

# Energieforschungsprogramm

Publizierbarer

Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

25/09/2023

# Projekttitle: NICE

Projektnummer: 871733

# Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	XX. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/04/2019
Projektende	30/06/2023
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	51 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	TU Wien, Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien
AnsprechpartnerIn	ao. Univ. Prof. DI Dr. Gerhard Liedl
Postadresse	Getreidemarkt 9, 1060 Wien
Telefon	+43 1 58801 311610
Fax	
E-mail	gerhard.liedl@tuwien.ac.at
Website	<a href="https://www.nice-project.at">https://www.nice-project.at</a>

## NICE

Verminderung der Eisbildung durch Nanostrukturierung von Oberflächen mit einem Ultrakurzpuls laser

**AutorInnen:**

IFT TU Wien: Gerhard Liedl, Roland Fürbacher

Energiewerkstatt: Martin Höher

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	6
2.1	Aufgabenstellung .....	6
2.2	Schwerpunkte des Projektes .....	7
2.2.1	Projektspezifische Fragestellungen .....	7
2.3	Einordnung in das Programm .....	8
2.3.1	Ziel 1 – Grand Challenges - Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen .....	8
2.3.2	Ziel 2 – Österreichs Technologieführerschaft schafft Zugang zu internationalen Märkten ...	8
2.3.3	Ziel 3 – Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich .....	8
2.4	Verwendete Methoden .....	9
2.5	Aufbau der Arbeit .....	10
3	Inhaltliche Darstellung .....	11
3.1	Mikro- und Nanostrukturierung von Proben .....	11
3.2	Entwicklung der Simulationsmodelle .....	18
3.3	Feldversuche .....	19
3.3.1	Eingesetzte Komponenten im statischen Feldversuch .....	21
3.3.2	Eingesetzte Komponenten des dynamischen Feldversuchs .....	22
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	23
4.1	Ergebnisse der Experimente zur Mikro- und Nanostrukturierung .....	23
4.2	Simulationsergebnisse .....	27
4.3	Ergebnisse aus den Feldversuchen .....	31
4.3.1	Statische Feldversuche .....	31
4.3.2	Dynamische Feldversuche .....	32
5	Ausblick und Empfehlungen .....	33
6	Literaturverzeichnis .....	35
7	Anhang .....	36
8	Kontaktdaten .....	36

# Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus **mindestens 25 Seiten**. Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden.

Vorrangiges Ziel der publizierbaren Berichte ist die Darstellung der wesentlichen Projektergebnisse.

## Textformat

- Papierformat: A4 Hochformat
- Linker und rechter Rand: 2,5 cm
- Schriftformatierung: Arial, 11 Punkt, Zeilenabstand 1,3-fach
- Schriftformatierung für Tabellen: Arial, 10 Punkt
- Fußzeile: Seitennummerierung
- Definition der Überschriften bis zur 3. Ebene
  - Überschrift  
Schriftformat: Arial, 16 Punkt und 1: Fett  
Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
  - Überschrift  
Schriftformat: Arial, 14 Punkt und 2: Fett  
Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
  - Überschrift  
Schriftformat: Arial, 11 Punkt und 3: Fett  
Absatzformat: Abstand vor: 12 Punkt, Abstand nach: 6 Punkt

## 2 Einleitung

### 2.1 Aufgabenstellung

In den letzten Jahren sind die bereits vor vielen Jahren vereinbarten Klimaziele immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit getreten und es werden unterschiedliche Maßnahmen, die die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern verringern helfen sollen, diskutiert und teilweise auch umgesetzt. Dazu gehört auch der Ausbau erneuerbarer Energiequellen, wie etwa der Windkraft.

Diese Rahmenbedingungen führen nicht nur in Österreich, in Europa, sondern auch global betrachtet in vielen anderen Regionen zur Erschließung von neuen Standorten. So sollen beispielsweise bis 2030 etwa 32 % des in der EU verbrauchten Stromes aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt werden. Im Zuge des Ausbaus von Windkraftanlagen (WKA) müssen daher zunehmend auch kältere Regionen erschlossen werden und es wird ein jährlicher Ausbau in den kalten Klimaregionen Europas von mehr als 6 % prognostiziert. In Österreich alleine soll die installierte Leistung der WKA bis 2030 von aktuell 3,3 GW auf 7,3 GW ausgebaut werden. Auf Grund dieser Ziele wird die Zahl an WKA in exponierten Lagen deutlich ansteigen [1]–[4].

Allerdings ist durch die rauen Witterungsbedingungen an solchen Standorten vermehrt mit Vereisung von WKA zu rechnen. Damit verbunden sind betriebliche Einschränkungen und potentielle Risiken für Mensch und Anlage. Durch die dynamischen Bedingungen am Rotorblatt kann akkumuliertes Eis abplatzen (Shedding) und im Umkreis von einigen hundert Metern Personen- und Sachschaden verursachen [5]. Gleichzeitig stört anhaftendes Eis die Aerodynamik der Rotorblätter und reduziert so die Effizienz der betroffenen Anlagen.

In der Betriebsführung von Windkraftanlagen unter Vereisungsbedingungen sind also die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Risiko für Personen
- Ertragsverlust
- Belastung der Anlage

Der kritischste Punkt stellt dabei klar das Risiko, das von herabfallenden oder abgeworfenen Eisstücken für Personen in der Nähe der Anlage ausgeht, dar. Zudem kommt dem Eisfallrisiko für Personen auch in Hinsicht auf die öffentliche Akzeptanz von Windkraftanlagen eine besondere Bedeutung zu. Aus diesen Gründen muss eine vereiste Windkraftanlage im Regelfall – folgend der der jeweiligen nationalen Gesetzgebung – abgeschaltet werden, sobald ein Eisansatz vorliegt. Es kann also einerseits durch die geänderte Aerodynamik, als auch andererseits durch das Abschalten der Anlage zu erheblichen Ertragseinbußen kommen [6], [7].

Ein Verhindern des Vereisens bzw. einer Verkürzung der Dauer einer bestehenden Vereisung könnte daher den Ertrag von WKA erhöhen. Existierende Maßnahmen zur Verminderung einer Eisbildung, wie etwa aktive Systeme (z.B. Thermisch durch Heizen) und passive Systeme (Chemikalien) sind oft nur bedingt wirtschaftlich oder an den meist entlegenen Standorten nicht praktikabel einsetzbar und können zudem eine Umweltgefährdung darstellen [8], [9]. Eine andere Möglichkeit stellen hydrophobe Oberflächen dar, die auch eisabweisend sein können, was auch bereits mehrfach gezeigt wurde [10]–[12]. Im Rahmen dieses Projekts sollte der Zusammenhang zwischen dem hydrophoben Verhalten von

Oberflächen, die durch Laserstrukturierung verändert wurden und der Eisbildung bzw. Eisanhaftung untersucht werden. Mit Hilfe eines Ultrakurzpulslasers werden gezielt Nanostrukturen auf technischen Oberflächen erzeugt, um damit das Anhaften von Schnee/Eis zu vermeiden, zu erschweren oder das Entfernen von Eisschichten, die sich dennoch auf der Oberfläche gebildet haben können, zu erleichtern. Dazu werden Proben aus unterschiedlichen Werkstoffen mit Hilfe eines Ultrakurzpulslasers (UKPL) mit unterschiedlichen Nanostrukturen versehen.

## 2.2 Schwerpunkte des Projektes

Vereisung auf einem Rotorblatt kann entweder bei Niederschlag wie gefrierendem Regen oder Schneefall, oder aus Wolken (bzw. Nebel) heraus, bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auftreten. Eisbildung kann aber auch aus Schneeanlagerungen heraus erfolgen wenn sich Schnee mit einem bestimmten Feuchtigkeitsgehalt an Oberflächen ansammelt. Das Vereisen von Oberflächen kann insgesamt in einem sehr weiten Temperatur-, Wind- und Luftfeuchtigkeitsbereich stattfinden, beispielsweise kann vorhandene Luftfeuchtigkeit auf einer Oberfläche Eis bilden (Reif), oder gefrierende Tröpfchen können sich anlagern, etc. [9], [13], [14]. Ist die Verweilzeit eines Tropfens auf einer Oberfläche kurz, so sinkt natürlich auch die Wahrscheinlichkeit des Anfrierens. Durch superhydrophobe Oberflächen soll daher das Benetzen vermindert und damit auch die Eisbildung insgesamt vermindert werden. Wir wollen daher einerseits die Flexibilität der Lasermaterialbearbeitung nutzen, um unterschiedliche Strukturen mit unterschiedlichen hydrophoben Eigenschaften zu erzeugen, andererseits wollen wir zu einem besseren Prozessverständnis mit Hilfe von Simulationen gelangen und drittens planen wir Untersuchungen zur Lebensdauer der durch Lasereinwirkung erzeugten Nanostrukturen. Durch das verbesserte Prozessverständnis erwarten wir auch Vorteile bei der Auswahl optimaler, hydrophober Strukturen für bestimmte Umweltbedingungen.

### 2.2.1 Projektspezifische Fragestellungen

- Zusammenhang zwischen den Oberflächeneigenschaften nanostrukturierter Oberflächen und ihrem Vereisungsverhalten: Nanostrukturierte Oberflächen von Proben können hydrophiles aber auch hydrophobes Verhalten zeigen. Gezielte Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf das Vereisungsverhalten stehen noch aus und sollen Anhaltspunkte für optimale „eisphobe“ Strukturen unterschiedlicher Werkstoffe, die unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt sind, liefern.
- Entwicklung eines Modells des Benetzungsverhaltens von Oberflächen zur Optimierung der Nanostrukturierung: Um den experimentellen Aufwand zu minimieren, sollen das bereits am Institut existierende Modell des Benetzungsverhaltens von Oberflächen auf nanostrukturierte Oberflächen erweitert werden. Damit sollen in weiterer Folge optimale Strukturen, die zur Erzielung bestimmter Oberflächeneigenschaften erforderlich sind, aus der Simulation bestimmt werden. Im Rahmen dieser Aufgabenstellung sind eine Reihe von Fragen zur Modellierung der physikalischen Gesetze und der Werkstoffparameter im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich zu lösen.
- Vereisung nanostrukturierter Proben unter realen Bedingungen: In der Regel treten sehr komplexe Wechselwirkungen zwischen den Umweltbedingungen und der Oberfläche der Proben auf. Diese Wechselwirkungen können nur bedingt im Labor nachgestellt werden. Durch Feldversuche sollen

einerseits Laborergebnisse validiert und andererseits neue Erkenntnisse zum Vereisen von Oberflächen gewonnen werden. Die Feldversuche werden dazu an einem nachweislich stark vereisungsgefährdeten Standort, an dem unterschiedlichen Vereisungsarten vorkommen, durchgeführt.

- Aussagen über die Lebensdauer der Nanostruktur unter realen Bedingungen: Die Lebensdauer von Nanostrukturen ist ein maßgeblicher Faktor bei der Bewertung der Eignung dieser Technologie zur Verminderung/Vermeidung einer Eisbildung bei WKA. Einflüsse wiederholten Vereisens bzw. Abtauens, Wind und Niederschlag, etc. auf die Nanostrukturen sind derzeit noch völlig unklar. Durch den Einsatz von Proben in Feldversuchen und die Auswertung der Oberflächenstrukturen vor- als auch nach der Exposition im Freien sollen auch Aussagen über die Haltbarkeit derartiger Strukturen gewonnen werden.

## 2.3 Einordnung in das Programm

Hinsichtlich der übergeordneten Ausschreibungsziele erfüllt das geplante Vorhaben mehrere Anforderungen.

### 2.3.1 Ziel 1 – Grand Challenges - Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen

Bereits Ende 2016 konnte mit dem Betrieb der in Österreich aktuell installierten Windkraftleistung der jährliche Ausstoß von rund vier Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden werden, was etwa fünf Prozent der in Österreich emittierten CO<sub>2</sub> Emissionen entspricht.

Auf Grundlage der für das Jahr 2020 erwarteten Perspektive von 500 MW Windkraftleistung an Standorten mit starken Vereisungseinflüssen können jährlich etwa 1,25 Mrd. kWh Strom erzeugt und 750.000 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden. Eine Effizienzsteigerung dieser Anlagen um 2% würde die CO<sub>2</sub> Einsparung um 15.000 Tonnen/Jahr erhöhen. Weitere 7.500 Tonnen Einsparung können durch die Effizienzsteigerung bei Anlagen an weniger vereisungsgefährdeten Standorten erwirtschaftet werden[2], [15].

### 2.3.2 Ziel 2 – Österreichs Technologieführerschaft schafft Zugang zu internationalen Märkten

Aufgrund der klimatischen Anforderungen werden in Österreich schon seit Jahren Maßnahmen und Technologien zur Eisfreihaltung entwickelt und angewendet. Dadurch konnten sich in Österreich Unternehmen etablieren, deren Tätigkeitsfeld die Bereiche des Cold Climate Betriebs von WKA abdecken (Hersteller von Steuerungen und Sensoren, Gutachter, Planer...). Das geplante Vorhaben wird wesentliche Beiträge zu einem verbesserten Grundlagenverständnis liefern und wird so den österreichischen Unternehmen die Möglichkeit bieten, die Technologieführerschaft zu übernehmen.

### 2.3.3 Ziel 3 – Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich

Die österreichische Windenergiebranche erwirtschaftet mit Errichtung und Betrieb der Anlagen und der Erzeugung von Anlagenkomponenten einen jährlichen Umsatz von etwa 1,5 Mrd. Euro und sichert aktuell rund 5.000 Arbeitsplätze.



Durch die besonderen Anforderungen des Heimmarktes in Bezug auf die klimatischen Herausforderungen in alpinen und voralpinen Lagen und die von Beginn an sehr restriktiven Forderungen in Bezug auf die Betriebssicherheit der Anlagen konnten sich einzelne österreichische Unternehmen eine besondere fachliche Qualifikation aneignen, die durch das gegenständliche Projekt gestärkt und ausgebaut wird.

Vom Projekt wird direkt das Themenfeld 5 / 5.10 Windenergie adressiert. Im Projekt wird die Laserstrukturierung von Oberflächen genutzt, um eine Optimierung von Oberflächen zur Vermeidung von Eisbildung zu erzielen. Simulationen zur Benetzung sowie Feldversuche unter realen Bedingungen dienen zur Erlangung eines besseren Prozessverständnisses als auch zur Überprüfung der Tauglichkeit der von uns erzeugten Oberflächenstrukturen unter möglichst realen Bedingungen.

## 2.4 Verwendete Methoden

Ausgehend von den weiter oben genannten Fragestellungen wurden verschiedene Lösungspfade und Vorgangswesen definiert, durch die die erforderlichen Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen ermöglicht werden sollten. Die Vorgänge der Benetzung von Oberflächen, der Vereisung und dem Anhaften von Eis sind relativ komplex und wir haben sowohl experimentelle Arbeit im Labor, Simulation der Benetzung als auch Feldversuche unter realen Bedingungen vorgesehen, um möglichst umfassende Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen hierarchischen Strukturen, der Benetzung und dem Anhaften von Eis und Schnee zu gewinnen. Dazu werden im Projekt folgende Arbeiten durchgeführt:

- Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Bearbeitungsparameter auf die resultierende Topografie bei unterschiedlichen Werkstoffen. Verschiedene Laserparameter (wie beispielsweise Pulsanzahl, Verfahrgeschwindigkeit, Pulsenergie, Fluenz, u.a.) beeinflussen die erzielten Dimensionen mit dem Laser erzeugter Strukturen. Die Laserstrukturierung von Oberflächen zeichnet sich eben durch besondere Flexibilität aus, beispielsweise können durch die Interferenz von mehreren Strahlen eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturen erzeugt werden, durch Veränderung der Bearbeitungsparameter kann die Periodizität der erzeugten Strukturen verändert werden und damit auch das hydrophobe Verhalten [16]–[18].
- Untersuchung des Einflusses von Strukturen mit unterschiedlicher Periodizität (Mikro- bzw. Nanostrukturen oder mehrstufige hierarchische Strukturen) auf das (super)hydrophobe Verhalten. So müssen hydrophobe Oberflächen nicht notwendigerweise auch eisphob sein [14], [19]. Unterschiedliche Strukturen, von Nano-, Mikro- und hierarchische Strukturen werden gezielt untersucht.
- Gezielte Untersuchungen zum Anhaften von Eis auf unterschiedlich strukturierten Probenoberflächen. Dazu wird u.a. ein Prüfstand gebaut, um die Eisadhäsion unter definierten Bedingungen testen zu können.
- Untersuchung strukturierter Oberflächen im Klimawindkanal unter definierten Bedingungen. Die Untersuchungen erlauben es, einen Zusammenhang zwischen dem hydrophoben Verhalten der Proben und dem Anhaften von Eis herzustellen. Wie schon mehrfach erwähnt, müssen

hydrophobe Proben nicht notwendigerweise auch eisphob sein. Zudem hängt das Anhaften von Eis/Schnee auch von den Umgebungsbedingungen ab [20], [21].

- Vergleichende Tests nanostrukturierter und unbearbeiteter Proben unter realen Bedingungen an ausgewählten Standorten und nachfolgende Analyse der Nanostrukturen im Hinblick auf Verschleiß und Beständigkeit. Da unter Laborbedingungen nur ein kleiner Ausschnitt der real auftretenden Umgebungsbedingungen untersucht werden kann, sollen Feldversuche mit ausgewählten Proben während der Winterhalbjahre Aufschlüsse über das Verhalten der Proben beim Vereisen (und Abtauen), als auch nach Demontage der Proben auch Informationen zum Verschleiß der Proben liefern.
- Erweiterung der am Institut vorhandenen Simulationsmodelle zum Benetzen von Oberflächen in den sub- $\mu\text{m}$ -Bereich. Wir verwenden seit Jahren Simulationsrechnungen um Lasermaterialbearbeitungsprozesse besser zu verstehen. Grundlage dafür ist das Open-Source-Paket OpenFOAM, welches für die Simulation der Kontinuumsphysik auf einem Finite-Volumen-Ansatz geeignet ist und zur Lösung von Systemen partieller Differentialgleichungen z.B. für CFD-Anwendungen eingesetzt wird. Das Benetzen von Oberflächen wurde in diesem Simulationsmodell integriert und liefert derzeit Resultate entsprechend der Young'schen Gleichung, die Erweiterung des Modells in den sub- $\mu\text{m}$ -Bereich ist aber noch offen.

## 2.5 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von der in den obigen Abschnitten angeführten Übersichtsdarstellung der Arbeit, gliedert sich die nachfolgende Darstellung in mehrere große Bereiche. Der erste Teil fasst die Arbeiten, die die Mikro- und Nanostrukturierung der Proben zum Inhalt hatten, zusammen. Darunter fallen auch verschiedene anderer Arbeiten, die beispielsweise zur Erstellung von Prüfverfahren erforderlich waren. Dazu wurden Laser-Material Interaktionen direkt an der Oberfläche und an Grenzschichten im Volumen untersucht. Schwerpunkt der Forschungsarbeiten waren dabei die Identifikation von Prozessparametern, die eine Materialbearbeitung ermöglichen und die daraus resultierenden Strukturen.

Die Untersuchung der Teststrukturen erfordert auch die quantitative Bestimmung der Eisadhäsion, wozu ein eigener Prüfstand gebaut wurde. Zudem wurden ausgewählte Proben in einem Klimawindkanal unter unterschiedlichen Bedingungen getestet und das Anwachsen von Eis beobachtet. Damit sollte ein Zusammenhang zwischen den hydrophoben Eigenschaften und dem Anwachsen von Eis ermittelt werden. Ein weiterer großer Teil der Arbeit ist der Entwicklung der Simulationsmodelle gewidmet. Basierend auf bereits vorhanden Modellen zur Beschreibung des Benetzens von Oberflächen durch Tröpfchen wird das Simulationsmodell in den sub- $\mu\text{m}$  Bereich erweitert und simulierte Probenoberflächen, ähnlich wie im vorigen Abschnitt beschrieben, durch Vergleich mit realen Proben systematisch untersucht. Gerade Nanostrukturen stellen dabei eine große Herausforderung dar, da ein entsprechend verfeinertes Gitter, wie es zur Berechnung erforderlich wäre, die Rechenzeit extrem verlängert und damit Berechnungen mit veränderten Parametern oftmals viele Tage Rechenzeit zur Folge haben.

Der nächste große Abschnitt beschreibt die Feldversuche. Zuerst wird der Aufbau der stationären Beobachtungsstation beschrieben. Für die Feldversuche wird eine Probenhalterung konstruiert und gebaut und an einer exponierten Lage im Bereich des Windparks Pretul der Österreichischen

Bundesforste (ÖBf) für den Zeitraum von zwei Wintern aufgebaut. Zur Bestimmung des Vereisungsgrads der Proben werden zwei hochauflösende Kameras mit Weißlichtscheinwerfern eingesetzt. Referenzdaten zu den Vereisungsbedingungen werden durch einen Eissensor (Eologix) erfasst und die meteorologischen Bedingungen durch Thermometer, Hydrometer sowie einem beheizten Ultraschallanemometer aufgezeichnet. Die notwendige Infrastruktur wie Datenlogger Stromanschluss und Trägergestell für die Sensoren werden zur Verfügung gestellt. Zudem wird ein dynamischer Versuchsstand errichtet. Hierbei werden Proben am Rotor einer Kleinwindkraftanlage angebracht, um den Einfluss der Bewegung der Rotorblätter auf das Vereisungsverhalten und die Dauerhaftigkeit der Nanostrukturen zu untersuchen. Dazu werden Proben am Rotor einer Kleinwindkraftanlage angebracht. Die Kleinwindkraftanlage wird ebenfalls Bereich des Windparks Pretul aufgestellt. Die Auswertung der Kamerabilder erlaubt eine quantitative Bestimmung des Vereisungsgrads sowie die Dauer der Vereisung. Zur Interpretation der Vereisungs- und Abtauprozesse werden diese Ergebnisse mit den Messdaten für Temperatur, Luftfeuchte und Wind abgeglichen.

## **3 Inhaltliche Darstellung**

### **3.1 Mikro- und Nanostrukturierung von Proben**

Das Ziel erster Versuchsreihen zur Laserstrukturierung war die empirische Analyse geeigneter Prozessfenster zur Erzeugung von hydrophoben Eigenschaften am Versuchswerkstoff 1.4301. Dabei wurden unter Variation folgender Prozessgrößen sowohl Mikro- als auch Nanostrukturen auf erzeugt:

Mittlere Laserleistung: Da es sich bei dem zur Verfügung stehenden Ultrakurzpulslaser Spectra Physics (ehem. Femtolasers) Femtopower Compact Pro, siehe Abbildung 1) um ein gepulstes System handelt, wird üblicherweise zwischen Pulsspitzenleistung und mittlere Lasersystemleistung unterschieden. Während die Pulsspitzenleistung auf Grund der kurzen Pulse ( $10^{-14}$  s) im Bereich von Gigawatt liegt, erreicht die mittlere Leistung bei einer Repetitionsrate von 1 kHz einen Wert von bis zu 800 mW. Die Variation der Laserleistung, welche das Werkstück erreichten wurde außerhalb der Laserquelle mittels variablem Abschwächer auf den gewünschten Wert angepasst.

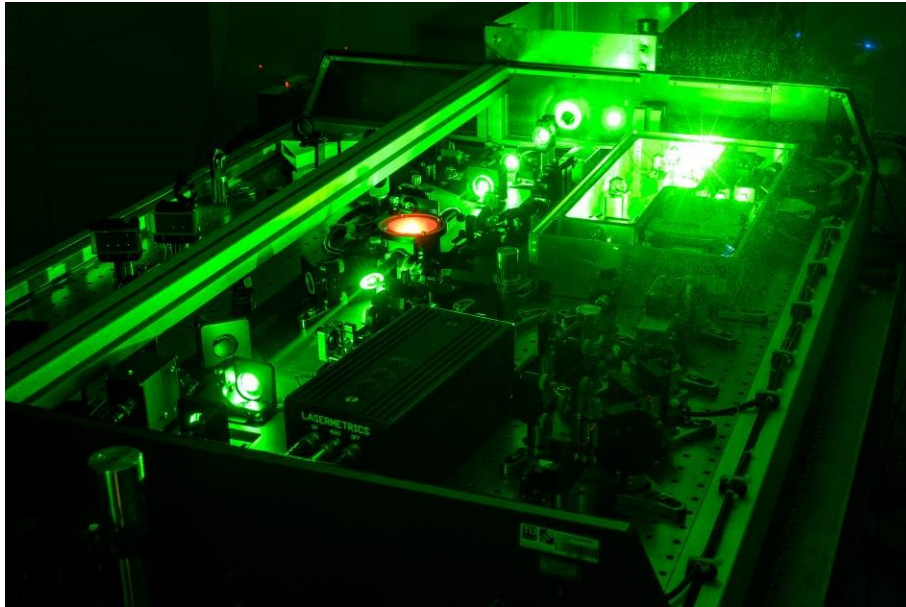


Abbildung 1: Geöffneter Ultrakurzpulslaser. Der Oszillator befindet sich am Bild rechts oben, die Strahlung dieses Oszillators wird zeitlich gedehnt und anschließend verstärkt. Die Verstärkung erfolgt im zentralen, rot leuchtenden Bereich der Abbildung.

- Andere Parameter, die die Abtragsergebnisse beeinflussen, waren beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit: Auf Grund des gepulsten Laserbetriebes ließ sich durch Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit eine variable Pulsüberlappung realisieren.
- Fokusabstand: Durch Variation des Fokusabstandes, ließ sich die Intensität bzw. Fluenz anpassen. Bei der Erzeugung von Mikrostrukturen wurde vorzugsweise direkt im Brennpunkt gearbeitet, bei der Erzeugung von LIPSS deutlich außerhalb.

Versuche mit unterschiedlichen Parametern lieferten beispielsweise LIPSS (laser induced periodic surface structures) oder auch Mikrostrukturen. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Schwellenwerte für der Nanostrukturierung von Stahlproben 1.4301 zeigt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 1: Übersicht über die Schwellenwerte zur Erzeugung bestimmter Strukturen auf Stahlproben.

Übergang	Schwellfluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Grenzwert Pulszahl n
Beginn LIPSS-Bildung	0,04	~40
HFSL Bildung	0,04	~180
Verhältnis HSFL/LSFL	0,04	~460
Bildung kleiner „grooves“	0,04	~900
Abtrag führt zur Bildung von „cones“	0,28	~600
Abtrag führt zu Schnitten	0,94	~1500

Die hier genannten Strukturen, wie LIPSS, HSFL oder LSFL können bei der Bearbeitung von Proben mit ultrakurzen Laserpulsen entstehen. Als LIPSS (laser induced periodic surface structures) werden generell Strukturen bezeichnet, die eine gewisse Periodizität aufweisen. LIPSS in LSFL (low spatial frequency LIPSS) oder HSFL (high spatial frequency LIPSS) werden nach der Periodenlänge unterteilt, wobei als Grenze zwischen den Periodenlängen die halbe Wellenlänge der Laserstrahlung dient: HSFL <  $\lambda/2$  < LSFL.



Abbildung 2: Erste Vorversuche zur Findung optimaler Parameterfenster.

Um die Benetzungseigenschaften der laserstrukturierten Proben auch quantitativ bewerten zu können, wurden die Proben mit Hilfe eines Kontaktwinkelmessgeräts untersucht. Diese Messungen des Water Contact Angle (kurz WCA) ermöglichen eine Aussage über die Benetzungseigenschaften einer Oberfläche. Bei einem geringen Wasserkontaktwinkel  $\theta < 90^\circ$  spricht man von einer hydrophilen Oberfläche, bei  $90^\circ < \theta < \sim 160^\circ$  von einer hydrophoben und bei Winkeln  $\theta > 160^\circ$  von einer superhydrophoben Oberfläche. Allerdings spielt gerade bei sehr großen Kontaktwinkeln die Messmethode eine große Rolle, da bei großen Winkeln Tropfen nicht mehr ohne weiteres abgesetzt werden können. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt Beispiele unterschiedlicher Kontaktwinkel.



Abbildung 3: Beispiele unterschiedlicher Kontaktwinkel. Links: hydrophile Oberfläche; Mitte: Hydrophobe Oberfläche; Rechts: Superhydrophobe Oberfläche

Eine Auswahl vielversprechender Strukturen für die Applikation im Freien wurde bereits im ersten Projektjahr getroffen und ausgehend von den Erkenntnissen die wir dabei gewinnen konnten, wurden die Versuche mit unterschiedlichen Bearbeitungsparametern weitergeführt. Die erzeugten Oberflächen wurden im Zuge der Untersuchungen vor allem hinsichtlich ihres Benetzungs- und Enteisungsverhaltens untersucht. Das Benetzungsverhalten wurde dabei klassisch über den statischen Wasserkontaktwinkel quantifiziert. Bei dieser Methode wird ein definierter Wassertropfen auf die Probe gesetzt und dessen Öffnungswinkel (tangential) in den 3-Phasenpunkten gemessen. Je größer der Winkel, desto wasserabweisender (hydrophober) die Oberfläche. Es handelte sich hierbei um eine indirekte Messung der Auswirkung einer Veränderung der Oberflächenenergie der festen Phase, die im Zuge dieser Versuchsreihe minimiert wurde, um eine möglichst schlechte Benetzung (hoher Kontaktwinkel) zu erzielen.

Der Kontaktwinkel lieferte aber keine Aussage über die Eisadhäsion an laserstrukturierten Oberflächen und wir haben daher einen Prüfstand zur Messung der erforderlichen Abscherspannung einer Eissäule auf einer Probenoberfläche aufgebaut, siehe die Abbildung 4.

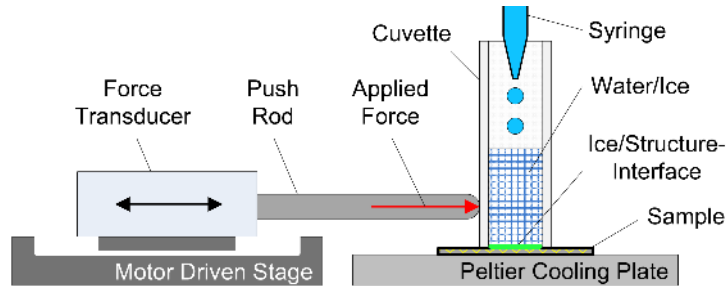


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Prüfstands zur Messung der Abscherspannung einer Eissäule

In weiterer Folge wurde der Versuchsaufbau modifiziert und der bisher eingesetzte Fokussierspiegel durch eine Linse ersetzt. Damit konnte eine wesentliche größere Flexibilität in der Auswahl der Parameter bei der Bearbeitung der Proben erreicht werden, die nachfolgende Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau der Bearbeitungsstation.

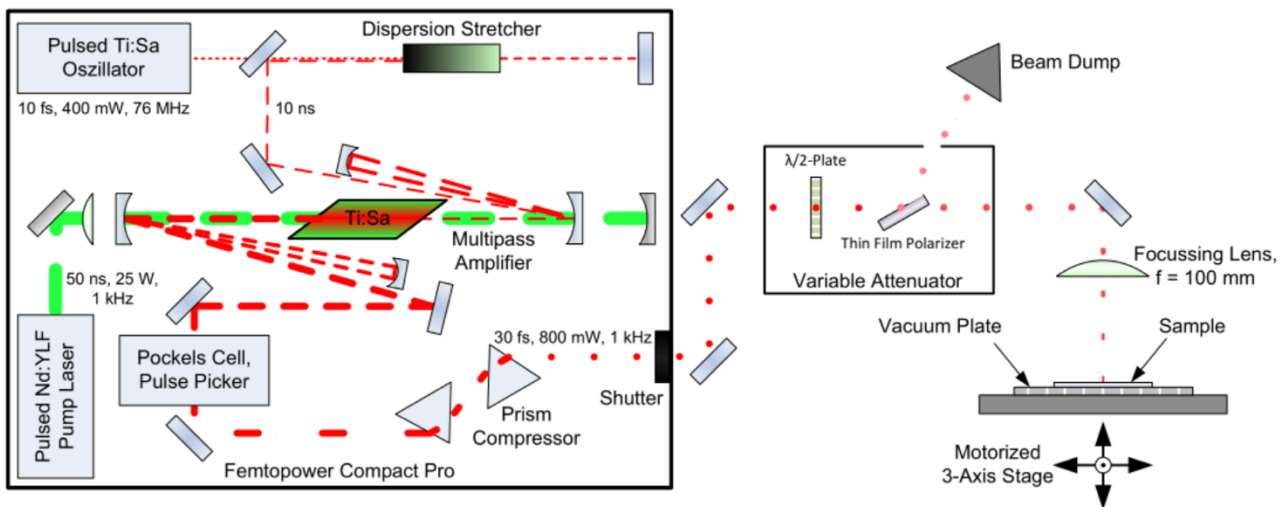


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Strahlengangs im verwendeten UKPL

Einige Beispiele unterschiedlicher Oberflächenstrukturen zeigt die nachfolgende Abbildung 6.

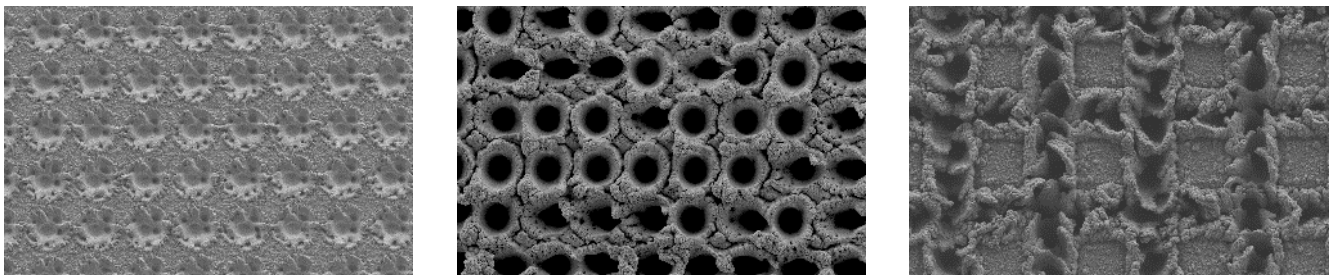


Abbildung 6: Diverse lasergenerierte Mikrostrukturen, Bohrmuster flach/tief (links/Mitte), Quadratische Pfeiler mit aufgeschmolzener Randzone (rechts).

Unter realen Bedingungen sind die laserstrukturierten Proben einer Vielzahl an Umwelteinflüssen ausgesetzt und der Verschleiß der Strukturen ein wesentlicher Faktor für ihre Praxistauglichkeit. Die

Proben an den Rotorblättern der Klein-Windkraftanlage (Klein-WKA) wurden daher vor und nach dem Feldversuch untersucht. Im Labor im Institut hatten wir in Anlehnung an verschiedene Normen zur Prüfung von Beschichtungen bzw. zur Strahlprüfung nach DIN 53233 zudem einen Verschleißprüfstand aufgebaut. Da an den Rotorblättern einer WKA Windgeschwindigkeiten bis 400 km/h auftreten können, wurde unser Versuchsaufbau im Labor entsprechend modifiziert, siehe Abbildung 7.



Abbildung 7: Prüfstand zur Messung der abrasiven Verschleißbeständigkeit technischer Oberflächen

Im Prüfstand wurde ein mit Abrasivmittel und Wasser angereicherter Luftstrom erzeugt und auf die untersuchte Probenoberfläche befördert werden. Die quantitative Auswertung des Verschleißes erfolgte beispielsweise durch Messung der Profiltiefe und durch Bestimmung der Oberflächeneigenschaften. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der ersten durchgeführten Verschleißprüfung an einer mikrostrukturierten Probe aus rostfreiem Stahl. Die Probengröße betrug 50 x 50 mm, die bearbeitete Fläche 40 x 40 mm. Als Bearbeitungsmuster wurde ein Gitter gewählt. Eine 3D Profilmessung (Bruker Alicona Infinite Focus G5) vor der Verschleißprüfung ergab eine Strukturhöhe von etwa 10  $\mu\text{m}$ . Um die Auswirkung des Strukturverschleißes auf die Benetzungs- und Enteisungseigenschaften zu bestimmen, wurde der statische Wasserkontaktwinkel und die Eisadhäsion vor und nach dem Prüfzyklus bestimmt.

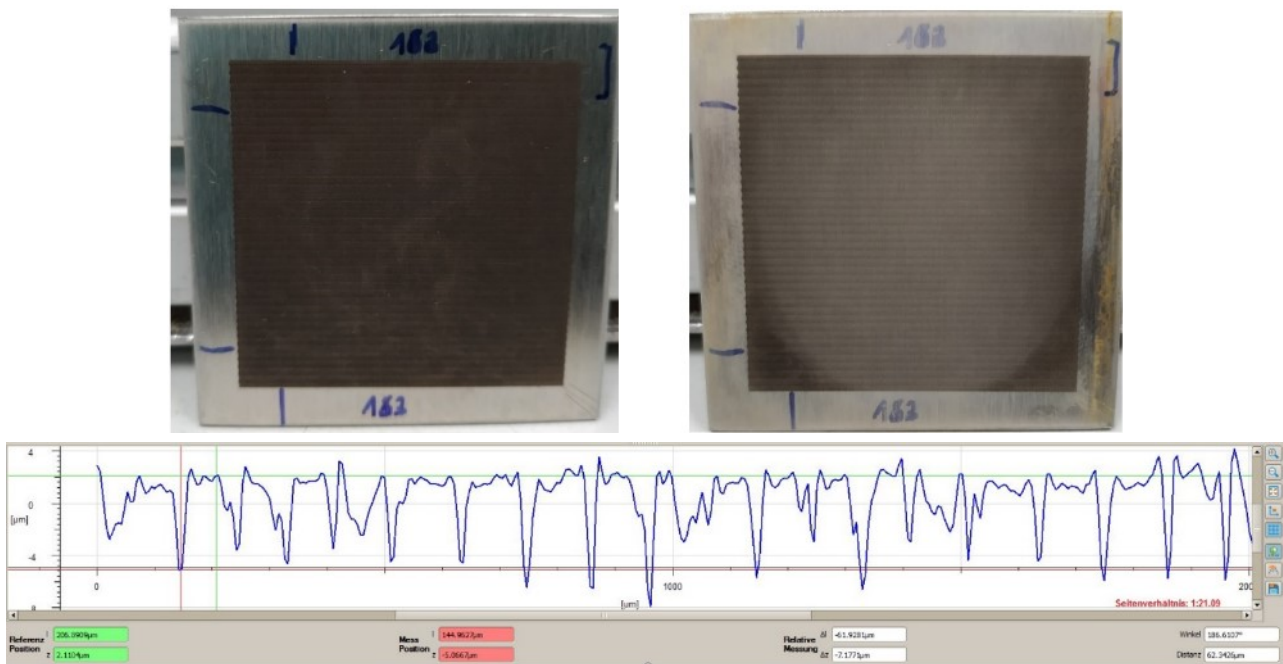


Abbildung 8: Mikrostrukturierte Probe vor und nach Prüfzyklus

Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen zeigten, dass es einen Zusammenhang zwischen den hydrophoben Eigenschaften und der Lagerung bearbeiteter Proben in Luft gab. Zudem wurden Proben, die vor einer Untersuchung in einem Rasterelektronenmikroskop hydrophil waren, durch die Untersuchung im REM superhydrophob. Wir haben daher vermutet, dass die mittels Laser eingebrachte Energie eine polare Oxidschicht bildet, welche Wassermoleküle aus der Umgebungsluft anzieht und zu einer hydroxylierten Schicht führt. Hydroxylgruppen können zur Chemisorption organischer Moleküle (z. B. Kohlenwasserstoffe) und Bildung einer unpolaren, hydrophoben Schicht führen. Werden die Proben an Umgebungsluft gelagert, wird dieser Prozess der Chemisorption durch Wasserdampf verlangsamt. In der Vakuumkammer eines REM werden Wasserdampfrückstände entfernt und die Oberfläche kann effektiver mit organischen Molekülen reagieren. Die organischen Moleküle sind bspw. Kohlenwasserstoffe, die über verunreinigte Proben oder von ölgeschmierten Vakuumpumpen in die Kammer gelangen. Diese Vermutung wurde von uns eingehend untersucht.



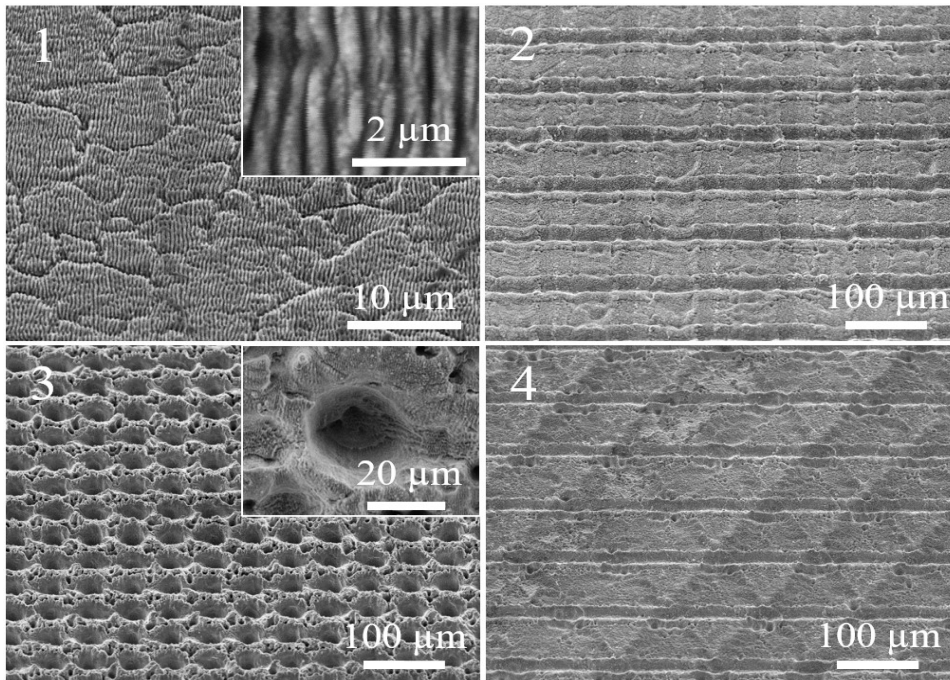


Abbildung 9: Unterschiedlich strukturierte Oberflächen zur Untersuchung einer Behandlung mit Kohlenwasserstoffen auf das hydrophobe Verhalten und die Eisadhäsion.

Diese Proben (siehe Abbildung 9) wurden mit Kohlenwasserstoffen behandelt, der Kontaktwinkel über einen längeren Zeitraum gemessen und die Eisadhäsion bestimmt. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt den Ablauf.

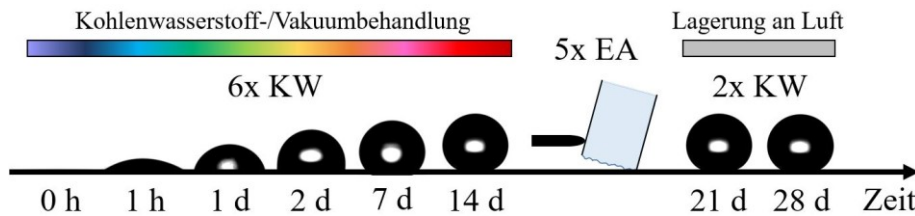


Abbildung 10: Zeitlicher Ablauf der Kontaktwinkel (KW) und Eisadhäsionsmessungen (EA).

Zusätzlich wurden Gelcoat-Proben mit dem Ultrakurzlaser strukturiert und ähnliche Strukturen wie auf die bisher untersuchten Stahlproben aufgebracht.

Im Zuge der Experimente wurden unterschiedliche Laserstrukturen hinsichtlich ihrer Vereisungsneigung in einem aerodynamischen Vereisungsszenario untersucht. Dazu wurden in einem ersten Schritt vier Strukturtypen ausgewählt. Um die Untersuchungen einheitlich zu gestalten, wurden wie bereits im Experiment zur Beschleunigung der Umwandlungszeit von hydrophil zu hydrophob, unterschiedliche Strukturen ausgewählt. Als Probenmaterial kam rostfreier Stahl (1.4301) mit einer Dicke von 50 µm zum Einsatz. Solch dünne Folien besitzen eine hohe Elastizität eignen sich besonders gut zur Applikation an einer konvexen Geometrie wie einem Rotorblattquerschnitt. Die Proben wurden mittels Titan-Saphir Femtosekundenlaser (Femtopower Compact Pro) strukturiert. Damit wurden insgesamt 8 Proben mit einer strukturierten Fläche von 120 x 45 mm hergestellt, jeweils zwei Sätze aus den vier oben beschriebenen Strukturtypen. Als zu untersuchende Rotorblattsektion wählten wir ein neutrales und symmetrisches NACA 0012 Profil, skaliert auf 80%, welches aus einem Polystyrol-Kern und einer umschließenden Lage

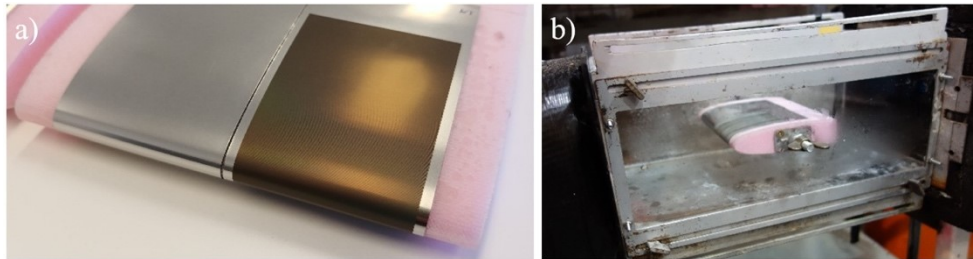


Abbildung 11: a) Laserstrukturierte und Referenzprobe auf einem NACA 0012 Profil, b) Testsektion des Klimawindkanals an der FH Joanneum

handlaminiertes Glasfasermatte bestand. Darauf wurden die laserstrukturierten Folien mittels doppelseitigen Klebeband angebracht. Jeder Windkanal-Probekörper wurde zusätzlich mit einer unstrukturierten Stahlfolie (Referenzprobe) versehen. Die Untersuchungen wurden unter kalibrierten Klareis-Konditionen durchgeführt und mit einem neutralen Anstellwinkel von  $0^\circ$ , wobei die auf die Proben treffenden Wassertropfen unter diesen Bedingungen nicht unterkühlt wurden.

## 3.2 Entwicklung der Simulationsmodelle

Zusammen mit den ersten Experimenten wurde auch mit der Entwicklung erster Simulationsmodelle begonnen. Die Simulation des Benetzungsverhaltens strukturierter Proben dient der Untersuchung vielversprechender Geometrien bei gleichzeitiger Reduktion des experimentellen Aufwandes. Da am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien ein großer Erfahrungsschatz bei der Simulation von Laserbearbeitungsvorgängen wie Schneiden, Schweißen und Auftragen vorhanden ist, wurde auf diese aufgebaut und die etablierten Simulationswerkzeuge benutzt. Aus diesem Grund kam die freie Software OpenFOAM (Open-source Field Operation And Manipulation) auf der Basis von C++ zum Einsatz, mit welcher strömungsmechanische Probleme approximativ durch numerische Methoden gelöst oder angenähert werden können. Um derartige Berechnungen durchzuführen, muss die untersuchte Geometrie in kleine Teilsegmente zerlegt werden, was als „Meshing“ bezeichnet wird. Durch eine Verkleinerung der Segmente kann zwar die Genauigkeit gesteigert werden, gleichzeitig steigt aber die Rechenzeit an. Die ersten Simulationen waren daher auf einfache, zweidimensionale Strukturen beschränkt und die strukturierte Oberfläche als Randbedingung definiert. Die Erkenntnisse ermöglichten eine wesentlich detailliertere Planung der weiteren Simulationsschritte.

Als Konsequenz wurde unser Modell um eine Dimension erweitert. Mittels „snappyHexMesh“ wurde aus der Oberfläche ein Volumenmodell erzeugt, wobei die besonders relevanten Bereiche verfeinert wurden. Durch die höhere Auflösung konnte die Schnittstelle, also die Kontaktzone zwischen Wassertropfen und Oberfläche, genauer berechnet werden. Durch diese Vorgehensweise entstand ein dreidimensionales Netz mit einer Zellenzahl von ca. 800.000, was einen entsprechend hohen Rechenaufwand benötigt. Zur Beschleunigung der Berechnung wurde die Simulation in mehrere Bereiche unterteilt, die jeweils von einem Prozessor gerechnet wurden.

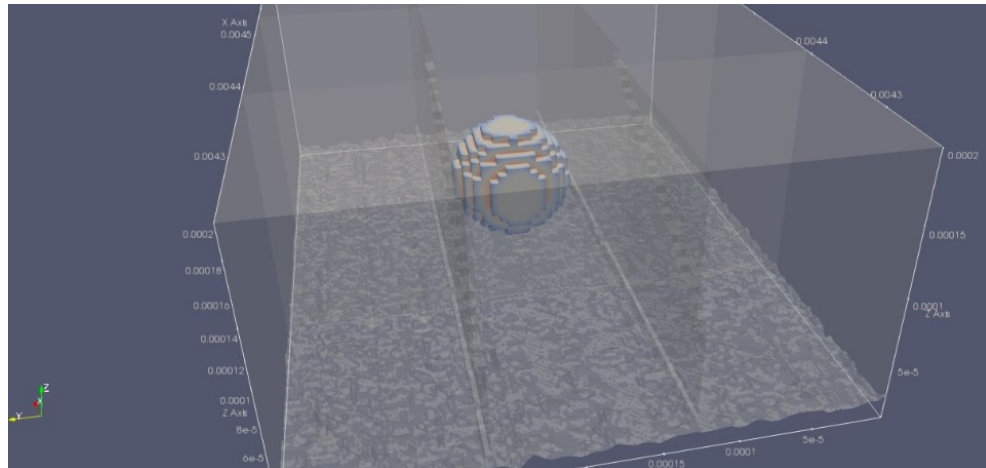


Abbildung 12: 3D-Case mit einem Tropfen.

Ausgehend von den Erfolgen der relativ stark vereinfachten Simulationen wurde in weiterer Folge begonnen, das bereits aufgebaute 3D 2-Phasenmodell auf Grund der damit verbundenen Einschränkungen zu einem 3-Phasenmodell weiterzuentwickeln. Dazu wird neben der Gas- und Flüssigkeitsphase bei einem 3-Phasenmodell auch die feste Phase integriert, was hat den Vorteil hat, dass das Material vollständig parametrisiert werden kann, d.h. die damit verbundenen physikalischen und chemischen Materialeigenschaften berücksichtigt werden können. Wir beschränkten uns auf die Solver-Integration der Oberflächenenergie, da diese einen wesentlichen Effekt auf das Benetzungsverhalten hat. Als Berechnungsmodell der Festkörper-Oberflächenenergie wählten wir auf Grund seiner hohen wissenschaftlichen Akzeptanz das Modell nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble (OWRK), welches im Wesentlichen eine Trennung zwischen dispersiven und polaren Oberflächenenergieanteilen unterscheidet. Zur Validierung wurden anfangs ebene Oberflächen, und in einem nachfolgenden Schritt auch regelmäßig strukturierte Oberflächen simuliert.

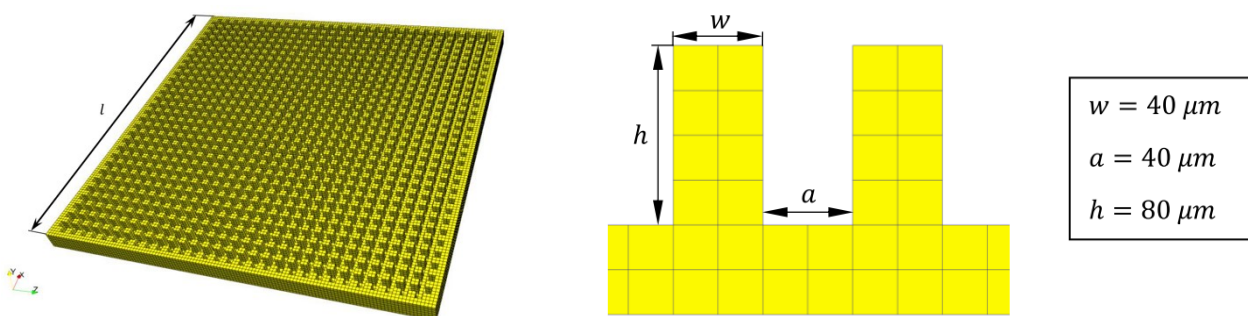


Abbildung 13: Darstellung der zur Simulation eingesetzten regelmäßigen Mikrostruktur.

## 3.3 Feldversuche

Bereits früh im Projekt wurde mit den Vorbereitungen für die geplanten Feldversuche begonnen. Das Equipment, welches später am Standort des Windparks Pretul aufgebaut wurde, wurde zuerst probeweise aufgebaut und getestet, da die Zugänglichkeit des Windparks in den Wintermonaten nur eingeschränkt gegeben ist. Die Tests lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Auslegung und Montage im Windpark Pretul. Nachfolgend wurde das Equipment im Windpark installiert und für den Winter vorbereitet.

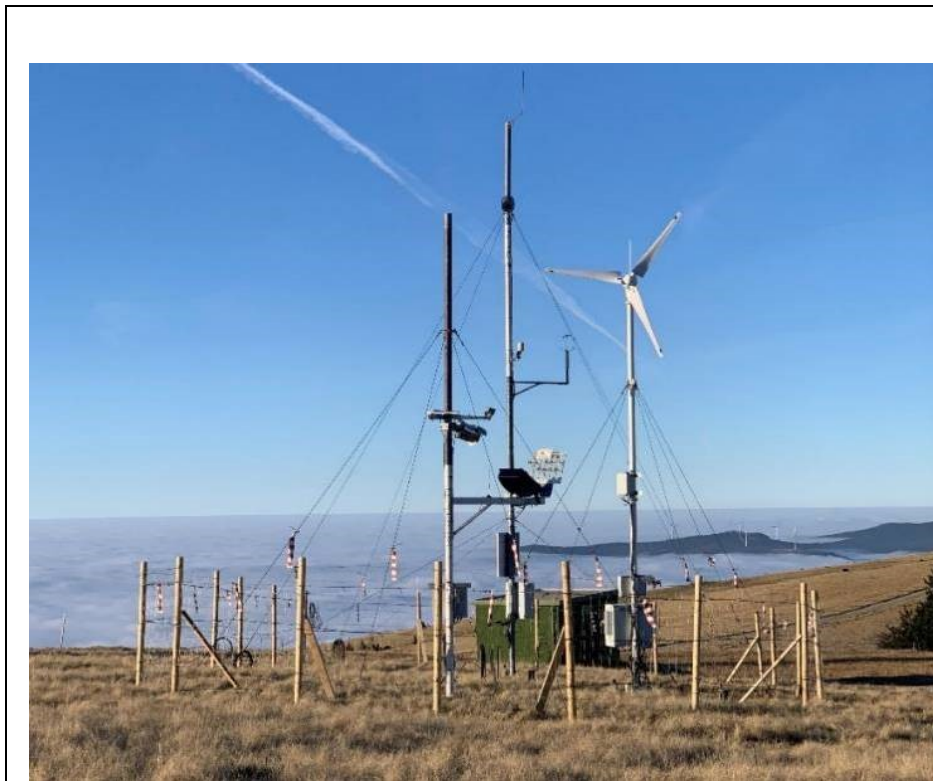


Abbildung 14: Aufgebautes Messequipment am Standort Pretul

Die Versuchsaufbauten wurden innerhalb des Windparks Pretul der österreichischen Bundesforste in der in der steirischen Gemeinde Mürzzuschlag auf 1.655 m Seehöhe positioniert. Die Standortkoordinaten nach WGS84 lauten  $15^{\circ}43'59.8''$  Ost und  $47^{\circ}33'04.1''$  Nord. Der gesamte Versuchsaufbau bestand aus drei Masten, welche auf einem umzäunten Testfeld von 18 m x 12 m errichtet wurden. Auf einem Mast befanden sich die Oberflächenproben mit dem Wärmestrahler zum Abtauen und der Beobachtungskamera. Der zweite Mast trug die Kleinwindkraftanlage mit den Proben an den Rotorblättern. Auf dem dritten Mast wurden die meteorologischen Instrumente zur Messung von u. a. Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte sowie eine weitere Kamera installiert. Vor dem Hintergrund einer eingeschränkten Zugänglichkeit des alpinen Standortes lag ein besonderes Augenmerk im Design der Versuchsanlagen auf der Verwendung dauerhafter und wartungsfreier Anlagenkomponenten. Die Anlagen wurden darüber hinaus vor dem Aufbau am Versuchsstandort einem 6-monatigen Testlauf unterzogen.

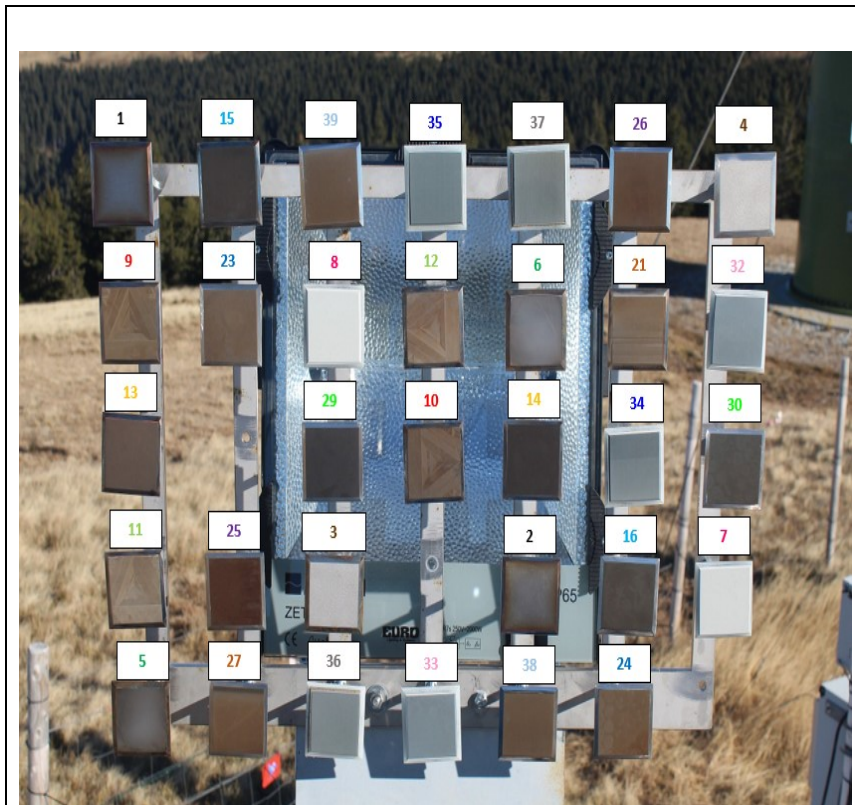


Abbildung 15: Modifizierter Probenhalter für den zweiten Feldversuch.

Bei der Konzeption des Feldversuchs wurde großer Wert auf möglichst geringe Umweltauswirkungen und Sicherheit gelegt. Die Versuchsaufbauten können nach Projektende wieder vollständig rückgebaut werden. Die drei Stahlrohrmasten stehen im Fußpunkt auf einer aufgelegte Stahlbodenplatte und sind jeweils zu vier Seiten mit Stahlseilen abgespannt. Die Verankerungen im Erdboden erfolgt mittels Erdnägeln. Der Versuchsstandort wurde vollständig mit einem Maschendrahtzaun umgeben, welcher an erdgegründeten Pfählen befestigt ist. Zusätzlich sind der Maschendrahtzaun und die Abspannseile mit Flatterbändern gekennzeichnet. Diese Maßnahmen sollen verhindern, dass Wildtiere und Weidevieh die Anlagen beschädigen bzw. selbst Schaden nehmen. Hierbei wurde insbesondere auf den Schutz der lokalen Vogelpopulationen, vorrangig Raufußhühner wie dem Birkhuhn, großer Wert gelegt. In Zusammenarbeit mit der verantwortlichen Försterin der Österreichischen Bundesforste konnte die Sichtbarkeit der Anlagen für die nur eingeschränkt flugfähigen Tiere deutlich erhöht werden.

Außerhalb des Zaunes befindet sich lediglich die Zuleitung der externen Stromversorgung. Diese besteht aus einem oberirdischen Kabel, welches durch einen Verlegungsschlauch geschützt wird und die elektrische Versorgung mit 230 V durch den Anschluss an eine ca. 30 m entfernte Trafostation sicherstellt. Kurzfristige Unterbrechungen der externen Energieversorgung können durch einen internen Energiespeicher, welcher durch die Kleinwindkraftanlage und PV-Module versorgt wird, überbrückt werden.

### 3.3.1 Eingesetzte Komponenten im statischen Feldversuch

- Eologix Vereisungssensor: Dieser Sensor ist ein vollständig unabhängiges Datenerfassungssystem, das die elektrische Leitfähigkeit und Temperatur der Oberfläche misst. Die Temperatur einer Oberfläche ist ein guter Indikator ab wann eine Eisbildung stattfindet.

- Probenträger und Proben: Der Probenträger war aus Edelstahl gefertigt und bot Platz für bis zu 20 Oberflächenproben sowie den Vereisungssensor von Eologix.
- Wärmestrahler: Ein Wärmestrahler diente dazu die Proben bei anhaltender Vereisung abzutauen und eine wiederholte Dokumentation des Vereisens bzw. Abtauens der Oberflächen zu ermöglichen.
- Scheinwerfer: Um eine optimale Auswertung der Vorgänge zu ermöglichen werden die Proben durch einen LED-Weißlichtscheinwerfer beleuchtet.
- Kamera: Für die Bildaufnahme wurde eine hochauflösende 18 Megapixel Kamera des Modells Canon EOS1300D mit 10-22 mm Weitwinkelobjektiv verwendet, welche im Abstand von etwa 80 cm zu den Proben montiert war.
- Meteorologische Messinstrumente: Um die Vereisungs- und Abtauprozesse mit den Umweltbedingungen in Beziehung zu setzen wurden Instrumente für meteorologische Messungen, im Wesentlichen Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und Windstärke, auf dem 10 m hohen Masten installiert.

### 3.3.2 Eingesetzte Komponenten des dynamischen Feldversuchs

- Kleinwindkraftanlage: Die Kleinwindkraftanlage wurde vom deutschen Hersteller Superwind bezogen und besteht aus dem Modell sw 1250 mit 1250 W installierter Leistung sowie 3 Rotorblättern aus Glasfaserverbundkunststoff, einer DC Box mit Bremsschalter sowie dem Laderegler Morningstar Tristar 60.
- Kamera: Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um das baugleiche Model wie bei dem stationären Versuchsaufbau. Die Kamera wurde am 10 m Mast oberhalb der Messinstrumente montiert und übermittelt stündlich Bilder vom dynamischen Versuch und den Versuchsaufbauten insgesamt. Die Bilder werden mittel Mobilfunk übermittelt und stehen unmittelbar zur Verfügung.

Um die besondere Belastung von Rotorblattoberfläche zu simulieren wurden ausgewählte Proben auf den Rotorblättern einer Kleinwindkraftanlage der Bewitterung ausgesetzt. Hierbei ging es vor allem darum, die langfristige Haltbarkeit der Nanostrukturen unter realistischen Umweltbedingungen zu testen. Insbesondere Abrasion durch Partikel in der Luft in Verbindung mit hohen Geschwindigkeiten können Oberflächen massiv zusetzen. Konventionelle Windkraftanlagen weisen Rotordrehzahlen von bis zu 20 U/min auf, womit die Flügelspitzen eine Geschwindigkeit von bis zu 400 km/h haben können. Kleinwindkraftanlagen drehen sich wesentlich schneller (bis zu 1.000 U/min) und weisen daher ähnliche Geschwindigkeiten an den Flügelspitzen auf. Die Oberflächenproben wurden mit Hilfe eines Zweikomponenten-Polyurethanklebers an der Vorderkante der Rotorblätter aufgebracht und auf dem 6 m hohen Masten in der Mitte installiert. Die hochauflösende Kamera wurde an der Spitze des 10 m Masten montiert.

### 3.3.3 Auswertung der Versuche

Nach Abschluß der jeweiligen Feldversuche wurden die Proben demontiert und die Proben im Labor untersucht. Gleichzeitig erfolgte die Auswertung der gesammelten Bilder sowie der meteorologischen Daten. Die im ersten Feldversuch gewonnenen Ergebnisse wurden zur Modifikation der Proben und des Versuchsaufbaus für das zweite Feldversuchshalbjahr genutzt.

Die Auswertung des gesammelten Bildmaterials erfolgte optisch nach einer achteiligen Skala, welche den Vereisungszustand einer Probe beschreibt. Zusätzlich zum Grad der Vereisung wurde bei der optischen Bewertung der Proben nach den gängigsten Arten von Eis in Klareis, Raueis und Mischeis unterschieden:

- Klareis ist eine klare, durchsichtige, glatte und feste Eisschicht. Es entsteht aus großen unterkühlten Tropfen bei Temperaturen zwischen 0 °C und -10 °C. Das Eis ist kompakt und schwer und haftet gut am Untergrund.
- Raueis entsteht aus kleinen unterkühlten Wassertröpfchen, bei einer Lufttemperatur von -2 bis -10 °C. Diese gefrieren unmittelbar beim Auftreffen auf einer Oberfläche und bilden kristalline Strukturen. Die eingelagerte Luft verleiht dieser Art von Eis ein weißes Aussehen.
- Mischeis ist ein Gemisch aus Rau- wie auch Klareis. Es entsteht, wenn sowohl größere als auch kleinere unterkühlte Wassertröpfchen bei sehr niedrigen Temperaturen zwischen -10 °C und -15 °C gefrieren. Hierbei werden Raueispartikel in das Klareis eingebettet und bilden eine harte und grobkantige Masse.

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zu den Ergebnissen ist anzumerken, dass erst die Kombination und Interaktion zwischen den unterschiedlichen Arbeitspaketen die Ergebnisse möglich gemacht haben. Der besseren Übersichtlichkeit werden hier die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete getrennt dargestellt.

### 4.1 Ergebnisse der Experimente zur Mikro- und Nanostrukturierung

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, haben wir festgestellt, dass eine Lagerung der laserbearbeiteten Proben in Vakuum bzw. eine Behandlung mit Kohlenwasserstoffen, die Umwandlung aus einem hydrophilen in einen (super)hydrophoben Zustand beschleunigt, sie dazu die Abbildung 16. Zwei Versuchsserien (2 & 11) erreichen bereits nach relativ kurzer Zeit hydrophobe bzw. superhydrophobe Kontaktwinkel, während die Referenzprobe (12) auch nach längerer Zeit im hydrophilen Zustand verbleibt. Wie im vorigen Kapitel beschrieben, wurde diese Proben auch mehreren Eisadhäsionsmessungen unterzogen. Diese Ergebnisse sind in der Abbildung 17 zusammengefasst. In der Darstellung in Abbildung 17 ist zu beachten, dass hier insgesamt 4 Oberflächenstrukturen, und zwar LIPSS, eine Gitterstruktur, Bohrungen und eine dreieckige Struktur, untersucht wurden. Vor allem bei der Versuchsserie 11, die größtenteils eine stark verminderte Eisadhäsion aufweist, stellt die Bohrungs-Struktur einen Ausreißer dar, der im Vergleich zu den anderen Strukturen eine etwa 2-fach höhere Eisadhäsion aufweist. Dies dürfte auf eine Art des Verhakens zwischen der Eissäule und der Probenoberfläche zurückzuführen sein. Bei anderen Versuchsserien ist dieser Einfluss nicht so stark ausgeprägt.

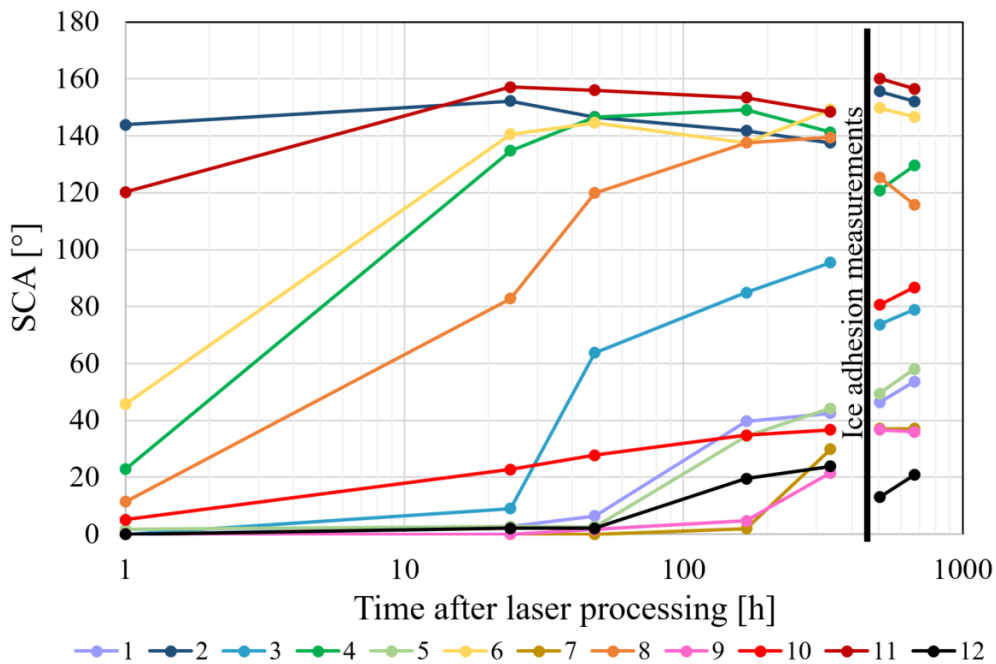


Abbildung 16: Entwicklung des statischen Kontaktwinkels als Mittelwert für jede Probe nach Laserbearbeitung, Kohlenwasserstoff- oder Vakuumbehandlung; vor/nach 5 Eisadhäsionsmessungen

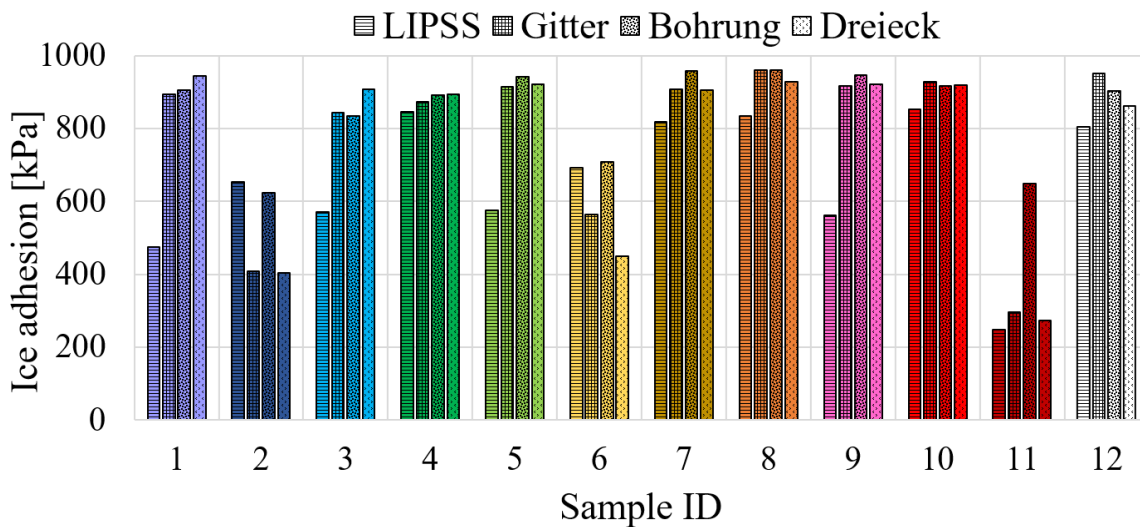


Abbildung 17: Ergebnisse der Eisadhäsionsmessungen für unterschiedliche Kohlenwasserstoffe und Strukturen. Die Versuchsreihen 2 und 11 zeigen gegenüber der Referenz (12) deutliche verminderte Eisadhäsion.

Mit ausgewählten Proben haben wir auch Messungen im Klimawindkanal durchgeführt. Das Setup ist in der Abbildung 11 dargestellt. Nach der Laserstrukturierung und der chemischen Nachbehandlung (siehe oben) zeigten alle Proben superhydrophobes Benetzungsverhalten. In der initialen Benetzungsphase konnten bei einigen Strukturen ein interessantes Abperl-Verhalten festgestellt werden. Die eintreffenden Wassertropfen fließen dabei in einer Art Welle vom vorderen Bereich des Tragflügels nach hinten ab, was auf die Superhydrophobizität und vor allem auf einen geringen Abrollwinkel schließen lässt (siehe dazu Abbildung 18).



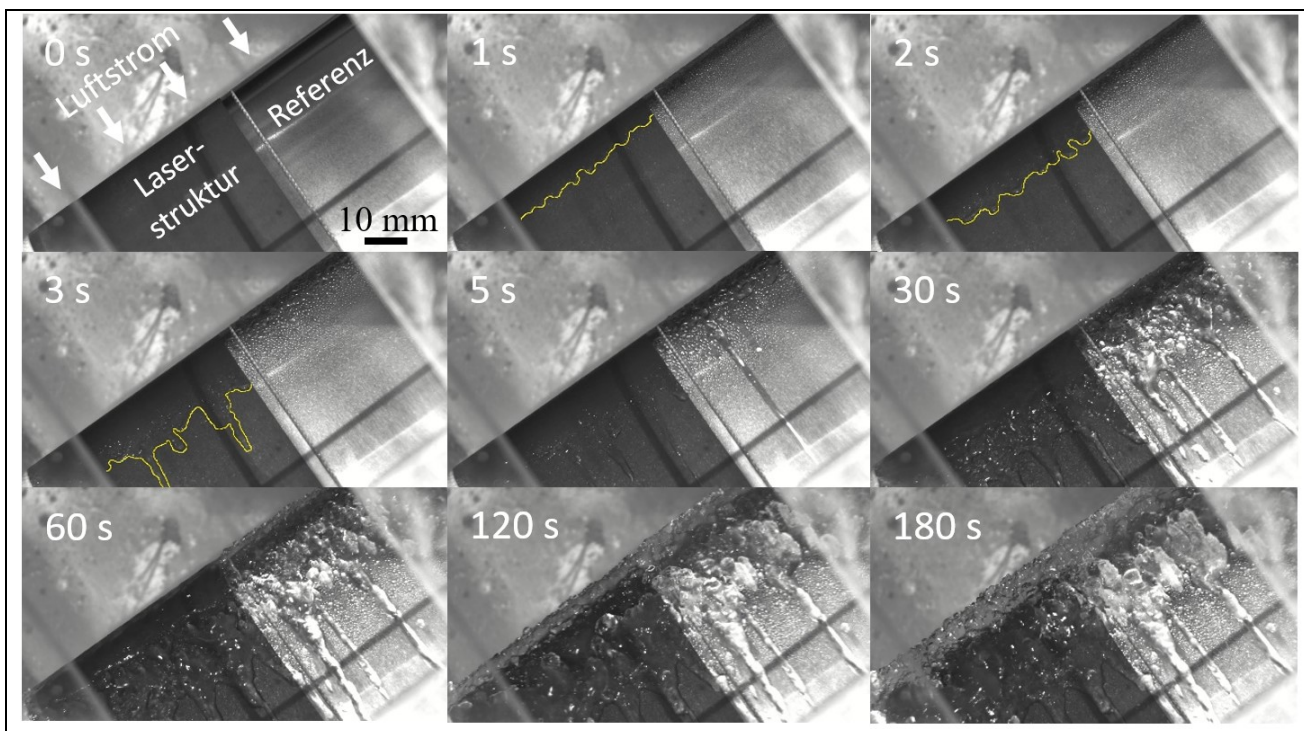


Abbildung 18: Ansicht von oben auf das Tragflügelprofil einer Probe. Abfließende Wassertropfen markiert durch gelbe Linie (1 s – 3 s), verzögerte Eisakkumulation an der strukturierten Seite (links) nach 30 s und 60 s.

Um weitere Informationen zur Eisakkumulation nach dem 180 Sekunden dauernden Testzyklus zu erhalten, wurden die vereisten Proben aus der Testkammer entnommen und die Eisform mittels 3D Laserscanner (Hexagon Absolute Arm mit RS6 Laserscanner Kopf) erfasst. Ein Resultat zeigt die Abbildung 19:

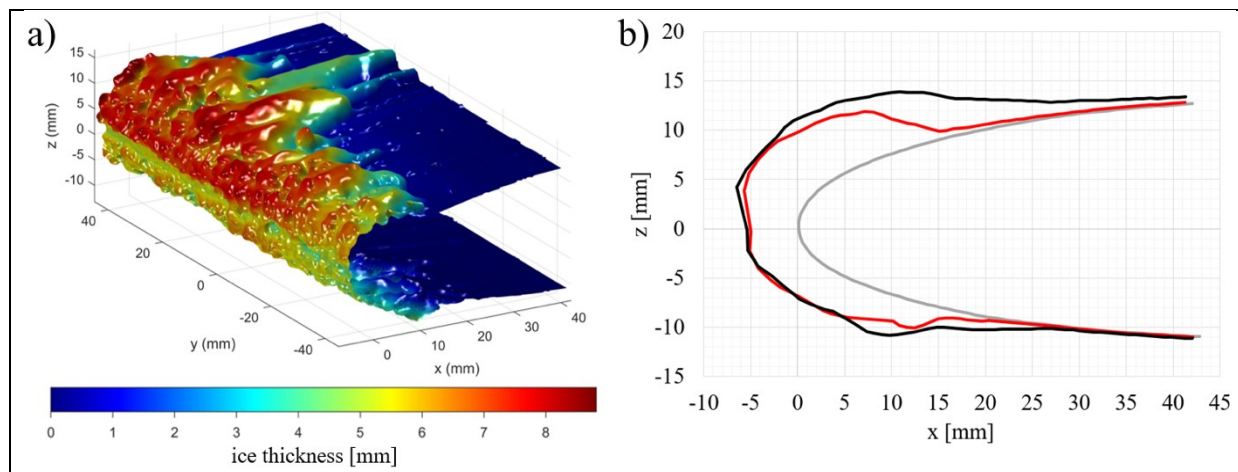


Abbildung 19: Beispielhaftes Ergebnis des 3D Laserscans von Sample IWT#8 nach 180 s im Klimawindkanal; a) Eisakkumulation als Falschfarbendarstellung, laserstrukturierte Folie in +y-Richtung, Referenzfolie in -y-Richtung; b) durchschnittliche Eisakkumulation über den Querschnitt des NACA 0012 Profils (graue Linie), laserstrukturierte Folie (schwarze Linie) und Referenzfläche (rote Linie).

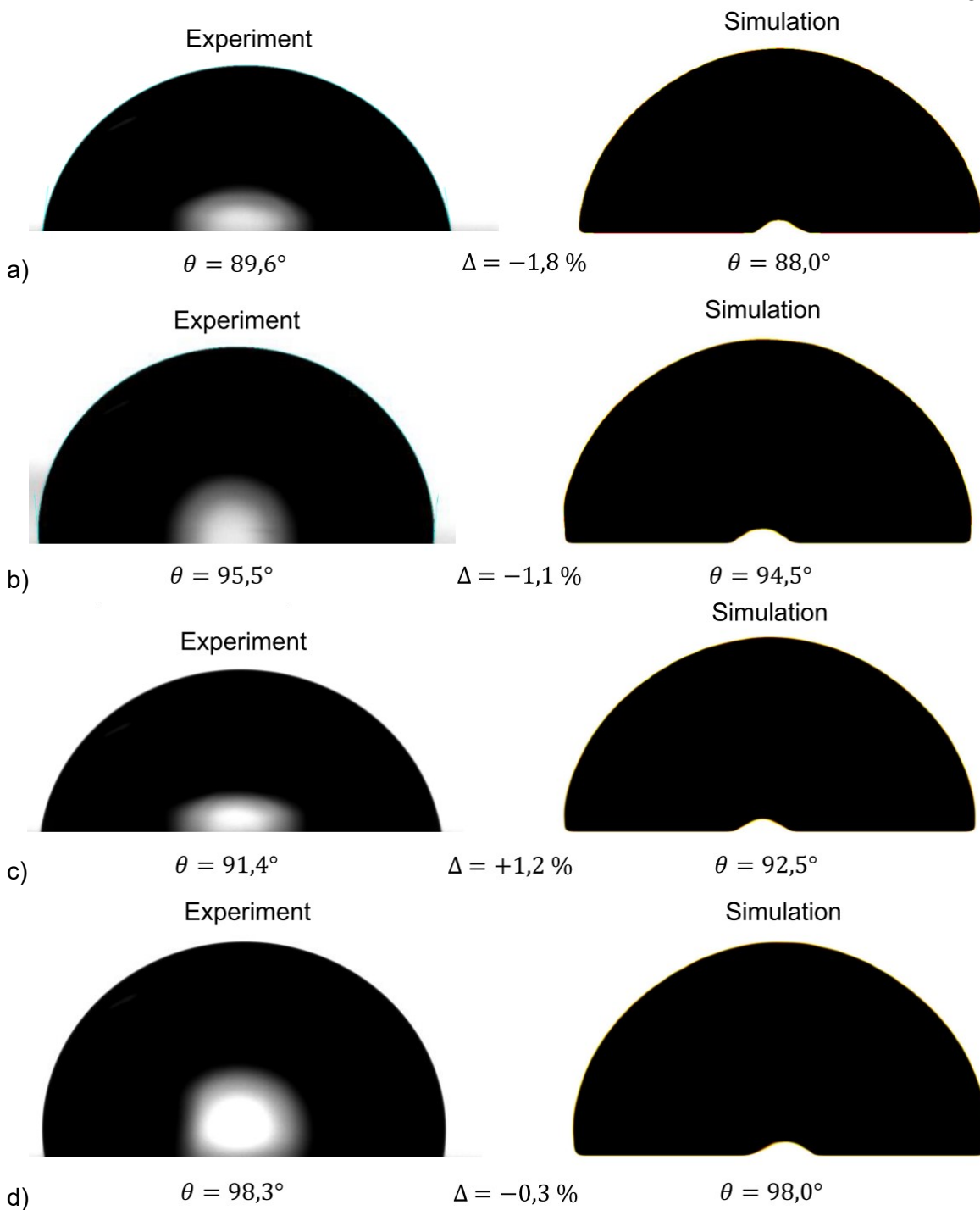
Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Kohlenwasserstoffbehandlung nach Laserstrukturierung (ausschließlich Mikrostrukturen) einen deutlichen Effekt auf das Ablaufverhalten von Wasser und eine Verzögerung des Eisaufbaus zur Folge hat.

Das Forschungsprojekt NICE zeichnet zusammenfassend aus, dass Nanostrukturen unterschiedlichster geometrischer Ausprägung erzeugt werden konnten. Durch Entwicklung und Variation der Laser- und Bearbeitungsparameter wurden

- Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL) und High Spatial Frequency LIPSS (HSFL) hergestellt,
- der Übergang in den Ablationsbereich über die Ausbildung von Grooves bestimmt und
- die darauffolgende Entstehung von Kegelstrukturen (Cones), sowie deren geometrische Ausprägung dokumentiert werden.
- Durch Nano- und Mikrostrukturierung konnten superhydrophobe Oberflächen erzeugt und dabei die zeitlich verzögerte Umwandlung von superhydrophil zu superhydrophob untersucht/dokumentiert werden.
- Zur experimentellen Bestimmung der Eisadhäsion (Scherspannung) wurde ein Testsetup entwickelt und aufgebaut.
- Eine Abhängigkeit zwischen Strukturtyp (Flächenrauheit) und Eisadhäsion konnte hergestellt werden – zusammengefasst führt höhere Rauheit zu höherer Eisadhäsion.
- Mittels LIPSS-Nanostrukturen konnte die Eisadhäsion im Vergleich zur unstrukturierten Referenzfläche leicht reduziert werden.
- Für die Ausstattung der statischen Feldversuche wurden unterschiedliche Strukturen auf 2 mm Stahlblech und auf mittels Gelcoat beschichteten Faserverbundmaterial hergestellt. Zusätzlich wurden 50 µm starke Stahlbleche strukturiert um sie hinsichtlich Erosionsbeständigkeit zu untersuchen.
- Eine Versuchsanlage zur Erzeugung von Erosion an laserstrukturierten Oberflächen durch Simulation von Sand- und Wasserbeschuss wurde konzipiert und aufgebaut.
- Die chemische Umwandlung von hydrophil zu hydrophob konnte durch Lagerung der laserstrukturierten Proben im Vakuum und in Kohlenwasserstoffen (vor allem in Benzin) signifikant beschleunigt werden.
- Durch diese Nachbehandlungsmethoden konnte die Eisadhäsion um bis zu 50% für Kohlenwasserstoffe (Benzin) und 70% für Vakuumbehandlung reduziert werden.
- Experimente zur Erzeugung von LIPSS an Gelcoat wurden durchgeführt, aber waren nicht erfolgreich.
- Gitter- und Dreieck-Mikrostrukturen auf Gelcoat-Oberflächen zeigten superhydrophobe Eigenschaften nach Lagerung an Luft und eine leichte Beschleunigung der Umwandlung bei Lagerung in Vakuum.
- Im Klimawindkanal konnte an Tragflügelsegmenten gezeigt werden, dass laserstrukturierte und anschließend mittels Kohlenwasserstoffen (Benzin) behandelte Stahlproben:
  - das initiale Abfließen von Wasser an einem Tragflügelsegment begünstigen und
  - die Bildung von Eisperlen an der Tragflügelvorderkante um ca. 50 Sekunden verzögern

## 4.2 Simulationsergebnisse

Wie in der allgemeinen Beschreibung weiter oben ausgeführt, haben wir während des Projekts unsere Modelle sukzessive verbessert und optimiert. Einen großen Schritt vorwärts konnten wir mit der Implementierung der Trennung zwischen dem dispersiven und dem polaren Anteil der Oberflächenenergie erzielen. Als Referenz wurden zuerst ebene Proben simuliert, siehe dazu die Abbildung 20.



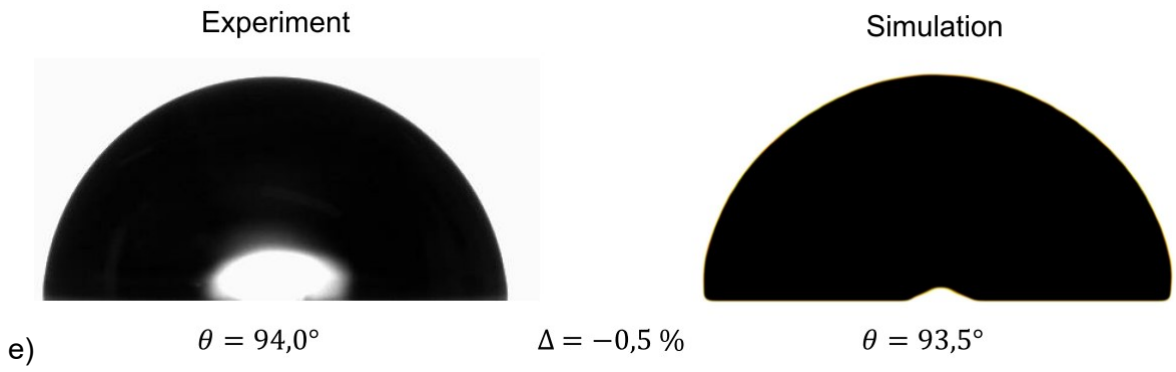
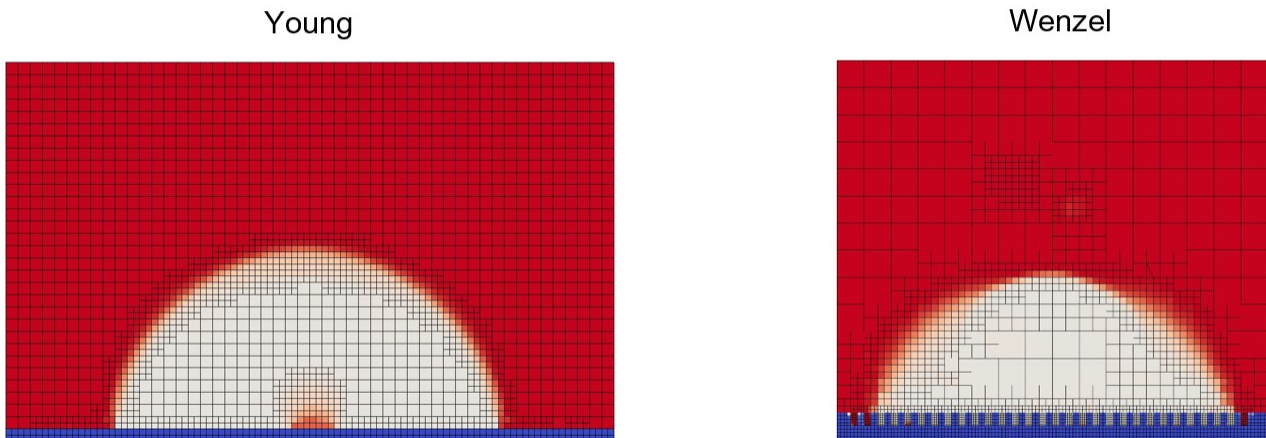


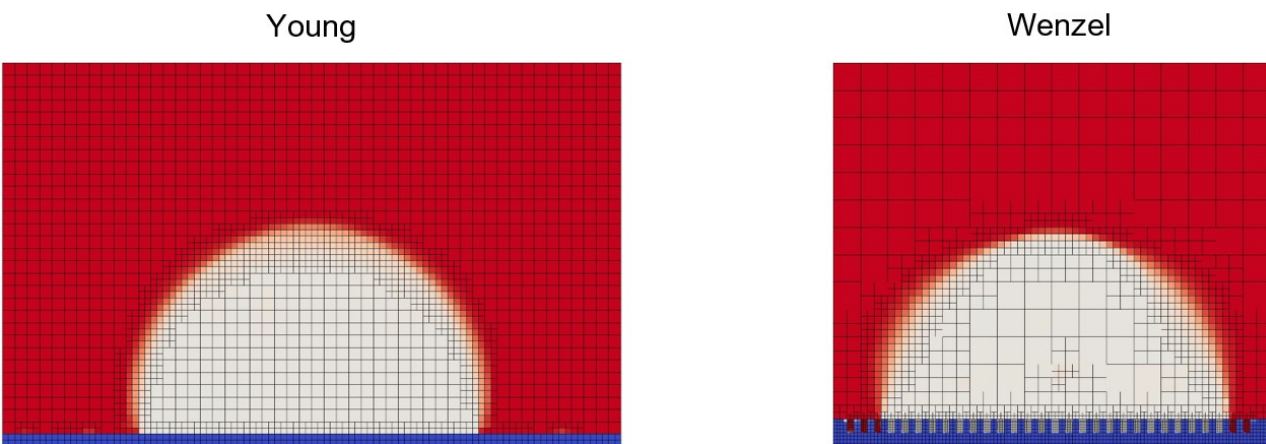
Abbildung 20: Vergleich Experiment - Simulation von ebenen Oberflächen. a) Aluminium, b) Edelstahl, c) Kupfer, d) Messing, e) PS-Oberfläche

Die Übereinstimmung von Experiment und Simulation war an ebenen Oberflächen sehr gut. Um den Einfluss einer regelmäßigen Struktur auf das Benetzungsverhalten zu untersuchen, wurde im nächsten Schritt eine quadratische Mikrosäulenordnung mittels OpenFOAM erstellt und benetzt (siehe Abbildung 13). Dabei lag der Fokus auf dem Übergang zwischen vollständiger Benetzung (Wenzel-Zustand) und unvollständiger Benetzung (Cassie-Baxter-Zustand), welcher analytisch berechnet wurde.

### Case-90

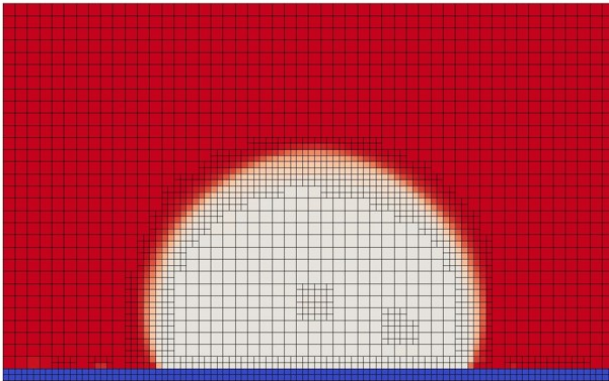


### Case-110

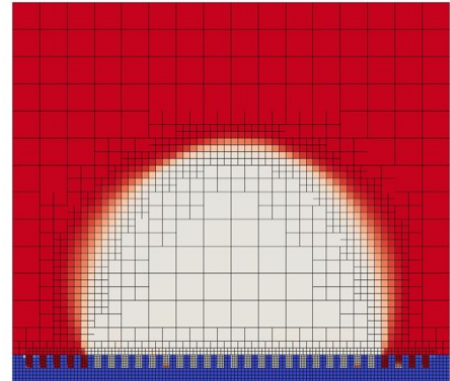


## Case-120

Young

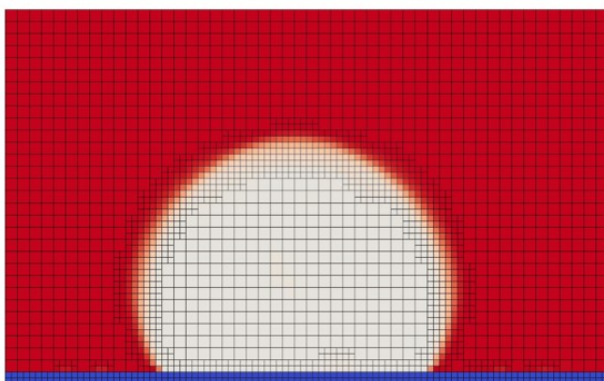


Wenzel



## Case-135

Young



Cassie-Baxter

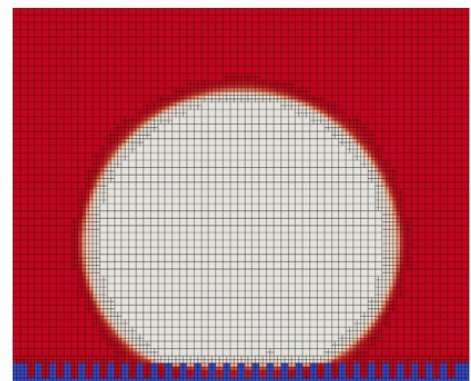


Abbildung 21: Simulationsergebnisse und der Übergang zwischen Wenzel und Cassie-Baxter Benetzungszustand. Der Übergang findet hier bei ca.  $135^\circ$  statt.

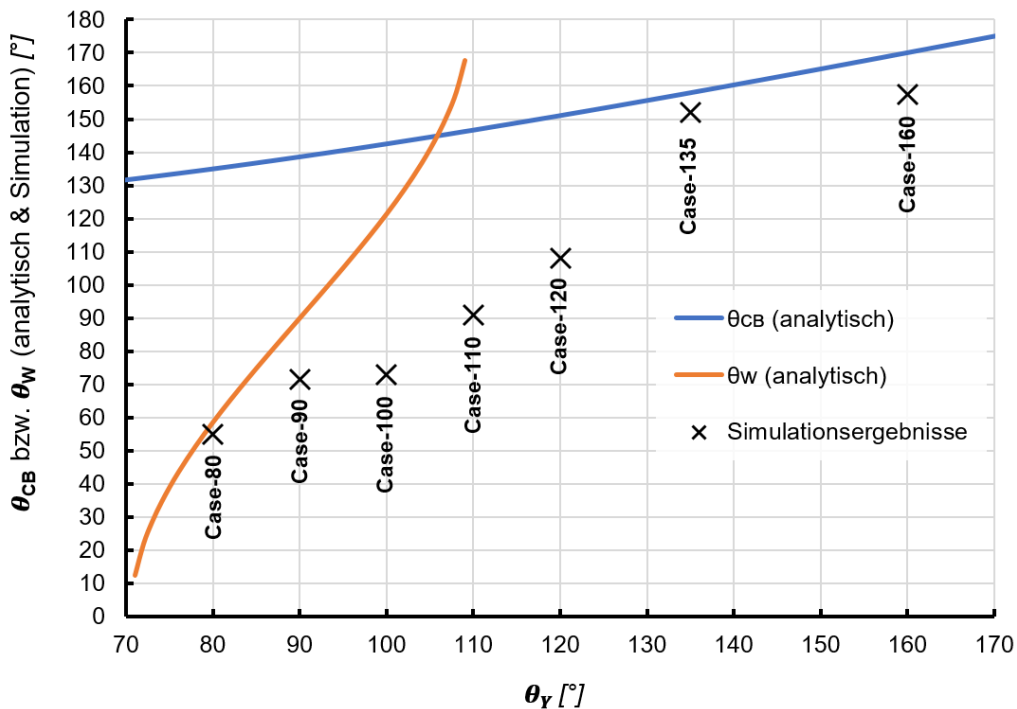


Abbildung 22: Analytische und Simulationsergebnisse in Abhängigkeit des Übergangswinkels

Abbildung 22 zeigt eine grafische Zusammenfassung der analytischen Ergebnisse und der Simulationsergebnisse. Bei Simulationen, die einen Wenzel-Zustand als Ergebnis hatten, war eine größere Abweichung (bis zu 40 %) zu den analytischen Ergebnissen zu erkennen, als bei den Cassie-Baxter-Zuständen. Weiters sind die gemessenen Kontaktwinkel der Simulationen stets niedriger als jene der analytisch berechneten. Der Verlauf der Simulationsergebnisse und der analytischen Ergebnisse weist eine gewisse Ähnlichkeit auf, jedoch besteht eine Verschiebung der Simulationsergebnisse in positiver Richtung der Abszisse aufgrund eines höheren kritischen Kontaktwinkels. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass:

- Zweidimensionale periodische Strukturen (Sinus) konnten mittels CAD-Programm (Solidworks) erzeugt und anschließend mittels Vernetzungssoftware (Gmsh) vernetzt werden.
- Zweidimensionale Cases wurden erstellt und mittels Zwei-Phasen-Solver (InterFoam) berechnet.
- Reale, laserstrukturierte Oberflächen wurden mittels 3D-Profilmessgerät digitalisiert, auf einen 2D Schnitt reduziert, mittels SnappyHexMesh in OpenFOAM vernetzt und anschließend simuliert.
- Versucht wurde, die Vernetzung auf eine 3D Oberfläche zu erweitern. Jedoch scheiterte der Versuch durch die Einschränkungen des gewählten Zwei-Phasen-Modells.
- Übergang von zwei Phasen (InterFoam-Solver) zu drei Phasen (IFT-Laser-Solver) und damit physikalische Modellierung der festen Phase.
- Integration von polaren und dispersiven Anteilen der Oberflächenenergie in den IFT-Laser-Solver.
- Regelmäßige 3D Strukturen wurden mittels OpenFOAM erstellt und anschließend deren Benetzung simuliert – die Ergebnisse zeigten einen ähnlichen Trend wie die analytischen Ergebnisse. Tatsächlich kam es in der Simulation zum Übergang von Wenzel- zu Cassie-Baxter-Benetzungszustand.

## 4.3 Ergebnisse aus den Feldversuchen

### 4.3.1 Statische Feldversuche



Abbildung 23: Aufbau des statischen Feldversuchs

Im ersten Winterhalbjahr 2020/2021 wurden neun unterschiedliche Oberflächenstrukturen mit stark hydrophoben Eigenschaften hinsichtlich einer präventiven Wirkung auf das Eiswachstum getestet. Basierend auf den Erkenntnissen fokussierte die Entwicklung eisphober Oberflächen auf vergleichsweise vereisungsträge Laserstrukturen (u.a. LIPSS, Gitter). Der zweite Feldversuch 2021/2022 umfasste 17 unterschiedlich bearbeitete Oberflächen, welche überwiegend in doppelter Ausführung vorlagen und an unterschiedlichen Positionen am Probenträger positioniert waren. Dies diente dazu einen möglichen Einfluss der Position am Probenträger auf das Vereisungsverhalten zu prüfen. Abbildung 24 zeigt die Vereisung von Gelcoat- und Stahloberflächen.

# Energieforschungsprogramm - XX. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

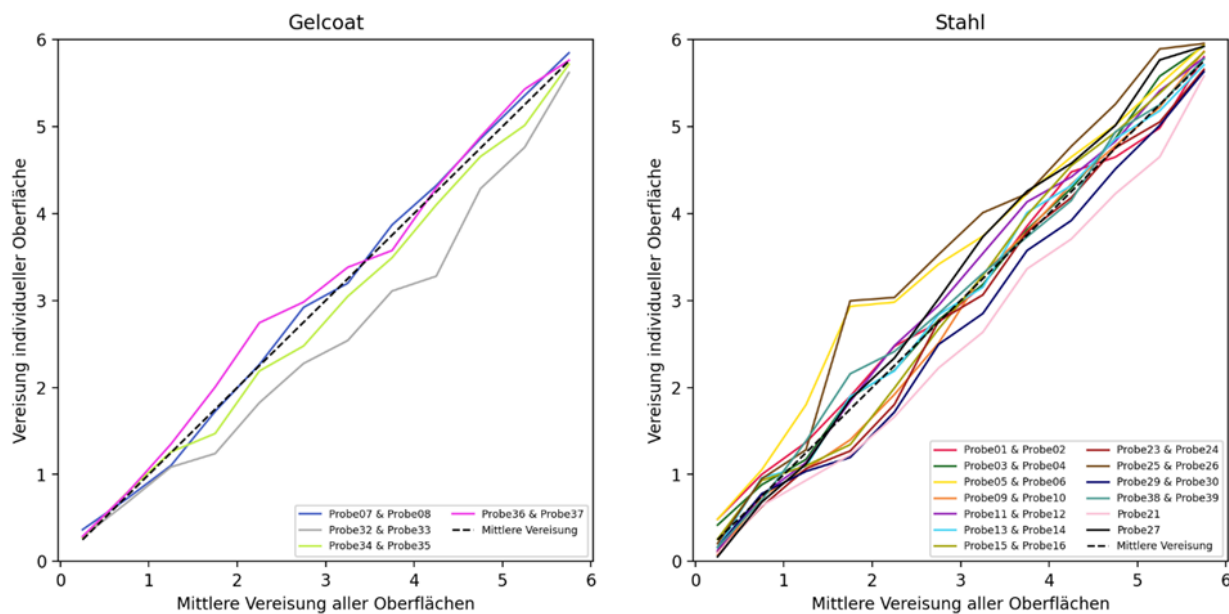


Abbildung 24: Vereisung von Gelcoat-Oberflächen (links) und Stahloberflächen (rechts). Einige Probenstrukturen zeigen geringe Vereisung.

## 4.3.2 Dynamische Feldversuche

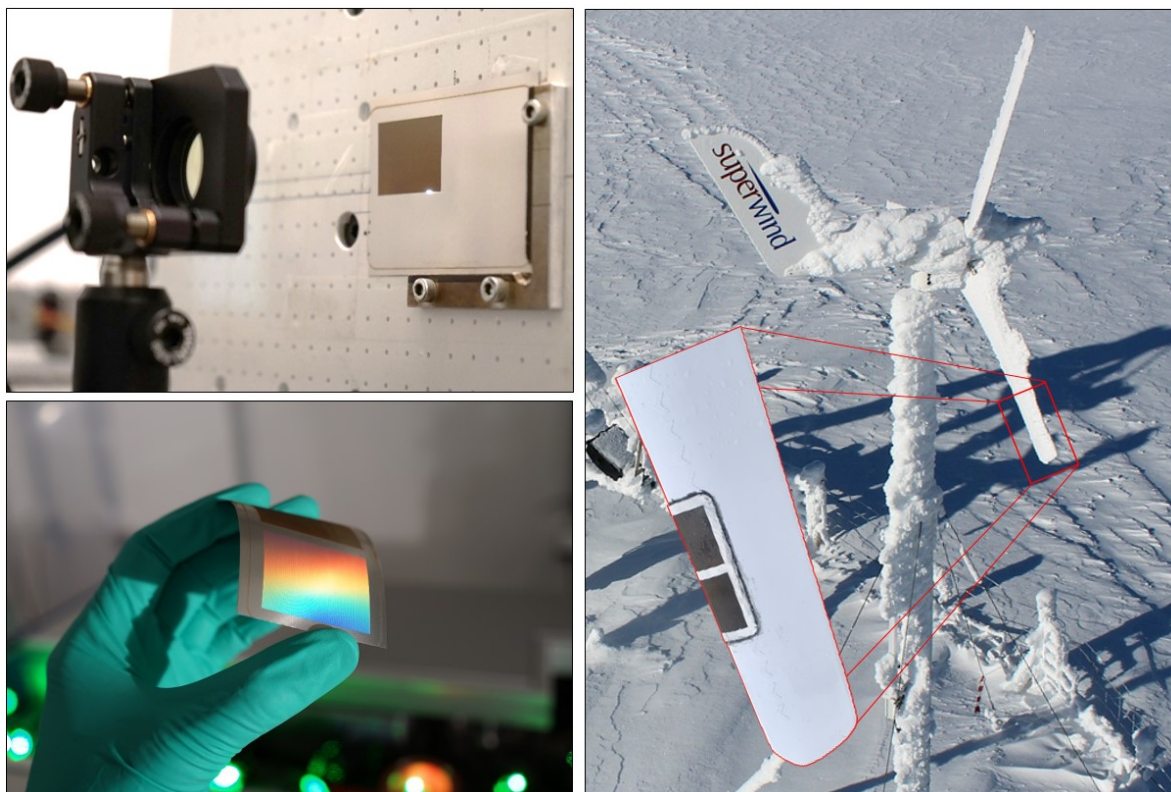


Abbildung 25: Laserstrukturierungsprozess (links, oben); flexible, strukturierte Metallfolie mit LIPSS (links unten); Kleinwindkraftanlage mit applizierten Folien (rechts)

Nach dem Abschluss der Feldversuche wurden die Rotorblätter mit den Proben und die relevanten Rotorblattabschnitte für die 3D-Oberflächencharakterisierung präpariert. Die Oberflächengeometrie wurde mit einem Alicona Infinite Focus Messgerät erfasst, welches Fokusvariation zur Bestimmung der 3D-



Topographie nutzt. Mit Ausnahme von LIPSS-Probe zeigten alle Proben eine Verringerung der Oberflächenrauheit und auch des entwickelten Grenzflächenverhältnisses (Sdr), welches die Zunahme der Oberfläche aufgrund von Rauheit und Mikrostrukturen im Vergleich zur planaren Oberfläche beschreibt.

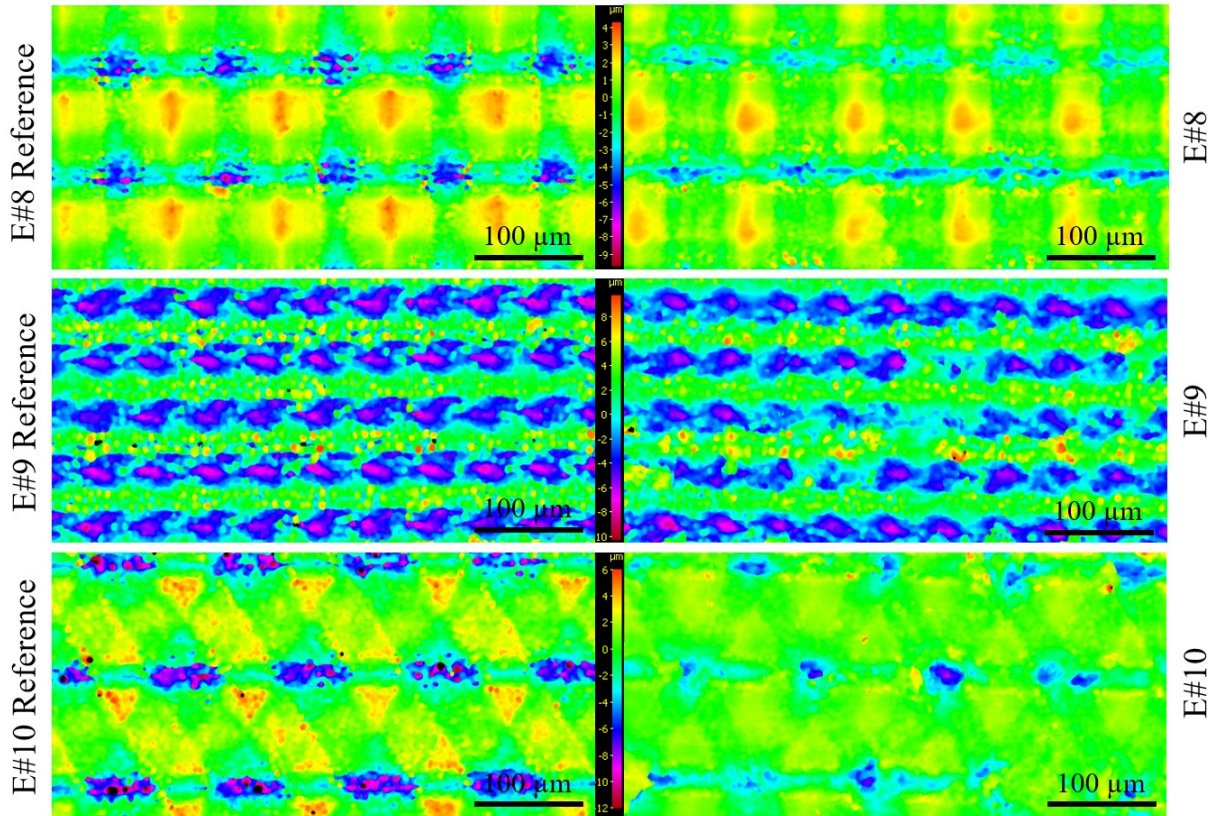


Abbildung 26: Vergleich unterschiedlich strukturierter Proben (rechts) mit den jeweiligen Referenzproben (links). Die Strukturen waren (von oben nach unten) Gitter, Bohrung, Dreieck.

Insgesamt wurden die statischen und dynamischen Feldversuche über zwei Winterhalbjahre durchgeführt. Die Ergebnisse der Verschleißmessungen zeigen eine Abnahme der Oberflächenrauheit im Vergleich zu den Referenzproben. Allerdings bleiben Form und Funktion durchaus erhalten. Zusammenfassend kann man feststellen, dass

- Die Feldversuche Ergebnisse über Vereisungsprozesse an den strukturierten Oberflächen als auch über Umwelteinflüsse (Erosion) lieferten.
- Die Auswertung der Daten aus den statischen Feldversuchen zeigte, dass die Oberflächenproben mit Laserbearbeitung zum Teil später und insgesamt geringer vereisen.
- Mit den dynamischen Feldversuchen konnte bestätigt werden, dass die Laserstrukturen zwar anfänglich erodieren, jedoch Form und Funktion längerfristig erhalten bleiben

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Im Rahmen des Projekts konnten eine Reihe ausgezeichneter Resultate erzielt werden. Aus wissenschaftlicher Sicht haben sich aus den Ergebnissen aber auch eine Reihe von Fragen ergeben, die einer tiefergehenden Untersuchung bedürften. So stellt beispielsweise die Beschleunigung der

Transformation der Proben von einem hydrophilen in einen superhydrophoben Zustand durch den Einsatz von Kohlenwasserstoffen bzw. durch Lagerung in einer Vakuumkammer ein interessantes Phänomen dar. Vor allem im Zusammenhang mit der beobachteten Steigerung des Kontaktwinkels laserstrukturierter Gelcoat-Proben nach längerer Lagerung in Luft bzw. in Vakuum.

Ein noch gänzlich unerforschter Bereich ist ein möglicher Einfluss der Laserstrukturierung auf die aerodynamischen Eigenschaften der Rotorblätter. Dies auch vor dem Hintergrund, dass aus der Literatur verschiedene Arbeiten bekannt sind, die durch eine Mikrostrukturierung eine Verminderung von Oberflächenturbulenzen erreichen. In diesem Zusammenhang wären gezielte Untersuchungen zur Kombination dieser Mikrostrukturen und den Strukturen zur Verminderung von Eis und Schnee sinnvoll. Während unserer Versuche im Windkanal hat sich gezeigt, dass die laserstrukturierten Proben wesentlich später zu Vereisen beginnen und das anwachsende Eis wesentlich glatter und gibt die ursprüngliche Oberflächenform des Profils bei anwachsender Eisdicke, im Gegensatz zur Eisschicht auf unstrukturierten Oberflächen, relativ gut wieder. In diesem Fall ist sowohl diese Veränderung aus einem relativ chaotischen Anwachsen von Eis bei unstrukturierten Proben hin zu einem relativ gleichmäßigen Verhalten interessant, als auch die Auswirkungen dieser homogenen Eisschicht auf die aerodynamischen Eigenschaften des Profils.

Ein Vergleich zwischen laserstrukturierten Proben und konventionellen Rotorblattbeschichtungen, sowohl was ihre Performance, als auch was ihre Lebensdauer betrifft, wäre für Abschätzungen zur Effizienz unerlässlich.

Im Rahmen des Projekts konnten wir durch die relativ bescheidene mittlere Leistung des von uns eingesetzten ForschungsLasers nur kleine Probenflächen in angemessener Zeit strukturieren, eine Skalierung auf große Flächen (auch auf die Rotorflächen einer Klein-WKA) ist mit diesem Laser nicht realistisch. Da aber die extrem kurzen Laserpulse mit einer Dauer von rund 30 Femtosekunden, die von dem eingesetzten ForschungsLasers emittiert werden, zur Strukturierung nicht unbedingt erforderlich sind, könnte mit anderer Laserquellen, eventuell in Kombination mit schnellen Verfahren zur Strahlformung und -ablenkungen (z.B. DMD in Kombination mit Scanner-Systemen) eine deutliche Steigerung der Flächenleistung ermöglichen. Durch die Strukturierung einer gesamten Klein-WKA und dem Einsatz zweier Anlagen, von denen eine strukturiert, die andere unbehandelt bleibt, in einem Feldversuch könnten sehr aussagekräftige Resultate über die Tauglichkeit der Laserstrukturierung gewonnen werden.

In der Simulation von Benetzungsvorgängen konnte das vorhandene Know-how deutlich erweitert werden. Eine Reihe von Fragen und Aufgabenstellungen erfordern aber noch weitere Anstrengungen. So konnten ausgezeichnete Ergebnisse bei der Simulation ebener Oberflächen erzielt werden, der Übergang zu strukturierten Oberflächen führte aber zu Diskrepanzen zwischen Simulation und Experiment. Ein möglicher Grund dafür liegt sicherlich im verwendeten Tröpfchenvolumen, um die Rechenzeit einigermaßen im Rahmen zu halten, wurde in der Simulation mit einem wesentlich kleineren Tropfenvolumen gerechnet, als es bei realen Kontaktwinkelmessungen möglich ist. Einen weiteren Schwachpunkt der Simulationen betrifft vor allem die Randbereiche der Festkörperphase, wo es in den stark nicht-orthogonalen Zellen zu unerwünschten Phasenumwandlungen kam. Durch Begrenzung der Nicht-Orthogonalität der Zellen konnten zwar einige Probleme beseitigt werden, was sich aber nachteilig auf die Genauigkeit der Abbildungen der digitalisierten Oberflächen durch die Vernetzung auswirkte. Diese Probleme und auch die Wahl der Anfangs- und Randbedingungen müssen noch intensiver untersucht werden und auch die Diskretisierungsmodelle für den verwendeten Solver überdacht werden. In diesem

Zusammenhang wären zudem auch Messungen des Kontaktwinkels mit unterschiedlichen Flüssigkeiten und vergleichenden Simulationen sehr zielführend.

Zusammengefasst lassen sich aus den Projektergebnissen und den daraus abgeleiteten Fragestellungen folgende Empfehlungen für weitere Forschungsprojekte extrahieren:

- Weitergehende Untersuchungen zum Einfluss von Kohlenwasserstoffen auf die hydrophoben Eigenschaften
- Untersuchung der Auswirkungen von Mikro- und Nanostrukturen auf das Anhaften von Eis und Schnee als auch auf die aerodynamischen Eigenschaften des Rotors einer WKA
- Untersuchung zur Skalierbarkeit der Laserstrukturierung auf große Flächen mittels Strahlformung, in Kombination mit schneller Strahlablenkung und damit Strukturierung eines kompletten Rotors einer Klein-WKA
- Vergleichende Feldversuche zur Untersuchung der Effizienz und der Lebensdauer strukturierter Rotorblätter einer Klein-WKA in Relation zu einer unbearbeiteten Rotoroberfläche
- Verbesserung des Simulationsmodells zu größeren Tropfenvolumen, verbessertem Meshing sowie verbesserten Anfangs- und Randbedingungen und Diskretisierungsmodell und experimenteller Abgleich mit Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Oberflächenenergie.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] T. Karlsson, "Cold climate wind power market study 2015-2020," presented at the Winterwind, Skelleftea, Feb. 2017. [Online]. Available: [https://winterwind.se/wp-content/uploads/2015/08/9\\_1\\_24\\_Karlsson\\_IEA\\_Task\\_19\\_-\\_Cold\\_climate\\_wind\\_power\\_market\\_study\\_2015-2020\\_Pub\\_v1.pdf](https://winterwind.se/wp-content/uploads/2015/08/9_1_24_Karlsson_IEA_Task_19_-_Cold_climate_wind_power_market_study_2015-2020_Pub_v1.pdf)
- [2] IG Windkraft, "Windkraftleistung in Österreich." [https://windfakten.at/?xmlval\\_ID\\_KEY\[0\]=1234](https://windfakten.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1234) (accessed Mar. 03, 2023).
- [3] IEA Wind, "Wind Energy Projects in Cold Climates," 2022. [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea\\_pdf/reports/iea\\_windenergy\\_projects\\_in\\_cold\\_climates\\_2011.pdf](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/reports/iea_windenergy_projects_in_cold_climates_2011.pdf) (accessed Mar. 03, 2023).
- [4] R. O'Sullivan, "Wind energy in Europe - 2021 statistics and the outlook for 2022-2026," Feb. 2022. Accessed: Feb. 13, 2023. [Online]. Available: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2021-statistics-and-the-outlook-for-2022-2026/>
- [5] A. M. Nodeland, R. E. Bredesen, and Ø. Byrkjedal, "Risk of ice throw from wind turbines validated with data from field measurements using drones," in *Proc. IWAIS*, Montreal, Jun. 2022.
- [6] L. Gao, Y. Liu, L. Ma, and H. Hu, "A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation," *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 943–956, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.112.
- [7] L. Gao and H. Hu, "Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, no. 42, p. e2111461118, Oct. 2021, doi: 10.1073/pnas.2111461118.
- [8] Z. Goraj, "An Overview of the Deicing and Antiicing Technologies with Prospects for the Future," 2004.
- [9] O. Parent and A. Ilinca, "Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 88–96, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.coldregions.2010.01.005.
- [10] W. D. Bascom, R. L. Cottington, and C. R. Singleterry, "Ice Adhesion to Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces," *J. Adhes.*, vol. 1, no. 4, pp. 246–263, Oct. 1969, doi: 10.1080/00218466908072188.

- [11] P. Guo, Y. Zheng, M. Wen, C. Song, Y. Lin, and L. Jiang, "Icephobic/Anti-Icing Properties of Micro/Nanostructured Surfaces," *Adv Mater*, vol. 24, no. 19, pp. 2642–2648, Apr. 2012, doi: 10.1002/adma.201104412.
- [12] S. A. Kulinich and M. Farzaneh, "On ice-releasing properties of rough hydrophobic coatings," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 60–64, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.coldregions.2010.01.001.
- [13] P. Grimmer, S. Ganesan, M. Haupt, J. Barz, C. Oehr, and T. Hirth, "Energy Efficient De-Icing by Superhydrophobic and Icephobic Polyurethane Films Created by Microstructuring and Plasma-Coating," in *SAE Technical Paper Series*, SAE International, Jun. 2015. doi: 10.4271/2015-01-2159.
- [14] T. M. Schutzius *et al.*, "Physics of Icing and Rational Design of Surfaces with Extraordinary Icephobicity," *Langmuir*, vol. 31, no. 17, pp. 4807–4821, May 2015, doi: 10.1021/la502586a.
- [15] "Wind Energy Factsheet," *Center for Sustainable Systems*. <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/wind-energy-factsheet> (accessed May 30, 2023).
- [16] A. Lasagni *et al.*, "Direct fabrication of surface architectures on polymers and copolymers using laser interference patterning," *Proc. SPIE*. pp. 73650H-73650H–10, 2010. doi: 10.1117/12.821090.
- [17] M. Malinauskas *et al.*, "Ultrafast laser processing of materials: from science to industry," *Light Sci. Appl.*, vol. 5, no. 8, p. e16133, Mar. 2016, doi: 10.1038/lsa.2016.133.
- [18] C. W. J. Berendsen, M. Škřeň, D. Najdek, and F. Černý, "Superhydrophobic surface structures in thermoplastic polymers by interference lithography and thermal imprinting," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 23, pp. 9305–9310, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.apsusc.2009.07.001.
- [19] J. Lv, Y. Song, L. Jiang, and J. Wang, "Bio-Inspired Strategies for Anti-Icing," *ACS Nano*, vol. 8, no. 4, pp. 3152–3169, Apr. 2014, doi: 10.1021/nn406522n.
- [20] Y. H. Yeong, A. Milionis, E. Loth, J. Sokhey, and A. Lambourne, "Atmospheric Ice Adhesion on Water-Repellent Coatings: Wetting and Surface Topology Effects," *Langmuir*, vol. 31, no. 48, pp. 13107–13116, Dec. 2015, doi: 10.1021/acs.langmuir.5b02725.
- [21] A. Alizadeh *et al.*, "Temperature dependent droplet impact dynamics on flat and textured surfaces," *Appl Phys Lett*, vol. 100, no. 11, p. 111601, 2012, doi: 10.1063/1.3692598.

## 7 Anhang

## 8 Kontaktdaten

ProjektleiterIn: a.o. Univ. Prof. DI Dr. Gerhard Liedl

Institut/Unternehmen: TU Wien, Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Kontaktadresse: Getreidemarkt 9, 1060 Wien, +43 158801-311610, [gerhard.liedl@tuwien.ac.at](mailto:gerhard.liedl@tuwien.ac.at),  
<https://www.tuwien.at/mwbw/ift/llf>, <https://www.nice-project.at>

Partner: Energiewerkstatt, Heiligenstatt 23, A-5211 Friedburg, [office@energiewerkstatt.org](mailto:office@energiewerkstatt.org)