.

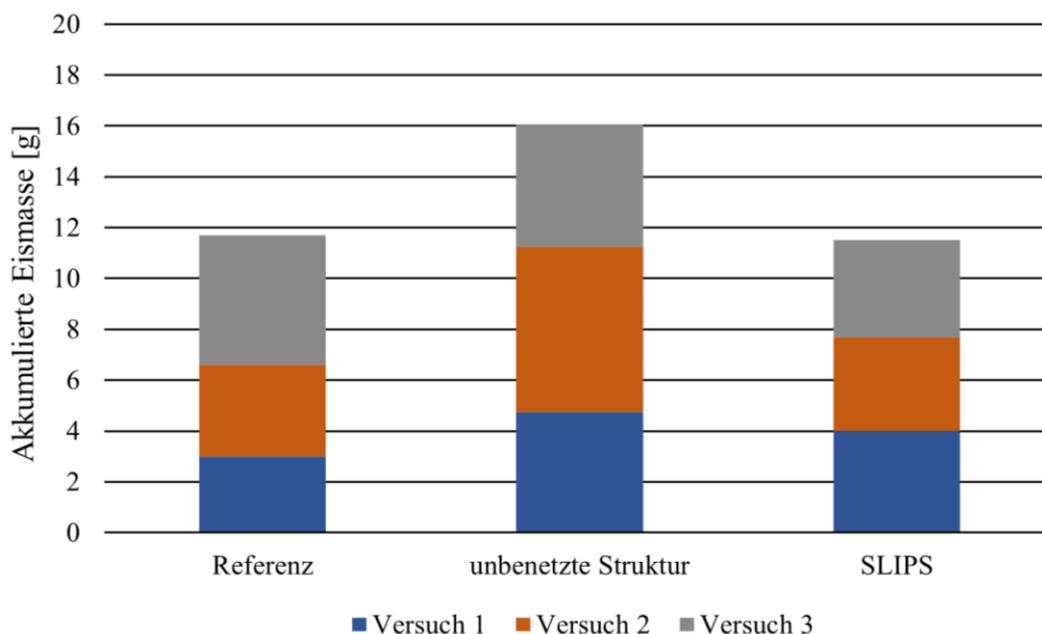


Abbildung 99 Gravimetrisch bestimmte Eismasse der Vorversuche (Kapitel 5.3.2.1)

Diese Unterschiede wurden auch durch die visuelle Beurteilung bestätigt. Demnach bildete sich bei den unbenetzten, laserstrukturierten Proben eine stark haftende, durchgängige Eisschicht aus, was im Widerspruch zur eigentlich hydrophoben Oberfläche der DIMPLES-Struktur steht. Eine mögliche Erklärung für die stärker ausgeprägte Eisschicht könnte der Pinning-Mechanismus sein, der bei strukturierten hydrophoben Oberflächen auftreten kann. Demnach kann, wenn ein Tropfen oberhalb einer kritischen Geschwindigkeit (sogenannte Pinning-Geschwindigkeit) auf ein Substrat trifft, sich dieser teilweise in der Struktur verfangen, statt vollständig abzurallen [79]. Die Aufprallgeschwindigkeit ist dabei entscheidend dafür, ob die Benetzung nach dem Wenzel- oder Cassie-Baxter-Modell erfolgt, wobei oberhalb einer bestimmten Geschwindigkeit die Hydrophobie der Oberfläche zerstört wird [78]. Dieser Mechanismus wurde bereits in früheren Forschungsarbeiten an strukturierten Oberflächen untersucht [78], [79]. Der Teil des Tropfens, der in den Versuchen möglicherweise nicht von der Struktur abprallen konnte, könnte als Keimstelle für weitere Eisakkumulation gedient haben. In diesem Fall könnte die Verzahnung des gefrierenden Tropfens in der Struktur zusätzlich zu einer stärkeren Eisadhäsion beigetragen haben.

Bei den im Zuge dieser Arbeit hergestellten SLIPS hingegen kam es zu einer Trennung des sich bildenden Eises und der Probenoberfläche, was zu einem langsamen Abgleiten der entstandenen Eisinseln führte. Der einmalige Benetzungszustand mit Silikonöl ohne rückseitige kontinuierliche Nachversorgung war bereits sehr stabil, und es zeigte sich auch keine Abnahme dessen, selbst nach drei Vereisungszyklen. Die Eisadhäsion an der Oberfläche war minimal. Dennoch konnte in diesen Vorversuchen noch nicht der gewünschte Anti-Icing Effekt beobachtet werden.

Die Funktionalität des Tragflächenprüfstands konnte mit der Durchführung von Versuchen an großen unbehandelten Blechproben und SLIPS erfolgreich validiert werden. Abbildung 100 zeigt die gravimetrischen Ergebnisse der drei durchgeführten Versuche, sowohl für das unbehandelte als auch für das einmalig mit Silikonöl benetzte Blech. Auch hier konnte die Vereisungsmenge verringert werden, und in einigen Versuchen mit den benetzten Proben konnte sogar Shedding am Leading Edge beobachtet werden.

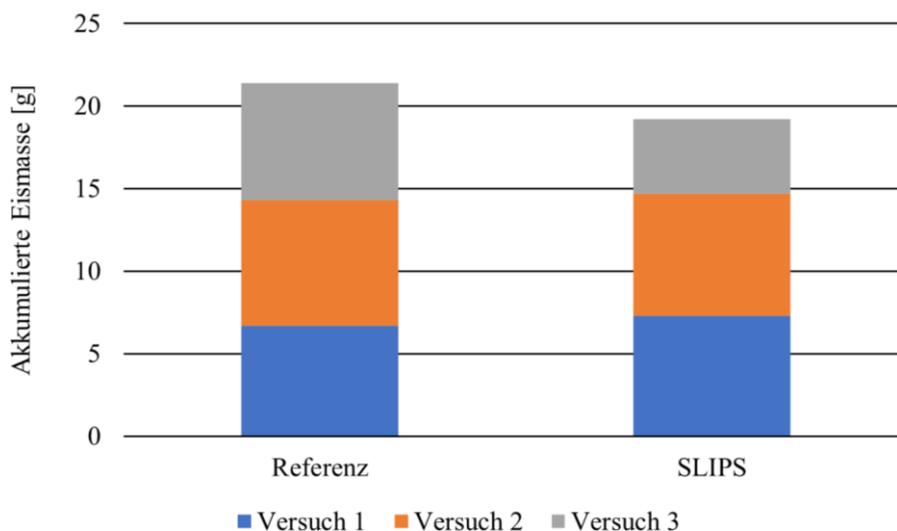


Abbildung 100 Gravimetrisch bestimmte Eismasse am Tragflächenprüfstand (Kapitel 5.3.3)

Durch die in den Tragflächenprüfstand integrierte Ölzufuhr konnten erstmalig Vereisungen an kontinuierlich nachversorgten SLIPS untersucht werden. Im ersten Versuch mit 25 % der Antriebsleistung (Windgeschwindigkeiten von 65-70 km/h) zeigte sich erneut eine raue und inselartige Vereisung. Durch Videoaufnahmen konnte dabei erstmals auch der genaue Prozess der Eisbildung auf der Oberfläche untersucht werden. Dabei bestätigte sich die Vermutung, dass das akkumulierte Eis auf der Ölschicht schwimmt, da die vereisenden Tropfen sich noch weiter entlang des Strömungsprofils bewegten, was auch die geringe Haftung des Eises auf der Oberfläche erklärt. Dennoch kam es bei diesem Versuch zu einer Eisakkumulation, da die Geschwindigkeit nicht ausreichte, um das Eis vollständig von der Oberfläche abzutransportieren. Dieser Prozess wurde im letzten Versuch bestätigt, bei dem eine höhere Windgeschwindigkeit von ~150 km/h die vereisenden Tropfen mit einer deutlich höheren Abrollgeschwindigkeit von der Oberfläche abtransportierte. Dabei wurde keine Eisbildung auf den SLIPS oder der Leading Edge festgestellt. Die finalen Ergebnisse deuten daher auf eine effiziente Anti-Icing Wirkung bei ausreichender Windgeschwindigkeit hin.

6.2 Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Grundlagen für das Verwenden eines Tragflächenprüfstands zum Untersuchen der Anti-Icing Wirkungen von SLIPS bei Luftfahranwendungen geschaffen. Darauf aufbauend bieten sich einige Möglichkeiten, die Untersuchungen weiterzuführen und die vorgestellten Ansätze weiterzuentwickeln. Diese gliedern sich in drei Bereiche auf: Die Anpassung diverser Versuchsparameter auf dem bestehenden Prüfstand, die erneute Durchführung der Versuche in einem geeigneteren Klima-Windkanal, und Adaptionen am Tragflächenprüfstand selbst.

Betreffend den ersten Ansatz ist es von besonderer Bedeutung, im Rahmen zukünftiger Versuche die Windgeschwindigkeit als entscheidenden Versuchsparameter zu erhöhen. Dies wird es ermöglichen, die genaue Geschwindigkeit zu bestimmen, ab der die kritische Abrollgeschwindigkeit erreicht wird und die vereisenden Tropfen von der SLIPS abtransportiert werden können. Gleichzeitig sollte die Qualität der visuellen Aufnahmen verbessert werden, um eine detailliertere optische Auswertung zu ermöglichen. Dies könnte beispielsweise durch die Installation einer Vorrichtung außerhalb der Testsektion erreicht werden, um hochauflösende Bilder unter konstanten Lichtverhältnissen zu erfassen. Weiterhin sollte auch die Messung der Eisadhäsionskräfte ein zentraler Punkt für zukünftige Untersuchungen sein, da diese in dieser Arbeit nicht quantifiziert wurden.

Die erneute Durchführung der Versuche nach einer umfassenden Reinigung des Klima-Windkanals ist empfehlenswert, um die möglichen Auswirkungen von Verschmutzungen auf die erzielten Ergebnisse zu untersuchen und potenzielle Wechselwirkungen mit Verschmutzungen bei der Auswertung auszuschließen.

Zuletzt bietet der entwickelte Tragflächenprüfstand selbst großes Potenzial und sollte speziell im Hinblick auf die Abdichtung weiterentwickelt werden. Eine vielversprechende Idee hierfür ist die Herstellung der Flachdichtung mittels einer 3D-gedruckten Form, um sie passgenau und in einem Stück aus Silikon gießen zu können, und damit eine bessere Abdichtung zu gewährleisten. Dies würde die Handhabung während der Versuche erleichtern. Außerdem könnten damit im selben Zug auch die anderen Kernsysteme auf deren Ölförderungseigenschaften getestet werden. Diese wurden in den Versuchen für diese Arbeit nicht berücksichtigt, da die Vereisung aufgrund des Zeitmangels nur an der Leading Edge mit dem Poroplast-Kern untersucht wurde.

Die genannten Schritte können dazu beitragen, die Forschung im Bereich der Anti-Icing Technologien voranzutreiben und die Einsatzmöglichkeiten von SLIPS in der Luftfahrtindustrie zu erweitern. Eine Kombination aus verbesserten experimentellen Bedingungen, weiteren Versuchen mit angepassten Parametern und der Weiterentwicklung des Tragflächenprüfstandes können die Grundlage für eine erfolgreiche Fortführung dieser Arbeit bilden.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- [1] Augsburgener Allgemeine, „US-Flugzeugabsturz: Tragflächen waren vereist“, *augsburger-allgemeine.de*, 14. Februar 2009. <https://www.augsburger-allgemeine.de/panorama/US-Flugzeugabsturz-US-Flugzeugabsturz-Tragflaechen-waren-vereist-id5100776.html>
- [2] Austrian Wings, „Vereisung & Pilotenfehler vermutlich Schuld an Absturz bei Buffalo“, *International*, 14. Februar 2009. <https://www.austrianwings.info/2009/02/vermutlich-vereisung-schuld-an-absturz-bei-buffalo/>
- [3] Salzburger Nachrichten, „Flugzeugabsturz in Kasachstan möglicherweise durch Vereisung“, *sn.at*, 10. Januar 2020. <https://www.sn.at/panorama/international/flugzeugabsturz-in-kasachstan-moeglicherweise-durch-vereisung-81812776>
- [4] G. Poots, R. W. Gent, N. P. Dart, und J. T. Cansdale, „Aircraft icing“, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Sci.*, Bd. 358, Nr. 1776, S. 2873–2911, 2000, doi: 10.1098/rsta.2000.0689.
- [5] J. Rennies, S. Geier, T. Mahrholz, und M. Sinapius, „Methodenentwicklung zur Charakterisierung von Anti-Icing-Oberflächen“, Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Braunschweig, 2016.
- [6] T. T. Lankford, *Aircraft Icing: A Pilot's Guide*. in Practical flying series. McGraw-Hill, 2000. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.at/books?id=SW5TAAAAMAAJ>
- [7] A. Criscione, *Influence of Ice Formation on Drop Dynamics*. Aachen: Shaker Verlag, 2014.
- [8] S. Altenau, „Vereisung in der Luftfahrt - Teil 1: Rau- und Klareis“, *Deutscher Wetterdienst*, 2020. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2020/10/5.html
- [9] N. Klußmann und A. Malik, *Lexikon der Luftfahrt*, 4. Aufl., Bd. 2. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [10] A. Heinrich u. a., „Aircraft icing handbook“, 1991.
- [11] S. Ells, „Aircraft Deicing and Anti-icing Equipment“. AOPA Air Safety Foundation, 2004.
- [12] Y. Long, X. Yin, P. Mu, Q. Wang, J. Hu, und J. Li, „Slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) with superior liquid repellency, anti-corrosion, anti-icing and intensified durability for protecting substrates“, *Chem. Eng. J.*, Bd. 401, S. 1–9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126137>.
- [13] Federal Aviation Administration, „AC 91-74B - Pilot Guide: Flight In Icing Conditions“. Federal Aviation Administration, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentid/1028388
- [14] K. L. Schulte und V. Ermert, *Meteorologie: ein Lehrbuch für Piloten nach europäischen Richtlinien*. Köln: KLS Publishing, 2013.
- [15] T. Vukits, „Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components“, gehalten auf der 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 2002, S. 1–31. doi: 10.2514/6.2002-811.

- [16] F. Saeed, „State-of-the-Art Aircraft Icing and Anti-Icing Simulation“, *ARA J.*, Bd. 2000–2002, Nr. 25–27, S. 106–113, 2003.
- [17] S. Altenau, „Vereisung in der Luftfahrt - Teil 2: Mischeis und Backschnee“, *Deutscher Wetterdienst*, 2020. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2020/10/16.html
- [18] „Flugzeugoberflächen schnell und umweltschonend enteisen“, *Fraunhofer Gesellschaft*, 2. März 2020, <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2020/maerz/flugzeugoberflaechen-schnell-und-umweltschonend-enteisen.html>
- [19] K. P. Dyer, „Anti-Icing Fluid Residues“, *SAE Trans.*, Bd. 116, S. 618–625, 2007.
- [20] A. Koehler, „Flugzeug De-/Anti-icing. Safewing: Effective solution against snow and ice“, *Clariant.com*, 2023. <https://www.clariant.com/de/Business-Units/Care-Chemicals/Aviation/Aircraft-De-Icing>
- [21] Fraport AG, „Umwelterklärung 2019 für die Organisationen Fraport AG (Fraport-Muttergesellschaft), NICE, FCS, GCS und FraGround am Flughafen Frankfurt“, Fraport AG Frankfurt Airport Services Worldwide, Frankfurt, 2019.
- [22] D. Ramakrishna und T. Viraraghavan, „Environmental impact of chemical deicers—a review“, *Water. Air. Soil Pollut.*, Bd. 166, S. 49–63, 2005.
- [23] „Where did TKS come from?“, *Fly. Mag.*, Bd. 133, Nr. 9, S. 57, Sep. 2009.
- [24] CAV, „TKS® Ice Protection“, *cav-systems.com*, 2023. <https://www.cav-systems.com/tns/>
- [25] B. Whitfield, „How It Works: TKS Ice Protection System“, *flyingmag.com*, 2016. <https://www.flyingmag.com/how-it-works-tns-ice-protection-system/> (zugegriffen 15. August 2023).
- [26] P. S. R. Beeram, „Characterization of ice adhesion strength over different surfaces pertinent to aircraft anti-/de-icing“, Iowa State University, Ames, Iowa, 2017.
- [27] L. Cao, A. K. Jones, V. K. Sikka, J. Wu, und D. Gao, „Anti-icing superhydrophobic coatings“, *Langmuir*, Bd. 25, Nr. 21, S. 12444–12448, 2009.
- [28] H.-G. Rubahn, „Erzeugung und Manipulation von Nanostrukturen“, in *Nanophysik und Nanotechnologie*, Wiesbaden: Vieweg&Teubner Verlag, 2004, S. 18–39.
- [29] C. Antonini, M. Innocenti, T. Horn, M. Marengo, und A. Amirfazli, „Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems“, *Cold Reg. Sci. Technol.*, Bd. 67, Nr. 1–2, S. 58–67, 2011.
- [30] C. Sciancalepore, L. Gemini, L. Romoli, und F. Bondioli, „Study of the wettability behavior of stainless steel surfaces after ultrafast laser texturing“, *Surf. Coat. Technol.*, Bd. 352, S. 370–377, 2018.
- [31] A. Vicente *u. a.*, „Icephobic and Anticorrosion Coatings Deposited by Electrospinning on Aluminum Alloys for Aerospace Applications“, *Polymers*, Bd. 13, Nr. 23, S. 1–28, 2021, doi: 10.3390/polym13234164.
- [32] D. Bottone, V. Donadei, H. Niemelä, H. Koivuluoto, und S. Seeger, „Coral-like silicone nanofilament coatings with extremely low ice adhesion“, *Sci. Rep.*, Bd. 11, Nr. 20427, S. 1–12, 2021.
- [33] V. Lang, T. Roch, und A. Lasagni, „High-Speed Surface Structuring of Polycarbonate Using Direct Laser Interference Patterning: Toward 1m 2min–1 Fabrication Speed Barrier“, *Adv. Eng. Mater.*, Bd. 18, Juni 2016, doi: 10.1002/adem.201600173.

- [34] J. Sládek, Y. Levy, T. J.-Y. Derrien, Z. Bryknar, und N. M. Bulgakova, „Silicon surface patterning by regular stripes of laser-induced periodic surface structures“, *Appl. Surf. Sci.*, Bd. 605, S. 1–8, 2022, doi: 10.1016/j.apsusc.2022.154664.
- [35] Z. Fang *u. a.*, „Design of Metal-Based Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces (SLIPSs) with Effective Liquid Repellency Achieved with a Femtosecond Laser“, *Micromachines Basel*, Bd. 13, Nr. 8, S. 1–10, 2022.
- [36] K. Garasz *u. a.*, „The Effect of Process Parameters in Femtosecond Laser Micromachining“, *Bulg J Phys*, Bd. 43, S. 110–120, 2016.
- [37] A. Cunha, V. Oliveira, und R. Vilar, „11 - Ultrafast laser surface texturing of titanium alloys“, in *Laser Surface Modification of Biomaterials*, R. Vilar, Hrsg., Woodhead Publishing, 2016, S. 301–322. doi: 10.1016/B978-0-08-100883-6.00011-3.
- [38] laser4surf, „Comparing laser patterning of submicron structures into metal“, *laser4surf.eu*, 2023. <https://www.laser4surf.eu/results/>
- [39] R. Fürbacher, G. Liedl, und S. Murzin, „Experimental study of spatial frequency transition of laser induced periodic surface structures“, *J. Phys. Conf. Ser.*, Bd. 1745, S. 012017, Feb. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1745/1/012017.
- [40] K. Ahmmed, C. Grambow, und A. Kietzig, „Fabrication of micro/nano structures on metals by femtosecond laser micromachining“, *Micromachines*, Bd. 5, Nr. 4, Nov. 2014, doi: 10.3390/nano9121789.
- [41] R. Fürbacher, G. Liedl, und A. Otto, „Fast transition from hydrophilic to superhydrophobic, icephobic properties of stainless steel samples after femtosecond laser processing and exposure to hydrocarbons“, *12th CIRP Conf. Photonic Technol. LANE 2022*, Bd. 111, S. 643–647, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.08.016.
- [42] C. Kunz, „Selektive Herstellung multifunktionaler Oberflächen mittels laser-induzierter periodischer Oberflächenstrukturen (LIPSS)“, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, 2021.
- [43] C. Neinhuis und W. Barthlott, „Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces“, *Ann. Bot.*, Bd. 79, Nr. 6, S. 667–677, 1997.
- [44] W. Barthlott und C. Neinhuis, „Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces“, *Planta*, Bd. 202, S. 1–8, 1997.
- [45] M. Ran, W. Zheng, und H. Wang, „Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review“, *Mater. Sci. Technol.*, Bd. 35, Jan. 2019, doi: 10.1080/02670836.2018.1560985.
- [46] S. Kamps, „Untersuchungen und Herstellung von hydrophoben und superhydrophoben Beschichtungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs durch dauerhafte Tropfenkondensation“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2012.
- [47] M. Khodaei, „Introductory Chapter: Superhydrophobic Surfaces-Introduction and Applications“, in *Superhydrophobic Surfaces-Fabrications to Practical Applications*, X. Chen, H. Li, und M. Khodaei, Hrsg., Rijeka: IntechOpen, 2019.
- [48] R. N. Wenzel, „Resistance of solid surfaces to wetting by water“, *Ind. Eng. Chem.*, Bd. 28, Nr. 8, S. 988–994, 1936, doi: 10.1021/ie50320a024.
- [49] S. Jung, M. Dorrestijn, D. Raps, A. Das, C. Megaridis, und D. Poulikakos, „Are superhydrophobic surfaces best for icephobicity?“, *Langmuir*, Bd. 27, Nr. 6, S. 3059–3066, 2011.

- [50] R. Menini und M. Farzaneh, „Advanced icephobic coatings“, *J. Adhes. Sci. Technol.*, Bd. 25, Nr. 9, S. 971–992, 2011.
- [51] V. Vercillo u. a., „Design rules for laser-treated icephobic metallic surfaces for aeronautic applications“, *Adv. Funct. Mater.*, Bd. 30, Nr. 16, S. 1910268, 2020.
- [52] H. Sojoudi, M. Wang, N. Boscher, G. McKinley, und K. Gleason, „Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces“, *Soft Matter*, Bd. 12, Nr. 7, S. 1938–1963, 2016.
- [53] Z. Zhao, H. Chen, X. Liu, H. Liu, und D. Zhang, „Development of high-efficient synthetic electric heating coating for anti-icing/de-icing“, *Surf. Coat. Technol.*, Bd. 349, S. 340–346, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.011.
- [54] X. Wu, V. V. Silberschmidt, Z. Hu, und Z. Chen, „When superhydrophobic coatings are icephobic: Role of surface topology“, *Surf. Coat. Technol.*, Bd. 358, S. 207–214, 2019.
- [55] A. Féat, W. Federle, M. Kamperman, und J. Gucht, „Coatings preventing insect adhesion: An overview“, *Prog. Org. Coat.*, Bd. 134, 2019, doi: 10.1016/j.porgcoat.2019.05.013.
- [56] M. Villegas, Y. Zhang, N. Abu Jarad, L. Soleymani, und T. F. Didar, „Liquid-Infused Surfaces: A Review of Theory, Design, and Applications“, *ACS Nano*, Bd. 13, Nr. 8, S. 8517–8536, 2019.
- [57] Y. Fang, J. Yong, Y. Cheng, Q. Yang, X. Hou, und F. Chen, „Liquid-Infused Slippery Stainless Steel Surface Prepared by Alcohol-Assisted Femtosecond Laser Ablation“, *Adv. Mater. Interfaces*, Bd. 8, Nr. 5, S. 1–8, 2021.
- [58] P. Wilson u. a., „Inhibition of ice nucleation by slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS)“, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Bd. 15, Nr. 2, S. 581–585, 2013.
- [59] D. Tripathi, P. Ray, A. Singh, V. Kishore, und S. Singh, „Durability of Slippery Liquid-Infused Surfaces: Challenges and Advances“, *Coatings*, Bd. 13, Nr. 6, 2023, doi: 10.3390/coatings13061095.
- [60] L. Boinovich, E. Chulkova, K. Emelyanenko, A. Domantovsky, und A. Emelyanenko, „The mechanisms of anti-icing properties degradation for slippery liquid-infused porous surfaces under shear stresses“, *J. Colloid Interface Sci.*, Bd. 609, S. 260–268, März 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2021.11.169.
- [61] R. Dohlus, *Lasertechnik*, 1. Aufl. Berlin, München, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co.KG (Verlag), 2015.
- [62] M. Stumpf, „Pulsformierung in modengekoppelten Faseroszillatoren“, Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, 2005.
- [63] D. Schimpf, „Pulse-shaping strategies in short-pulse fiber amplifiers“, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, 2010.
- [64] K. Fritsch, *Modenkopplung mit hochdispersiven Spiegeln und neuen nichtlinearen Vielschicht-Beschichtungen*. in BestMasters. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2018.
- [65] R. Trebino, „Ultrafast Optics Course, Puls generation“, Georgia Institute of Technology, 12. Oktober 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://frog.gatech.edu/talks.html>
- [66] M. Hornung, „Mosaik-Gitter-Kompressor für Femtosekunden-Laserimpulse hoher Energie“, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, 2010.
- [67] M. Eichhorn, E. Zscherpel, und F. Zocholl, „Erzeugung von kurzen und ultrakurzen Pulsen“, *Laserphysik*, Berlin / Heidelberg: Springer, 2012.

- [68] Z. Bor und B. Racz, „Group velocity dispersion in prisms and its application to pulse compression and travelling-wave excitation“, *Opt. Commun. J. Devoted Rapid Publ. Contrib. Field Opt. Interact. Light Matter*, Bd. 54, Nr. 3, S. 165–170, 1985.
- [69] M. Fermann, A. Galvanauskas, und G. Sucha, *Ultrafast lasers : technology and applications*, Bd.1, Optical engineering. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [70] M. Born und E. Wolf, *Principles of Optics*, 7. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108769914.
- [71] Y. Cheng, „Optical Isolators, Circulators“, in *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, R. Meyers, Hrsg., New York: Academic Press, 2003, S. 381–394. doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00527-5.
- [72] Airfoil Tools, „NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il)“, *airfoiltools.com*, 2023. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- [73] Porex Filtration Group, „Poröse Fasern“, *porox.com*, 2023. <https://www.porex.com/de/worin-sich-unsere-technologie-unterscheidet/poroese-fasern/>
- [74] V. Brotan, O. Fergani, K. Sorby, und T. Welo, „Mechanical properties of biocompatible 316 l steel rhombic dodecahedron lattice structures“, in *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, Austin, Texas, 2016.
- [75] L. Xiao, W. Song, C. Wang, H. Liu, H. Tang, und J. Wang, „Mechanical behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti–6Al–4V lattice structure“, *Mater. Sci. Eng. A*, Bd. 640, S. 375–384, 2015.
- [76] S. Babae, B. H. Jahromi, A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, und A. Vaziri, „Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron cellular structures“, *Acta Mater.*, Bd. 60, S. 2873–2885, 2012.
- [77] G. Paolin, „Entwicklung eines Prüfstands zur Untersuchung der Vereisungseigenschaften von laserstrukturierten Oberflächen“, Diplomarbeit, Wien, 2022.
- [78] Y. Jung und B. Bhushan, „Dynamic Effects of Bouncing Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces“, *Langmuir*, 2008, <https://doi.org/10.1021/la8003504>
- [79] M. Reyssat und F. Marty, „Bouncing transitions on microtextured materials“, *Europhys. Lett.*, Bd. 74 (2), S. 306–312, 2006. doi: 10.1209/epl/i2005-10523-2
- [80] A. Cassie und S. Baxter, „Wettability of porous surfaces“, *Transactions of the Faraday Society*, Bd. 40, Royal Society of Chemistry, 1944, doi: 10.1039/tf9444000546

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Strukturierung und die Schwerpunkte der Arbeit.....	4
Abbildung 2 Auswirkungen von Vereisung auf Luftwiderstand und Auftrieb [20]	5
Abbildung 3 Ausbildung von Raueis an der Tragflächenvorderkante [8].....	9
Abbildung 4 Ausbildung von Klareis an der Tragflächenvorderkante [5].....	9
Abbildung 5 Ausbildung von Mischeis an der Tragflächenvorderkante [17].....	10
Abbildung 6 Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Eisarten [5].....	11
Abbildung 7 Entstehende Eisschichtgeometrien an einem NACA-0012 Profil [5]	11
Abbildung 8 Klassisches Enteisen von Passagierflugzeugen am Boden [20].....	13
Abbildung 9 Pneumatische Enteisung an den Tragflächen [13]	14
Abbildung 10 Eingebautes TKS-System an den Tragflächenvorderkanten eines Kleinflugzeuges [24].....	14
Abbildung 11 Verteilung von Enteisungsflüssigkeit durch kleine lasergebohrte Löcher auf der Tragflächenvorderkante [24].....	15
Abbildung 12 Hydrophobe strukturierte Oberfläche aufgebracht auf einem NACA-0012 Profil [18].....	16
Abbildung 13 Strukturierte Oberfläche mittels DILP-Verfahren [18]	18
Abbildung 14 Vergleich der a) direkten Laserablation (DLA) mit der b) direkten Laserinterferenz-Strukturierung (DLIP) mittels UKPL [38].....	19
Abbildung 15 Direkter Vergleich von a) Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL) mit (weißer Pfeil für Polarisationsrichtung) und b) High Spatial Frequency LIPSS (HSFL) [42].....	19
Abbildung 16 SEM-Aufnahme eines Lotusblatts [44].....	20
Abbildung 17 Wechselwirkungen (WW) innerhalb eines Wassertropfens und mit der Benetzungsoberfläche [46].....	21
Abbildung 18 Veranschaulichung Youngsche Gleichung [46].....	22
Abbildung 19 Kontaktwinkel von Wasser auf verschiedenen Oberflächen [46]	22
Abbildung 20 Vergleich Benetzungsmodelle nach a) Wenzel Θ_w und b) Cassie Baxter Θ_{CB} [45].....	23
Abbildung 21 Grundsätzlicher Aufbau von SLIPS [55]	25
Abbildung 22 Abrollverhalten und Herstellung von SHS und SLIPS [12].....	26
Abbildung 23 Vergleich von a) SHS und b) SLIPS für Anti-Icing Anwendungen [12].....	28
Abbildung 24 Laserquelle FEMTOPOWER compact PRO, äußere Strahlführung, und die Verfahrenanlage.....	29
Abbildung 25 Aufbau FEMTOLASER compact Pro [41].....	30
Abbildung 26 Prinzip der Modenkopplung [61]	32

Abbildung 27 Funktionsprinzip einer Kerr-Linse [65].....	32
Abbildung 28 Puls-Formung in Ultrakurzpulslasern [63].....	33
Abbildung 29 Prinzip der GVD veranschaulicht an den Gruppengeschwindigkeit v_{gr} , von rotwelligem (red) und blauwelligem (blue) Licht in einem transparenten Medium [65].....	33
Abbildung 30 Puls-Verstärkung [65]	34
Abbildung 31 Puls-Kompression [65].....	34
Abbildung 32 Funktionsweise Pockelszelle [65]	35
Abbildung 33 Äußere Strahlführung [41]	36
Abbildung 34 Prinzip variabler Abschwächer	36
Abbildung 35 Prinzip optischer Isolator.....	37
Abbildung 36 Wassersäule.....	38
Abbildung 37 Konzeptionierter Versuchsaufbau in a) der isometrischen Ansicht und b) der Schnittansicht im 3D Programm Inventor.....	39
Abbildung 38 Fertig montierter Versuchsaufbau für die in den Kapitel 5.1 und 5.2 beschriebenen Versuche	40
Abbildung 39 Verbindungsteil für die Halterung im Klima-Windkanal a) Konzept und b) montiert auf dem verstellbaren Profilgelenk.....	40
Abbildung 40 Zentrale Anforderungen	41
Abbildung 41 Grundkörper mit Kern ohne aufgespanntes Blech	42
Abbildung 42 NACA-0012 Profil [25].....	43
Abbildung 43 Rippen Ansicht vorne-seitlich.....	44
Abbildung 44 Verbindungsteil Ansicht hinten-seitlich.....	44
Abbildung 45 Endteil Ansicht hinten-seitlich	45
Abbildung 46 Klemmmechanismus Passstift.....	45
Abbildung 47 Materialtyp 180 mit Silikonöl (5, siehe Tabelle 3).....	48
Abbildung 48 Poroplast-Leiste mit tragendem Aluminiumteil	50
Abbildung 49 Poröse Fasern [73].....	51
Abbildung 50 Porex Samples	51
Abbildung 51 Spumix Keramikschaum	52
Abbildung 52 TKS Ice-Protection System [24]	53
Abbildung 53 TKS-Adaption Kern Schnittansicht.....	53
Abbildung 54 TKS-Kern.....	54
Abbildung 55 Rhombische Dodekaeder Einheitszelle aus zwei Winkeln [74].....	54
Abbildung 56 Rhombisches Dodekaeder in Gitter Struktur bei einer Titan-Legierung [75]	55
Abbildung 57 Erste Iteration des Microlattice-Kerns.....	55

Abbildung 58 Zweite Iteration des Microlattice-Kerns.....	56
Abbildung 59 Ausgewählte Kernkonzepte implementiert im Grundsystem mit a) Poroplast-Kern, b) TKS-Adaption und c) Microlattice-Kern.....	58
Abbildung 60 Einzelteile für Zusammenbau.....	59
Abbildung 61 Einlegen des Kernkörpers in die Rippen.....	60
Abbildung 62 Anschrauben Verbindungsteil.....	60
Abbildung 63 Verbinden des Endteils mit dem Verbindungsteil.....	61
Abbildung 64 Montage Klemmen.....	61
Abbildung 65 Fertiger Tragflächenprüfstand mit eingelegter Flachdichtung und Einschraubstutzen ohne eingespanntes Blech.....	62
Abbildung 66 Abmessungen Blech und Flachdichtung.....	62
Abbildung 67 Geometriebestimmung für die Halterung im Klima-Windkanal.....	63
Abbildung 68 Eingebauter Tragflächenprüfstand mit eingespanntem Blech angebracht in der Halterung für den Klima-Windkanal.....	64
Abbildung 69 Mikroskop Reichert Zetopan mit angeschlossener Kamera Nikon D90.....	64
Abbildung 70 Zeiss AxioImager Mikroskop.....	65
Abbildung 71 Kontaktwinkelmessgerät mit Neigungseinheit.....	66
Abbildung 72 Wesentliche Bestandteile des Klima-Windkanals.....	67
Abbildung 73 Schematischer Aufbau des Klima-Windkanals.....	67
Abbildung 74 Herstellung der Test-Matrix für die Perforationen.....	68
Abbildung 75 Perforationsmatrix.....	69
Abbildung 76 Aufnahmen der Perforierungen H0.4P500 im a) Hellfeld und b) Dunkelfeld mit Gegenlicht.....	70
Abbildung 77 Aufnahmen der Perforierungen H0.5P500 im a) Hellfeld und b) Dunkelfeld mit Gegenlicht.....	71
Abbildung 78 Aufnahmen der Perforierungen H0.6P350 im a) Hellfeld und b) Dunkelfeld mit Gegenlicht.....	71
Abbildung 79 Verteilung des Silikonöls durch die Perforierungen im Blech.....	72
Abbildung 80 Benetzungsreferenz von Silikon-Öl auf einer LINIEN Oberflächen-Struktur ohne Perforierungen im a) unbenetzten, b) teilbenetzten, und c) benetzten Zustand.....	74
Abbildung 81 Eingebauter Versuchsaufbau für die Anströmversuche im Klima-Windkanal.....	75
Abbildung 82 Benetzungszustände der DIMPLES-Struktur aufgenommen a) direkt nach der Benetzung und b) nach dem Anströmversuch im Klima-Windkanal.....	75
Abbildung 83 Benetzungszustände der LINIEN-Struktur aufgenommen a) direkt nach der Benetzung und b) nach dem Anströmversuch im Klima-Windkanal.....	76
Abbildung 84 Benetzungszustände der LIPSS-Struktur aufgenommen a) direkt nach der Benetzung und b) nach dem Anströmversuch in Klima-Windkanal.....	76

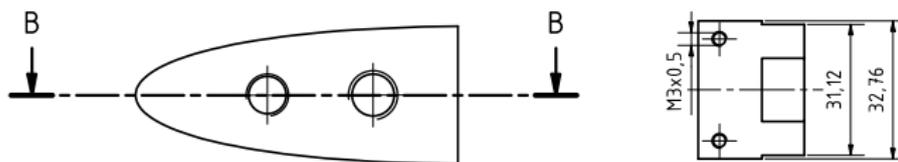
Abbildung 85 Statische Kontaktwinkelmessung an einer unbenetzten LIPSS-Struktur.....	77
Abbildung 86 Kontaktwinkelmessung der DIMPLES-Struktur im a) unbenetzten (Messung 2) und b) benetzten Zustand (Messung 1).....	78
Abbildung 87 Kontaktwinkelmessung der LINIEN-Struktur im a) unbenetzten (Messung 2) und b) benetzten Zustand (Messung 2).....	79
Abbildung 88 Kontaktwinkelmessung der LIPSS-Struktur im a) unbenetzten (Messung 1) und b) benetzten Zustand (Messung 3).....	80
Abbildung 89 Kontaktwinkelmessung einer verunreinigten, benetzten LIPSS-Struktur nach einem Anströmversuch.....	81
Abbildung 90 Bestimmen der geeignetsten Antriebsparameter für Vereisungsversuche im Klima-Windkanal.....	82
Abbildung 91 Aufnahmen nach den Vereisungsversuchen bei a) dem unbehandelten Blech, b) der unbenetzten DIMPLES-Struktur und c) der benetzten DIMPLES-Struktur.....	85
Abbildung 92 Tragflächenprüfstand mit unbehandeltem Blechzuschnitt eingebaut in die Testsektion des Klima-Windkanals.....	86
Abbildung 93 Herstellung der DIMPLES-Struktur auf einem Blechzuschnitt für den Tragflächenprüfstand mittels Femtosekundenlaser.....	86
Abbildung 94 Aufnahmen der Vereisung am Tragflächenprofil am a) unbehandelten Blech und b) benetzten Blech.....	88
Abbildung 95 Benetzung der Oberflächenstruktur durch den Poroplast-Kern nach a) 30 Sekunden und b) zwei Minuten.....	89
Abbildung 96 Aufnahme der Vereisung am Tragflächenprofil mit kontinuierlicher Silikonölversorgung.....	90
Abbildung 97 Bewegung eines gefrierenden Wassertropfens an der Oberflächenstruktur mit kontinuierlicher Versorgung. a) initialer Kontakt des Wassertropfens mit der Oberfläche, b) Ansammlung weiterer Wassertropfen um den initial gefrierenden Wassertropfen und c) weiteres Wachsen der Eisansammlung.....	91
Abbildung 98 Aufnahmen des Vereisungsgrades im direkten Vergleich nach einer Minute bei a) 25% (65-70 km/h) und b) 100% Antriebsleistung (~150 km/h).....	91
Abbildung 99 Gravimetrisch bestimmte Eismasse der Vorversuche (Kapitel 5.3.2.1).....	94
Abbildung 100 Gravimetrisch bestimmte Eismasse am Tragflächenprüfstand (Kapitel 5.3.3).....	95

7.3 Tabellenverzeichnis

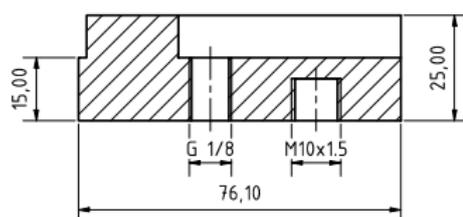
Tabelle 1 Systemspezifikationen FEMTOPOWER compact PRO	31
Tabelle 2 Eigenschaften der verwendeten Fluiden für die Absorptionsversuche.....	47
Tabelle 3 Ergebnisse des Absorptionsverhalten bei den Poroplast-Proben.....	47
Tabelle 4 Volumendurchfluss Poroplast	49
Tabelle 5 Porex Materialspezifikationen.....	52
Tabelle 6 Parameter für die Rhombische Dodekaeder Einheitszelle.....	56
Tabelle 7 Zusammenfassung Kernkonzepte.....	57
Tabelle 8 Stückliste Tragflächenprüfstand.....	59
Tabelle 9 Zusammenfassung Perforationssparameter und Notation für die Durchlichtmikroskopie	70
Tabelle 10 Erforderlicher Druck zur Förderung und Verteilung des Silikonöls ermittelt an den perforierten Blechen.....	72
Tabelle 11 Bearbeitungsparameter der hergestellten Oberflächenstrukturen mittels Femtosekundenlaser.....	73
Tabelle 12 Parameter für den Klima-Windkanal während der Anströmversuche.....	75
Tabelle 13 Referenzwerte für eine unbehandelte, unbenetzte Stahlblechprobe	77
Tabelle 14 Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung der DIMPLES Struktur in verschiedenen Benetzungszuständen	78
Tabelle 15 Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung der LINIEN-Struktur in verschiedenen Benetzungszuständen	79
Tabelle 16 Ergebnisse der Kontakt- und Abrollwinkelmessung der LIPSS Struktur in verschiedenen Benetzungszuständen	80
Tabelle 17 Zusammenfassung der Kontakt- und Abrollwinkelergebnisse aller Strukturen.....	81
Tabelle 18 Parameter für die Vereisungsversuche im Klima-Windkanal	83
Tabelle 19 Ergebnisse der gravimetrischen Messung vor und nach Vereisung der Referenz und DIMPLES-Proben in verschiedenen Zuständen	84
Tabelle 20 Ergebnisse der gravimetrischen Messung des unbehandelten Stahlblechs und der benetzten DIMPLES-Struktur am Tragflächenprüfstand.....	87
Tabelle 21 Direkter Vergleich der Vereisungsparameter bei den Versuchen mit kontinuierlicher Silikonölaufuhr	92

A. Anhang

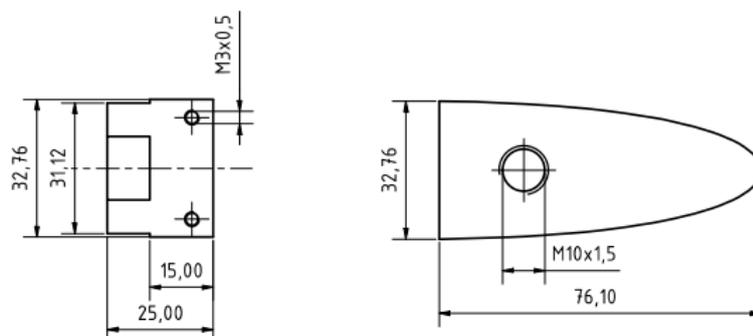
Teil A



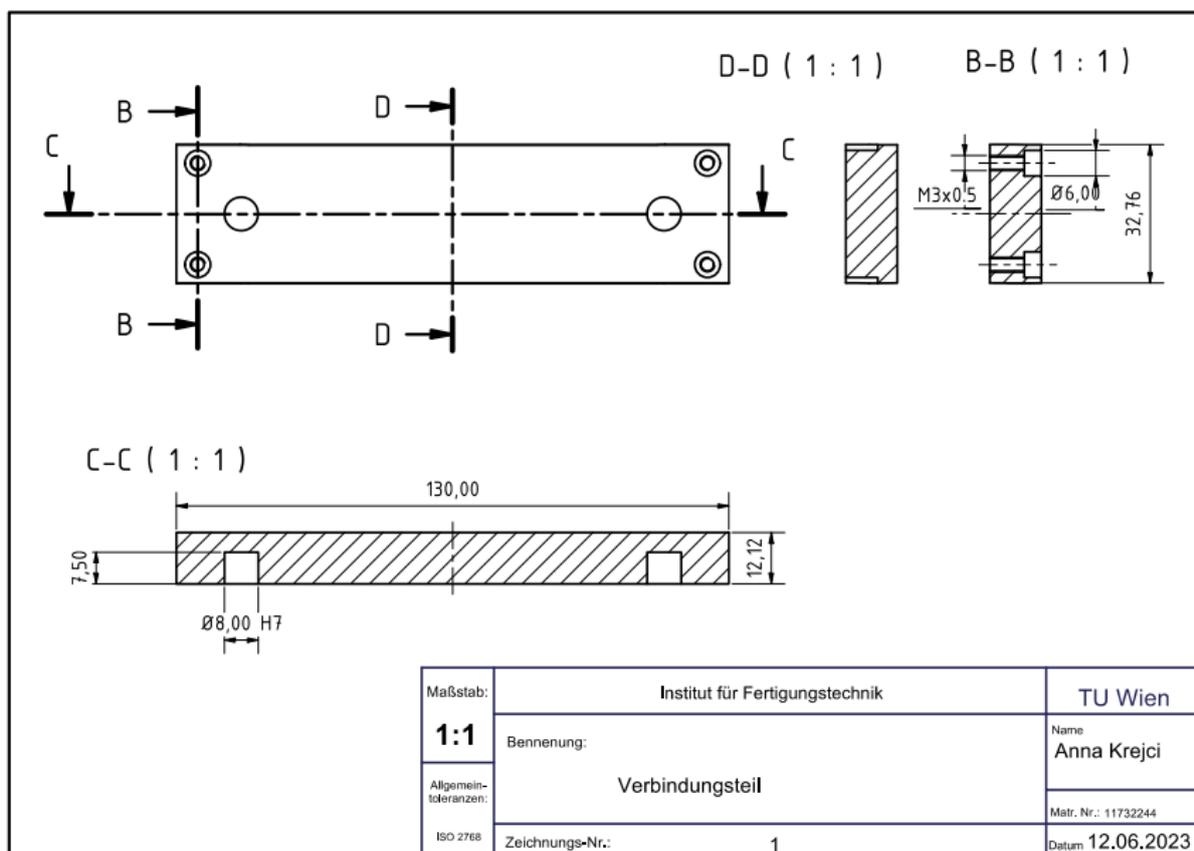
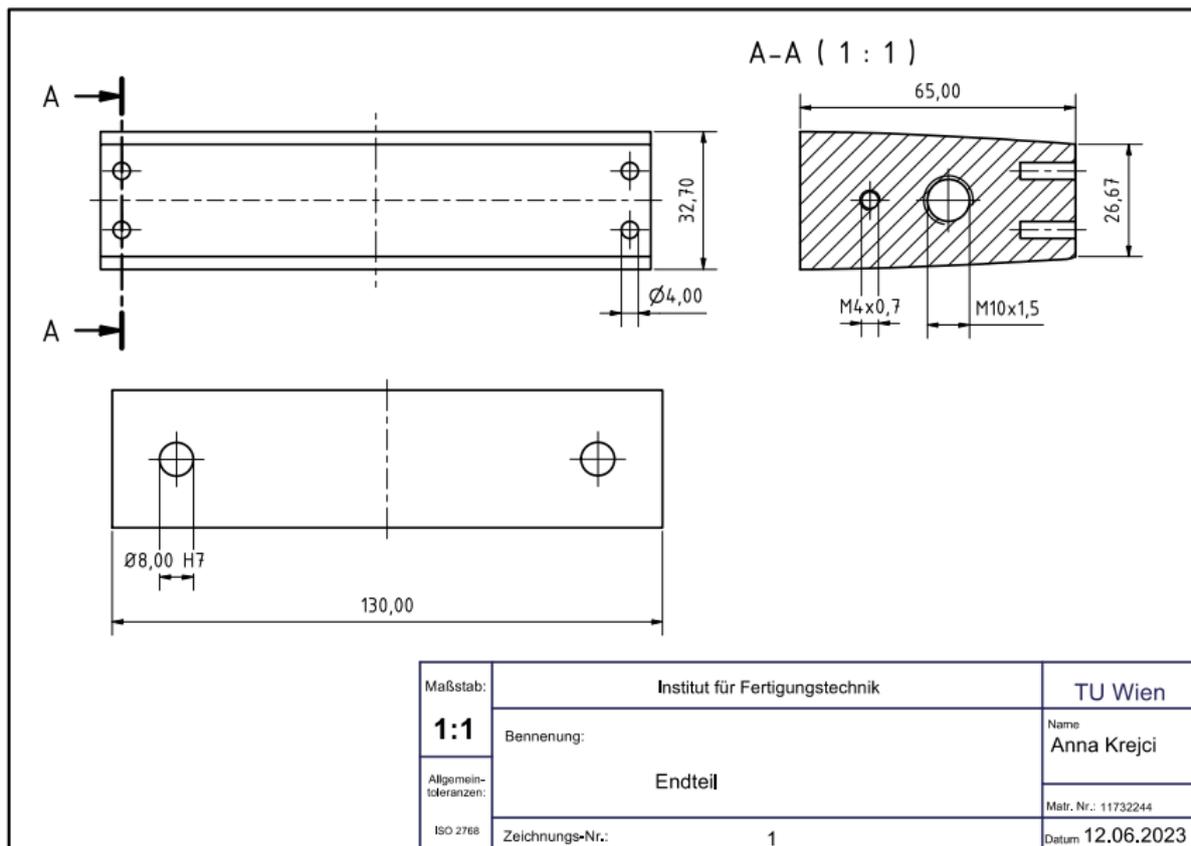
B-B (1 : 1)



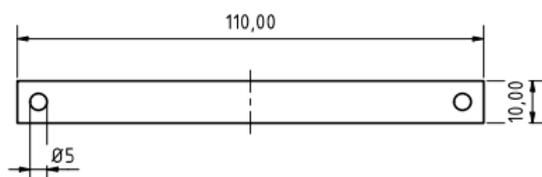
Maßstab:	Institut für Fertigungstechnik	TU Wien
1:1	Benennung: Rippe links mit Ölzufuhr	Name Anna Krejci
Allgemeintoleranzen: ISO 2768	Zeichnungs-Nr.: 1	Matr. Nr.: 11732244
		Datum 12.06.2023



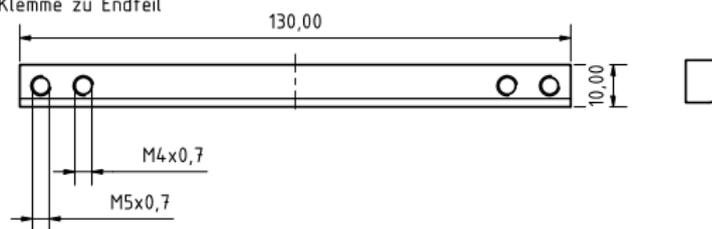
Maßstab:	Institut für Fertigungstechnik	TU Wien
1:1	Benennung: Rippe rechts ohne Ölzufuhr	Name Anna Krejci
Allgemeintoleranzen: ISO 2768	Zeichnungs-Nr.: 1	Matr. Nr.: 11732244
		Datum 12.06.2023



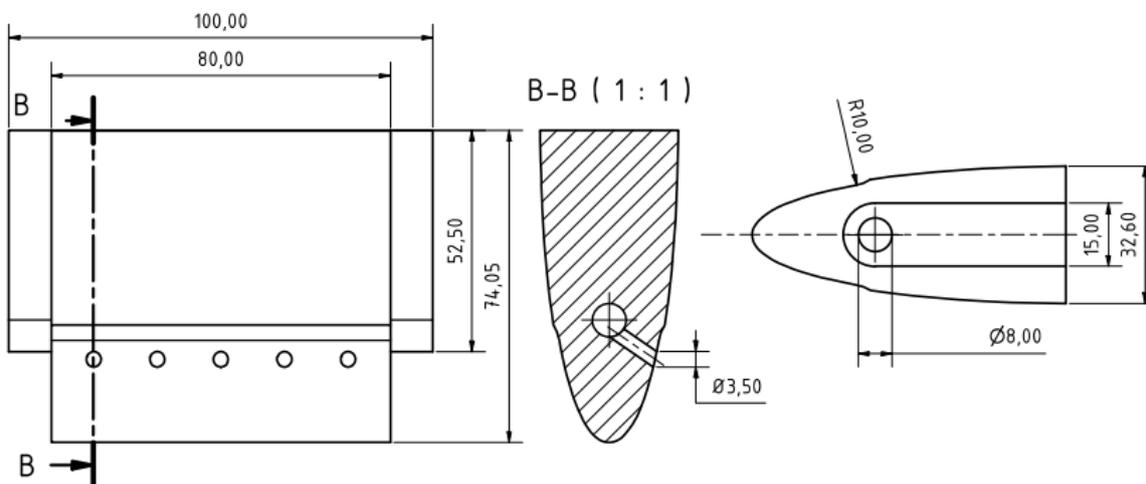
Klemme zu Folie



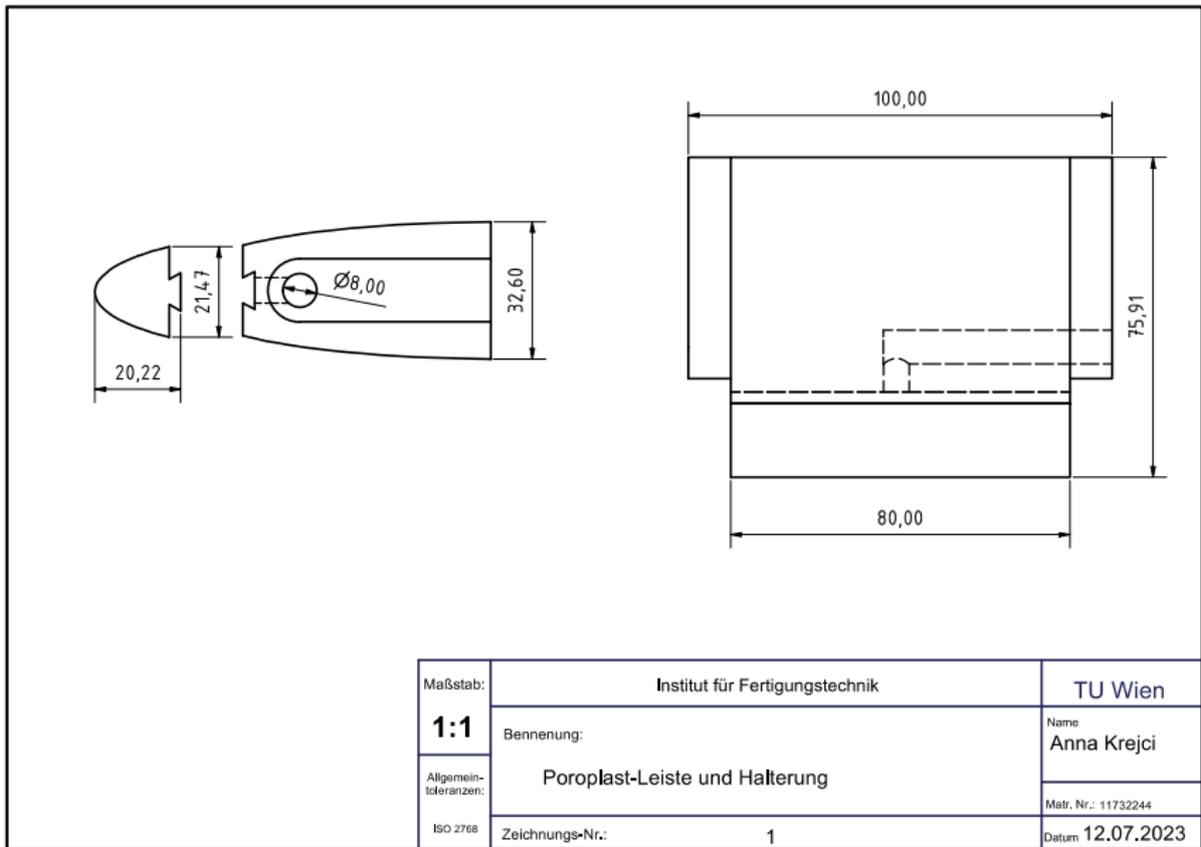
Klemme zu Endteil



Maßstab:	Institut für Fertigungstechnik	TU Wien
1:1	Benennung:	Name Anna Krejci
Allgemeintoleranzen:	Klemmen (Klemme zu Folie und Klemme zu Endteil)	Matr. Nr.: 11732244
ISO 2768	Zeichnungs-Nr.: 1	Datum 12.06.2023



Maßstab:	Institut für Fertigungstechnik	TU Wien
1:1	Benennung:	Name Anna Krejci
Allgemeintoleranzen:	TKS-Kern	Matr. Nr.: 11732244
ISO 2768	Zeichnungs-Nr.: 1	Datum 12.06.2023



Teil B

Datum:	Seitenanzahl:	Dateiname:
02.10.2023 18:44:36	1	D:\20231002_Dimple_80x60mm_Krejci_WT.pgm


```

//Output PockelsCell
#DEFINE M8 SAO{0}.X = 5
#DEFINE M9 SAO{0}.X = 0

//Variables
DVAR $columncount as integer
DVAR $linecount as integer
DVAR $hatch as integer
DVAR $hatchP as integer
DVAR $verticalwidth as integer
DVAR $horizontalwidth as integer
DVAR $shots as integer
DVAR $shotsP as integer
DVAR $pause as integer
DVAR $pauseP as integer

DVAR $XStart as integer
DVAR $YStart as integer
DVAR $ZStart as integer

DVAR $XStartC_UpLeft as integer
DVAR $YStartC_UpLeft as integer
DVAR $ZFocC_UpLeft as integer

DVAR $XStartC_DownLeft as integer
DVAR $YStartC_DownLeft as integer
DVAR $ZFocC_DownLeft as integer

DVAR $XStartC_DownRight as integer
DVAR $YStartC_DownRight as integer
DVAR $ZFocC_DownRight as integer

DVAR $Zcorr_Xhatch as integer
DVAR $Zcorr_Yhatch as integer

DVAR $Zcorr_XhatchP as integer
DVAR $Zcorr_YhatchP as integer

//Parameters
$hatch = 0.05
$verticalwidth = 80
$horizontalwidth = 60
$shots = 30
$pause = $shots/1000

//Start Parameters for Structuring
$XStart = 318
$YStart = 190
$ZStart = 37.12

//Z-Correction in X- and Y-direction
$XStartC_UpLeft = 318
$YStartC_UpLeft = 190
$ZFocC_UpLeft = 37.12

$XStartC_DownLeft = 318
$YStartC_DownLeft = 110
$ZFocC_DownLeft = 37.5

$XStartC_DownRight = 380
$YStartC_DownRight = 110
$ZFocC_DownRight = 37.56

//Calc
$Zcorr_Xhatch = (ABS($ZFocC_DownRight - $ZFocC_DownLeft)
) / ABS ($XStartC_DownRight - $XStartC_DownLeft) * $hatch
//$Xcorr_mm = ($ZEnd - $ZStart) / ($YStart - $YEnd)

$Zcorr_Yhatch = (ABS($ZFocC_DownLeft - $ZFocC_UpLeft) / A
BS ($YStartC_DownLeft - $YStartC_UpLeft) ) * $hatch
//$Ycorr_mm = ($ZEnd - $ZStart) / ($YStart - $YEnd)

//G-Code
G90
G01 X$XStart Y$YStart Z$ZStart F50
G91

G114
$columncount = 0
$linecount = 0

WHILE $columncount < $verticalwidth/$hatch

    WHILE $linecount < $horizontalwidth/$hatch
        M8
        G04 F$pause
        M9
        G01 X$hatch Z$Zcorr_Xhatch F3
        $linecount = $linecount + 1
    WEND

G01 X-($linecount*$hatch) Y-$hatch Z- (($linecount*$Zcorr_Xhatch)-$Zcorr_Yhatch) F50 //auf Vorzeichen achten, gemÄrÄY Z-Werte
$columncount = $columncount + 1
$linecount = 0

WEND

M1

//Perforierung
$hatchP = 1.0 //Bahnabstand mm
$shotsP = 500
$pauseP = $shots/1000

$Zcorr_XhatchP = (ABS($ZFocC_DownRight - $ZFocC_DownLeft) / ABS ($XStartC_DownRight - $XStartC_DownLeft) ) * $hatchP
//$Xcorr_mm = ($ZEnd - $ZStart) / ($YStart - $YEnd)

$Zcorr_YhatchP = (ABS($ZFocC_DownLeft - $ZFocC_UpLeft) / ABS ($YStartC_DownLeft - $YStartC_UpLeft) ) * $hatchP
//$Ycorr_mm = ($ZEnd - $ZStart) / ($YStart - $YEnd)

G90
G01 X$XStart Y$YStart Z$ZStart F50
G91

$columncount = 0
$linecount = 0

WHILE $columncount < $verticalwidth/$hatchP

    WHILE $linecount < $horizontalwidth/$hatchP
        M8
        G04 F$pauseP
        M9
        G01 X$hatchP Z$Zcorr_XhatchP F10
        $linecount = $linecount + 1
    WEND

G01 X-($linecount*$hatchP) Y-$hatchP Z- (($linecount*$Zcorr_XhatchP)-$Zcorr_YhatchP) F50 //auf Vorzeichen achten, gemÄrÄY Z-Werte
$columncount = $columncount + 1
$linecount = 0

WEND

M2
M30

```