



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften

Vorstand: Wolfgang Liebert

Betreuer: Wolfgang Kromp

RISIKEN DER VEREISUNGS-PROBLEMATIK BEI
WINDENERGIEANLAGEN UNTER BESONDERER
BERÜCKSICHTIGUNG DER SITUATION IN ÖSTERREICH

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von
Markus Drapalik

Wien, Oktober 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Mag. Markus Drapalik

Danksagung

Ich danke Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, allen die Kaffee brachten, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee, Kaffee und meinen Freunden und Verwandten.

- frei nach phdcomics - <http://phdcomics.com/comics.php?f=1834>

Ich habe sehr vielen Menschen zu danken, die diese Arbeit überhaupt erst möglich machten. Allen voran meiner Ehefrau, die neben den Herausforderungen einer Schwangerschaft es auch noch fertig brachte, mir die nötige Zeit zu verschaffen, diese Arbeit schreiben zu können. Meiner Tochter danke ich, dass sie die vielen Wochenenden ertrug, in denen ihr Vater dringend noch etwas schreiben musste.

Weiters danke ich meiner ganzen Familie, die mich vor allem in der Endphase des Schreibens zu ertragen hatte, insbesondere meinem Schwiegervater, der diese Arbeit zumindest zweimal durchkorrigierte. Auch mein Bruder Florian kontrollierte mit viel Geduld und einem Auge für Details diese Arbeit.

Ich bin auch meinen Arbeitskollegen zu großem Dank verpflichtet, die mich in den letzten Wochen und Monaten des Schreibens soweit von Aufgaben entlasteten, dass die Fertigstellung dieser Arbeit überhaupt erst möglich wurde. Viele von ihnen, insbesondere Florian Drapalik, Christian Gepp, Klaus Gufler, Sebastian Purker und Larissa Zajicek, unterstützten mich auch bei der Durchführung der Experimente und Beobachtungen, wechselnd bei 30° im Schatten, knietiefem Schnee und stürmischem Wind. Hier möchte ich vor allem noch meinen Kollegen Sebastian Purker hervorheben, der in unzähligen Tagen im Labor dafür sorgte, dass die Experimente überhaupt durchgeführt werden konnten, um dann noch Stunden im Klettergurt hängend auf Türmen zu verbringen. Weiters sind Nikolaus Arnolds erste Versuche einer Modellierung zu erwähnen, sowie die stetige Unterstützung von Mandana Ameri, die mir nicht nur viele administrative Aufgaben abnahm, sondern auch für Privates immer ein offenes Ohr hatte.

Da diese Arbeit sich nur wenig mit meteorologischen Problemen beschäftigt, diese aber natürlich im Kontext von Vereisung große Bedeutung haben, gilt mein Dank auch den Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Meteorologie, namentlich Herbert Formayer, Irene Schicker und Bernhard Pospichal, die mich in diesen Fragen unterstützten. Auch Laura Morawetz in ihrer Funktion als Assistenz der Leitung kam hier eine wichtige Rolle zu.

Für die hochwertigen Filmaufnahmen, die der qualitativen Untersuchung von Eisfall dienten, und die spätere Beratung bei Fragen der Videotechnik möchte ich Richard Kromp danken. Bei der statistischen Auswertung der Untersuchungen wiederum war die professionelle Unterstützung durch Karl Moder eine große Hilfe. Für die Herstellung vieler Probekörper möchte ich mich noch bei Marek Kuras bedanken sowie auch für seine, Helga Kromp-Kolbs und Roland Gutwengers Unterstützung bei den ersten Abwürfen.

Weiters danke ich den Förderstellen, die Teile dieser Arbeit durch die Finanzierung der zugehörigen Forschungsprojekte ermöglichten. Die Arbeiten zum Monitoring von Eisabfall wur-

den hierbei durch den Klima- und Energiefonds unterstützt. Die Arbeiten zur Kleinwindkraft wurden im Rahmen des Projekts Urbane Windenergie aus dem Programm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert.

Besonderer Dank gebührt meinem Institutsleiter Wolfgang Liebert, dessen Bemühungen mir erst die nötigen Ressourcen verschafften, um diese Arbeit fertigstellen zu können.

Meinem Doktorvater Wolfgang Kromp habe ich selbstverständlich ganz besonders zu danken. Seinen Bemühungen ist es zu verdanken, dass die Thematik des Eisabfalls erst zum Institut für Risikoforschung der Universität Wien, das später zum Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften der Universität für Bodenkultur Wien wurde, kam und schließlich zum Thema meiner Dissertation wurde. Während der letzten Jahre leistete er unzählige Arbeitsstunden bei der Verfassung von Gutachten zum Eisabfall, die einen wesentlichen Beitrag zur Finanzierung meiner Tätigkeiten leisteten. Da er auch der Initiator der Arbeiten des ISR zum Thema Eisfall ist, setzte er auch die ersten Versuche zum Eisfall um. Durch meine Mitarbeit bei diesen entstand die Idee zu dieser Dissertation, die auf seine Anregung um Arbeiten zur Modellierung erweitert wurde.

Selbstverständlich sind Untersuchungen in diesem Umfang nicht ohne die Unterstützung vieler Organisationen und Einzelpersonen außerhalb des universitären Feldes möglich.

Ein wesentlicher Beitrag zu dieser Arbeit stammt daher auch von der Energie Burgenland Windkraft, die einerseits die Beobachtungen von Eisfall ermöglichte und andererseits mehrfach Windenergieanlagen für Abwurfversuche zur Verfügung stellte. Hier möchte ich namentlich vor allem Günter Clauss, Klaus Maras, Johannes Horvath, Michael Dahl, Martin Horvath, Markus Lang und Werner Peck nennen.

Weiters wurden von Vestas Wind Systems A/S und W.E.B. Windenergie AG Ressourcen für die Durchführung der Experimente zur Adhäsion von Eis an Beschichtungen zur Verfügung gestellt. Von Vestas möchte ich Jens Dieter Clausen, Henning Schröder, Erhart Kurz und Martin Rosza erwähnen, mit denen ich viele produktive Gespräche hatte. Frank Dumeier, Andreas Dangl und Dietmar Schweighart von der W.E.B. möchte ich besonders wegen ihrer anhaltenden Begeisterung für Forschung im Bereich der Windenergie und ihr damit verbundene Unterstützung danken.

In Sachen der Risikobetrachtungen war vor allem die Zusammenarbeit mit der Burgenländischen Landesregierung, insbesondere mit Franz Csillag, Christian Schügerl, Michael Deutsch und Ulrike Zschech, für diese Arbeit sehr wertvoll.

Die Durchführung der ersten Hubschrauber-Experimente war wiederum nur mit Hilfe des österreichischen Bundesheeres möglich, insbesondere durch die Hilfe von Generalleutnant Johann Luif und seinem Team.

Weitere Hubschrauber-Experimente erforderten die Unterstützung durch den Flugplatz Spitzberg, repräsentiert durch Wolfgang Oppelmayer, und die Heli Austria GmbH mit ihrem Piloten Anton Rainer und seinem Co-Piloten. Hier ist allen Beteiligten für ihre Geduld und ihr Verständnis für unsere zum Teil ungewöhnlichen Wünsche und unser mangelndes Wissen um Flugsicherheit zu danken.

Viele Organisationen und Personen unterstützten mich auch durch informative Gespräche und Hinweise, die den Einstieg in diese komplexe und verzweigte Materie ermöglichten. Hier ist allen voran die Interessengemeinschaft Windkraft Österreich zu nennen, insbesondere Stefan

Moidl, Ursula Nährer und Lukas Pawek. Weiter unterstützten mich die Mitarbeiter der Energiewerkstatt e.V. und der Energiewerkstatt GmbH Andreas Krenn, Hans Winkelmeier und Helmut Maislinger.

Wertvolle Hilfe in rechtlichen Belangen kam von Christian Schmelz von der Schönherr Rechtsanwälte GmbH.

Große Unterstützung kam auch von diversen weiteren Betreibern, wie z.B. der ImWind Operations GmbH, vertreten durch Richard Distl und Stephan Parrer. Weitere Hilfe kam von Gottfried Pschill, Friedrich Metzker, Walter Graf und Johann Raser vom Energiepark Bruck a.d. Leitha. Auch Markus Winter und Roman Gepp von der Windkraft Simonsfeld AG standen mir für Fragen zur Verfügung, sowie David Kaderabek von der evn naturkraft Erzeugungsgesellschaft m.b.H. Zu meinen weiteren Unterstützern zählen auch Markus Forster vom Windpark Laussa sowie die Mühlenwarte René Malik und Norbert Dolliner vom Windpark Steinberg-Prinzendorf.

Viele weitere technische Informationen bekam ich von Andreas Stampfl von der Enercon GmbH, Oliver Raupach vom TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG sowie von Jürgen Kröning und Tees Nachtigall vom DEWI-OCC (Offshore and Certification Centre).

Kurzfassung

Mit dem zunehmenden Ausbau der Windenergie rücken auch Fragen der Sicherheit stärker in den Fokus der wissenschaftlichen Betrachtung. Ein spezieller Fall ist hierbei die Vereisung von Anlagen, die neben den wirtschaftlichen Konsequenzen in Form geringerer Produktion vor allem ein erhöhtes Risiko durch Eiswurf, dem Wegschleudern angefrorener Eisstücke, oder Eisfall, dem Verfrachten angefrorener Eisstücke durch den Wind bei Stillstand einer Windenergieanlage, mit sich bringt. Während sich ersteres durch Eisdetektion und Abschaltung verhindern lässt, ist zweiteres beim Betrieb von Windenergieanlagen in kalten Regionen unvermeidlich. Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Quantifizierung solcher Risiken und Reduktionsmöglichkeiten derselben. Dazu werden auch mögliche Metriken für Risiko und Akzeptanzkriterien diskutiert.

Zur Untersuchung der tatsächlichen Gefährdung durch Eisfall wurden Beobachtungen solcher Ereignisse durchgeführt. Bei diesen wurden erste Daten über Fallweiten, Geometrie und Dichte von Eisfragmenten gesammelt. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Vereisungseignissen sowie der technischen Schwierigkeiten der Beobachtung derselben wurden weiters erstmalig Experimente mit künstlich geschaffenen Probekörpern, die realen Eisfragmenten mit unterschiedlich hohem Detailgrad nachempfunden wurden, durchgeführt. Im Rahmen dieser Experimente wurden mehrere hundert Abwürfe getätigt, wobei hier einerseits die erreichten Fallweiten und andererseits die Flugbahnen aufgezeichnet wurden.

Der Vergleich dieser Messungen mit Simulationen, die auf gängigen Modellen basieren, zeigt, dass diese Modelle die Realität nur unzureichend abbilden. Abhängig von der jeweiligen Probenform, wurden Fallweiten sowohl über- als auch unterschätzt. Daher sind die gegenwärtigen Modelle als unzureichend für die zuverlässige Bewertung von Eisfall einzustufen.

Weiters wurde auch Eiswurf von Kleinwindenergieanlagen untersucht. Hierbei wurden, ähnlich wie bei Großwindenergieanlagen, sowohl Beobachtungen als auch Experimente auf Basis der Daten der Beobachtungen durchgeführt. Für die Experimente wurde ein Mechanismus geschaffen, der es ermöglicht, Probekörper gezielt bei bestimmten Geschwindigkeiten und Winkeln wegzuschleudern, wodurch Eiswurf gut nachempfunden werden kann. Hier zeigt sich, dass im Extremfall Wurfweiten vom vierfachen der Abwurfhöhe erreicht werden.

Auch die Möglichkeit der Beschichtung von Rotorblättern, um Eisansatz zu reduzieren oder zu verhindern, wurde betrachtet. Hierbei ist von Bedeutung, dass Beschichtungen starker Erosion ausgesetzt sind, weshalb ihre Funktionalität nach längerem Einsatz überprüft werden sollte. Hierzu befindet sich derzeit unter Mitarbeit des Autors ein experimenteller Aufbau in Entwicklung, der die Messung der Adhäsionskraft von Eis in-situ am Rotorblatt ermöglichen soll.

Schließlich wurden verschiedene Metriken und Akzeptanzkriterien für Risiko verglichen und die LIRA-Metrik (Localized Individual Risk per Annum) und das ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable) als sinnvollste Wahl für allgemeine Fälle der Risiko-Betrachtung von Eisfall und Eiswurf identifiziert.

Abstract

With the increasing use of wind energy, there is also a stronger focus of scientific research on questions of safety. Icing of wind turbines is a particular case, which results not only in economic consequences in the form of lower production but also in additional risk due to ice throw (the ejection of pieces of ice from the moving rotor) or ice shed (the shedding and subsequent transport of ice pieces by the wind while the rotor is at a standstill). While the former can be prevented by ice detection and shutdown, the latter is unavoidable in the operation of wind turbines in cold regions. The thesis quantifies these risks and addresses possible ways of reducing risk. Finally, metrics and acceptance criteria for these risks are discussed.

Observations of events of ice shed were carried out to investigate the risk involved. Data on size, geometry and density of ice fragments were collected. Due to the comparatively small number of icing events in Austria as well as the technical difficulties in the observation of ice shed, experiments with artificially created test specimens modelled on real ice fragments with different degrees of detail, were carried out. During these experiments – the first of their kind – several hundred specimen drops were carried out and fall distances as well as trajectories were recorded. Comparison of these measurements with simulations, based on frequently used models, show that these models do not adequately reflect reality. Fall distances were both overestimated and underestimated in simulations, depending on specimen type. Therefore, the current models are considered to be inadequate for reliable assessment of ice shed.

Ice throw from small wind turbines has also been investigated. Ice throw was observed and experiments were carried out on the basis of the collected data. For the experiments, an innovative mechanism was created that allows specimen to be thrown at defined speeds and angles, whereby ice throw can be simulated well. It was found that, in extreme cases, throwing distances four times the discharge height are reached.

Special coatings for rotor blades to reduce or prevent ice formation were also considered. Rotor blade coatings are subject to severe erosion, therefore their functionality needs to be tested regularly during long-term use. For this purpose, a process is being developed at the ISR/BOKU to allow the measurement of the adhesion force of ice in situ at the rotor blade.

Finally, different metrics and acceptance criteria for risk were compared, and the LIRA (Localized Individual Risk per Annum) metric and the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle were identified as the most sensible choices for general cases of risk assessment of ice shed and ice throw.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	11
2	Stand von Forschung und Technik	14
2.1	Eisfall und Eiswurf	14
2.1.1	Risikorelevanz von Eisfragmenten	18
2.1.2	Logarithmisches Windprofil	18
2.2	Vereisung	19
2.3	Eisdetektion	22
2.3.1	Temperatur und relative Luftfeuchte (synoptisch)	23
2.3.2	Differenz beheiztes/unbeheiztes Anemometer	23
2.3.3	Ultraschall	23
2.3.4	Leistungskurve	24
2.3.5	Kapazitive Messung	24
2.3.6	Eigenfrequenzmessung	24
2.4	Enteisung und Vereisungsprävention	24
2.4.1	Heißluft	25
2.4.2	Elektrothermisch	25
2.4.3	Mechanisch	25
2.4.4	Beschichtungen	26
2.5	Adhäsion von Eis	26
3	Eisfall und Eiswurf	30
3.1	Erste Experimente	30
3.2	Monitoring	36
3.2.1	Methode	36
3.2.2	Ergebnisse des Monitorings	39
3.3	Monitoring bei KWEA	51
3.4	Experimente	53
3.4.1	Auswahl der Probekörper	53
3.4.2	Übersicht Probekörper	58
3.4.3	Methode und Durchführung	59
3.4.4	Ergebnisse	63
3.5	Unterschiede Groß- und Kleinwindkraft	72
3.6	Eiswurf bei Kleinwindenergieanlagen	74
3.6.1	Methodik und Experimenteller Aufbau	75
3.6.2	Eingesetzte Probekörper	78
3.6.3	Versuchsdurchführung	79
3.6.4	Wurfweiten	80
3.6.5	Trajektorien	82

3.7	Modellierung	82
3.7.1	Analyse des Modells nach Biswas u. a. (2012)	83
3.7.2	Analyse des Modells nach Baker (2007)	86
3.8	Vergleich von Modell und Experimenten	89
3.8.1	Wurftrajektorien bei KWEA	94
3.9	Vergleich mit bestehenden Studien zu Eiswurf	96
3.10	Simulation	96
3.10.1	Simulation von Eiswurf	98
4	Techniken zur Vereisungsprävention und zur Enteisung	102
4.1	Vergleich	102
4.2	Testverfahren für Oberflächenbeschichtungen	104
4.2.1	Oberflächenspannung	104
4.2.2	Oberflächenrauigkeit	105
4.2.3	Adhäsionskraft	105
5	Risikobewertung	107
5.1	Risiko-Metriken	107
5.1.1	Anwendbarkeit	108
5.2	Akzeptanzkriterien	110
5.2.1	ALARA - As Low as Reasonably Achievable	110
5.2.2	MEM - Minimal Endogenous Mortality	111
5.2.3	GAMAB – Globalement Au Moins Aussi Bon	111
5.2.4	Anwendbarkeit	111
5.3	Risikobewertung von Eisfall	112
5.4	Sonderfälle	114
5.4.1	Gebäude	115
5.4.2	Wanderwege, Langlaufloipen	115
5.4.3	Autobahnen	115
5.4.4	Waldstandorte	116
5.4.5	Kleinwindkraft	116
5.4.6	Kumulative Effekte	117
5.5	Ökonomische Konsequenzen	117
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	119
6.1	Empfehlungen für zukünftige Monitoring-Projekte	121
6.2	Empfehlungen für künftige Experimente	122
6.3	Erweiterung der Betrachtungen	123
	Literaturverzeichnis	124
7	Tabellenverzeichnis	133
8	Abbildungsverzeichnis	135

1 Einleitung und Zielsetzung

„Seht, nun fangen wir an. Wenn wir am Ende der Geschichte sind, wissen wir mehr als jetzt [...]“

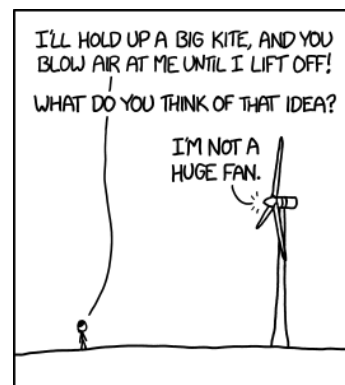
(Hans Christian Andersen, Die Schneekönigin)

Der schnelle und ungebrochene Ausbau der Windenergie verlangt nach einer frühzeitigen Gestaltung dieser Technologie und dem Auffinden von Alternativen und Vermeidungsoptionen für potenziell nachteilige Entwicklungen. Insbesondere die Kombination des Wunsches nach einer hohen oder sogar vollständigen Deckung des österreichischen Strombedarfs durch erneuerbare Energieträger mit dem Wunsch einer möglichst kostengünstigen, d.h. möglichst nahe dem Netztarif produzierenden, und umweltverträglichen Variante zur Produktion, lässt die Windenergie besonders interessant erscheinen, führt aber auch zum Erschließen immer neuer, eventuell problematischer Standorte wie Waldflächen oder (vor)alpiner Lagen.

Zwar ist Österreich verglichen mit anderen Ländern wie dem skandinavischen Raum oder Kanada deutlich weniger von Vereisung betroffen, jedoch besteht eine große Sensitivität gegenüber diesem Thema. So herrscht in mehreren österreichischen Bundesländer die Genehmigungspraxis vor, den Betrieb der Anlagen bei Vereisung nicht zu gestatten. Dadurch wird rechtlich die Möglichkeit von Eiswurf ausgeschlossen. Die damit verbundene Abschaltung der Anlagen bei Vereisungsbedingungen führt zwar meist zu geringerer Vereisung, als dies bei Anlagen im Betrieb der Fall ist, jedoch lässt sich das Vereisen der Anlagen nicht verhindern. Somit ist Eiswurf zwar ausgeschlossen, Eisfall aber weiterhin möglich. Praktisch bedeutet dies, dass sich das Eis entweder durch natürliche Erwärmung oder Enteisungstechniken, wie Beheizen der Rotorblätter, in Fragmenten von den Rotorblättern im Stillstand löst und herabfällt. Abhängig von den vorherrschenden Windbedingungen kommt es zu einer Verfrachtung der Eisfragmente durch den Wind, wodurch sich eine Gefährdungssituation auch außerhalb des Rotorradius ergibt. Die Größe der abfallenden Eisfragmente variiert zwar stark, zumeist ist aber ein Großteil der Fragmente schwer genug, um als gefährlich eingestuft zu werden. Speziell interessant an der Untersuchung von Eisfall ist, dass Eiswurf technisch zu verhindern ist, während Eisfall in jedem Fall stattfindet.

Die Bedeutung von Eisfall und Eiswurf wird international durch das Bestehen einer Arbeitsgruppe der International Energy Agency (IEA) widerspiegelt, der IEA Wind Task 19 Wind Energy in Cold Climates Expert Group, deren Ziel unter anderem das Entwickeln von „Guidelines for Ice Risk Assessments“ ist. Auch bieten mehrere Unternehmen international Gutachten zur Frage der Gefährdung durch Vereisung an.

Vereisung stellt auch bei Kleinwindenergieanlagen ein relevantes Sicherheitsrisiko dar. Kleinwindenergieanlagen wesentlich schwerer wirtschaftlich zu betreiben, weswegen die Anschaffungs-



Quelle: xkcd.com/1378

kosten niedrig gehalten werden, was wiederum zu einer reduzierten technischen Ausstattung führt. Praktisch bedeutet dies, dass eine Abschaltung bei Vereisung mangels Detektion nicht möglich ist, wodurch es zwangsläufig zu Eiswurf kommt. Je nach Aufstellungsort der Anlage kann dies praktisch irrelevant sein (im unzugänglichen Freifeld) oder ein unüberwindbares Hindernis (im dichten urbanen Raum) für den Betrieb darstellen.

Weiters stellt sich die Frage, ob Probleme durch Vereisung vermieden oder reduziert werden können. Hier bieten sich neben anderen Verfahren, wie z.B. Beheizung, eisabweisende Oberflächenbeschichtungen an. Da diese auf der spezifischen Gestaltung der Oberfläche (z.B. Superhydrophobie) basieren, führen Beschädigungen derselben potenziell zu einer Abnahme der Schutzwirkung der Beschichtungen. Daher ist es von Interesse, Verfahren zur Überprüfung des Zustandes derartiger Beschichtungen zu entwickeln.

Ein interessanter Umstand bei der Durchführung von Risikobetrachtungen ist, dass keine internationalen Vorgaben für Metriken oder Akzeptanzkriterien existieren. Bevor also eine Quantifizierung von Risiken stattfindet, gilt es festzulegen, in welcher Form diese durchgeführt werden soll und welche Grenzwerte eingehalten werden sollen. Hierzu existiert eine Vielzahl möglicher Ansätze, von denen mehrere grundsätzlich geeignet erscheinen, unter anderem abhängig von der Zielsetzung der Untersuchungen.

Diesen Überlegungen folgend lässt sich die zentrale Problemstellung dieser Arbeit, die Frage nach den **Risiken für Leib und Leben durch Vereisung an Windenergieanlagen**, in mehreren Unterfragen behandeln:

- Welche Fallweiten und Eisfragment-Eigenschaften sind bei Eisfall von Großwindenergieanlagen zu finden?
- Wie lassen sich die natürlichen Bedingungen in Experimenten nachbilden?
- Welche Modelle stehen für die Simulation von Eiswurf zur Verfügung und wie decken sich die Ergebnisse mit experimentellen Ergebnissen?
- Stellen Beschichtungen von Rotorblättern eine sinnvolle Option zur Vermeidung von Vereisung dar und wie lässt sich deren Funktion überprüfen?
- Welche Metriken und Akzeptanzkriterien sind geeignet, Gefährdung durch Vereisung zu beschreiben und zu bewerten?

Die Betrachtungen von Eisfall sollen hierbei auf die Untersuchung der ballistischen bzw aerodynamischen Fragen beschränkt bleiben. Zwar ist die Bedeutung der Meteorologie für die Vereisungsproblematik naturgemäß sehr groß, jedoch würde die Behandlung dieser Fragen einerseits den Umfang der Arbeit sprengen und andererseits existieren bereits mehrere großangelegte Projekte zur meteorologischen Untersuchung von Vereisung (z.B. von Makkonen (2000)).

Ebenfalls kaum betrachtet werden die ökonomischen Konsequenzen von Vereisung. Auch hier existiert eine Vielzahl von Optionen und Herangehensweisen, die ebenfalls bereits stark beforscht werden (z.B. von Øyvind Byrkjedal (2017)).

Zum Verständnis einiger Aspekte dieser Arbeit ist es wesentlich die historische Genese nachzuvollziehen. 2010 wurde der Experimentalphysiker und Risikoforscher Wolfgang Kromp, damaliger Leiter des heutigen Instituts für Sicherheits- und Risikowissenschaften, mit Gutachtertätigkeit betreffend der Eisfall-Problematik beauftragt. Die zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Gutachten beriefen sich auf vergleichsweise einfache Berechnungen basierend auf idealisierten Formen. Da die Gültigkeit dieser Berechnungen nicht belegt werden konnte, wurden von ihm

eine experimentelle Herangehensweise an die Fragestellung verfolgt und erste Abwurfversuche von vereinfachten Eismodellstücken durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche entwickelte sich das Thema dieser Dissertation, die bald neben der experimentellen Bearbeitung durch theoretische Modellierung ergänzt wurde. Weitere Projekte aus dem Umfeld der Vereisungsproblematik führten zu einer umfassenderen Betrachtung dieses Themas. Gleichzeitig wurde jedoch die Gutachtertätigkeit von Wolfgang Kromp mit Unterstützung des Autors dieser Arbeit fortgesetzt, wodurch in den letzten Jahren über 60 Gutachten zur Gefährdung durch Eisfall entstanden.

2 Stand von Forschung und Technik

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über den Wissensstand in Forschung und Technik in den für diese Arbeit relevanten Gebieten. Hierbei wird zuerst die gezielt zu Eisfall bzw. -wurf durchgeführte Forschung beschrieben. Dann wird auf Vereisung und die Art und Weise, auf die diese klassifiziert und beschrieben wird, eingegangen. Aufbauend darauf beschreiben die darauf folgenden Abschnitte die momentan eingesetzten und in naher Zukunft zu erwartenden Technologien zur Detektion von Eis sowie zu Enteisung und Vereisungsprävention. Da einige Verfahren der Vereisungsprävention auf Oberflächenbeschichtungen beruhen, wird schließlich die Physik der Adhäsion von Eis genauer betrachtet.

2.1 Eisfall und Eiswurf

Das Risiko durch Eisfall von Gebäuden und Strukturen ist seit langem bekannt und wird insbesondere beim Bau von Hochspannungsleitungen und Funkmasten berücksichtigt. Erstere sind zwar sehr häufig, aber verglichen mit Windenergieanlagen niedrig und haben den Vorteil, dass sie durch die vorhandene Abwärme schwerer vereisen als andere Strukturen. Demgegenüber sind Funktürme in Hinsicht der Höhe durchaus mit Windenergieanlagen vergleichbar, jedoch nicht in Hinsicht der vereisenden Fläche.

Potenzielle Risiken durch die Vereisung von Windenergieanlagen wurden erstmalig von Seifert 1996 auf der Boreas II Konferenz behandelt (Seifert, 1996). Eine systematische Bearbeitung des Problems wurde im Rahmen des Projektes „Wind Energy Production in Cold Climates“ (WECO) durchgeführt, wobei unter anderem Daten über die Intensität der auftretenden Vereisung gesammelt wurden. Weiters wurden 14 Fragmente abgefallenen oder geworfenen Eises gesammelt und Gipsabdrücke für die spätere Untersuchung gemacht (Seifert und Richert, 1997). Mit Modellkörpern aus Epoxidharz wurden zusätzlich Untersuchungen im Windkanal zur Bestimmung des Strömungswiderstandskoeffizienten durchgeführt.

Weiters wurde im Rahmen des WECO Projektes von Morgan und Bossanyi unter Verwendung früherer Daten ein einfaches Eiswurfmodell entwickelt (Morgan und Bossanyi, 1996). Dieses Modell basiert auf simplen Bewegungsgleichungen unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -\frac{1}{2}\rho A c_d v_{rel} \dot{x} \\ m\ddot{y} &= -\frac{1}{2}\rho A c_d v_{rel} (\dot{y} - v_w) \\ m\ddot{z} &= -mg - \frac{1}{2}\rho A c_d v_{rel} \dot{z} \end{aligned} \quad (2.1)$$

mit

ρ	...	Luftdichte in kg/m^3
A	...	durchschnittliche Querschnittsfläche in m^2
c_d	...	Strömungswiderstandskoeffizient
v_w	...	Windgeschwindigkeit in m/s
$v_{rel} = \sqrt{\dot{x}^2 + (\dot{y} - v_w)^2 + \dot{z}^2}$	...	relative Windgeschwindigkeit in m/s
g	...	Fallbeschleunigung in m/s^2
m	...	Masse des Eisfragments in kg

wobei die Richtung der Windgeschwindigkeit in y-Richtung angenommen wird und die Startgeschwindigkeiten mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Rotorblattes gleichgesetzt werden.

Es wird eine uniforme Windgeschwindigkeitsverteilung (keine Böen) angenommen und dass die fallenden Fragmente kein stabiles Verhalten zeigen, also der Auftrieb auch ignoriert werden kann: "It can generally be assumed that aerodynamic lift can be ignored, since the fragment is most likely to 'tumble' rather than achieving any stable attitude during its flight" (Morgan und Bossanyi, 1996, S6). Die von Morgan und Bossanyi durchgeführten Berechnungen führen zu einer sicheren Entfernung für Eiswurf von 200 – 250 m beinahe unabhängig von der Turm- bzw. Anlagenhöhe. In einer darauffolgenden Publikation werden diverse Verbesserungen des Modells beschrieben, unter anderem die Berücksichtigung von Auftrieb, allerdings werden keine Details dazu beschrieben und die veröffentlichten Daten unterscheiden sich kaum von den vorhergehenden. (Morgan u. a., 1997)

Im Endbericht des WECO-Projektes wird eine Daumenregel vorgestellt, die von der zuvor genannten Publikation abgeleitet wurde. Hierbei wird für Anlagen mit hoher Vereisungswahrscheinlichkeit ein Mindestabstand von den nächstgelegenen Objekten von der 1.5-fachen Anlagenhöhe bzw. die Abschaltung der Turbine bei Vereisung vorgeschlagen: "it can be recommended for sites with high probability of icing to keep a distance d_{ice} between the turbines and nearest objects of about $d_{ice} = 1.5 \cdot (\text{hub height} + \text{diameter})$ [,] or it can be recommended to stop the turbine automatically during the icing period and wind coming from unfavorable directions, if the public safety might be affected by ice throw" (Tammelin u. a., 1998, S23). Eisfall von Anlagen wird in der Arbeit nicht direkt behandelt.

Eine wesentlich spätere Arbeit von Seifert präsentiert die gemessenen Strömungswiderstandskoeffizienten für die gesammelten Eisfragmente aus dem WECO Projekt. Der durchschnittliche Wert beträgt hierbei $c_d = 1.2$, wobei aber $c_d = 1.0$ als konservativer Wert für die vorgestellten Berechnungen benutzt wird. Diese basieren wieder auf den Gleichungen aus (Morgan und Bossanyi, 1996) mit an den untersuchten Standort angepasster Luftdichte, einer angenommenen Eisdichte von 700 kg m^{-3} und vernachlässigbarem Auftrieb. (Seifert u. a., 2003) In dieser Arbeit finden sich einige weitere Annahmen; unter anderem wird davon ausgegangen, dass Eis-Akkumulation und Abwurf ein kontinuierlicher Prozess ist. Eisfall von einer stillstehenden WEA wird ebenfalls behandelt, wobei auch hier eine Faustformel präsentiert wird:

$$d = v \frac{D/2 + H}{15} \quad (2.2)$$

mit

v ... Windgeschwindigkeit auf Höhe der Nacelle in m/s
 d ... maximale Fallweite in m
 D ... Rotordurchmesser in m
 H ... Höhe der Nacelle in m

Zur Beurteilung von Standorten wird eine standortabhängige Berechnung des individuellen Risikos auf Basis von Wind- und Anlagendaten, sowie der Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen in der Umgebung empfohlen.

Einzelne Versuche zum systematischen Erfassen von Fall- und Wurfweiten wurden wiederholt gemacht, allerdings waren die Zahlen der untersuchten Proben immer gering (LeBlanc, 2007; Tetratex EC, 2007). Eine umfangreiche Arbeit zur Erfassung von realen Fall- bzw. Wurfweiten wurde von der Firma meteotest, Schweiz, an einer 600 kW Enercon E-40 am Gütsch auf 2300 m Seehöhe durchgeführt. In einer ersten Messkampagne wurden in den Wintern 2005/06 und 2006/07 121 Eisfragmente gesammelt, vermessen, gewogen und ihre Position relativ zur WEA bestimmt. Die größte gefundene Entfernung eines Eisfragments lag bei 92 m, das schwerste Fragment wog 1800 g (Cattin u. a., 2007). Zwar bestätigen diese Daten die oben beschriebene Faustformel für maximale Wurfweiten - im Falle der untersuchten Anlage ergibt sich eine maximale Wurfweite von 135 m - jedoch beschreiben die Autoren das Gelände als schwer zugänglich, sodass einige Vereisungsereignisse nicht untersucht werden konnten. Dies legt weiters die Vermutung nahe, dass weit geschleuderte Fragmente vermutlich nicht hätten aufgefunden werden können. Die Anzahl der gefundenen Fragmente konnte bis 2009 auf 228 im Rahmen von 32 Vereisungsereignissen erhöht werden (Cattin u. a., 2009). Seither wurden keine weiteren Untersuchungen dieser Art am Gütsch durchgeführt, jedoch wurden in St. Brais Beobachtungen an einer Enercon E-82 mit 78 m Nabenhöhe in den Wintern 2012/13 und 2014/15 durchgeführt, sowie in Mont Crosin an einer Vestas V-90 mit 95 m Nabenhöhe im Winter 2012/15. Hierbei wurden weitere ca. 750 Eisstücke aufgefunden. Um Vergleichbarkeit herzustellen, wurde der Abstand der Fundorte in Prozent der jeweiligen Anlagengesamthöhe angegeben, wobei die höchste Distanz bei 140% der Gesamthöhe lag. Die Autoren halten fest: „Daraus kann nicht geschlossen werden, dass oberhalb dieser Distanzen kein Eiswurf mehr auftritt. Da der Auswertung aber eine relativ große Datenbasis zugrunde liegt, kann die Wahrscheinlichkeit für größere Distanzen als klein betrachtet werden.“ (Cattin u. a., 2016, S13) In keinem der Fälle wurde zwischen Eisfall und Eiswurf unterschieden.

Die oben beschriebenen Faustformeln wurden abseits der Studien der meteotest keiner weiteren Überprüfung unterzogen, jedoch vielfach zitiert und zur Planung herangezogen (z.B. (Commission, 2004; Homola, 2005; Wahl und Giguere, 2006; LeBlanc, 2007)). Besonders zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Publikationen des IEA Wind Task 19 Wind Energy in Cold Climates. Das Wind Agreement der International Energy Agency (kurz IEA Wind) dient seinen Mitgliedern als Plattform zum Informationsaustausch und der Koordination großangelegter, multinationaler Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Thema Windenergie, gegliedert in einzelne Tasks bzw. Annexe. Der Task 19 beschäftigt sich hierbei mit Windenergie in kalten Klimaten und hatte eine geplante Laufzeit von 2001-2011, wurde jedoch bis 2018 verlängert. Neben den zweijährlich erscheinenden Annual Reports publiziert der IEA Task 19 in unregelmäßigen Abständen Berichte und Empfehlungen zum Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen.

Bereits 2003 erfolgte ein Bericht zum „State-of-the-art of wind energy in cold climates“, der 2009 aktualisiert wurde. Darin werden die Untersuchungen am Gütsch erwähnt und die Bedeutung einer ausreichenden Absicherung gegen Personenschäden durch Eisfall aus Gründen der öffentlichen Akzeptanz unterstrichen (Laakso u. a., 2009). Weiters werden auch hier wieder die Faustformeln von Seifert erwähnt und die Bedeutung tiefergehender Forschung zu dieser Thematik hervorgehoben. Auch die Empfehlungen für Windenergieprojekte in kalten Klimaten (Baring-Gould u. a., 2009) empfiehlt die Formeln als grobe Schätzung, rät aber zu detaillierter Betrachtung. Die Wichtigkeit ausreichender Warnmaßnahmen, z.B. durch Schilder und akustische Signale, wird nochmals hervorgehoben. Die gleiche Situation findet sich nochmals 2012 in der „Study on Recommended Practices“ (Baring-Gould u. a., 2012). Erst der aktuelle Bericht über verfügbare Technologien (Lehtomäki u. a., 2016) setzt sich detaillierter mit den Fragen Eisfall und Eiswurf auseinander. Hier werden als präzisere Alternative zu den Faustformeln ballistische Modelle zur Berechnung von Gefährdungszonen empfohlen. Letztere verwenden im Wesentlichen verfeinerte Varianten der 2003 von Seifert benutzten Gleichungen, berücksichtigen also den Rotordurchmesser und die Gesamthöhe der Anlage, den Luftwiderstand angenommener fallender Eisfragmente sowie die meteorologischen Gegebenheiten des Standortes (Windgeschwindigkeitsverteilung, Lufttemperatur, etc.). Die fehlende Validierung der benutzten Daten und Annahmen wird explizit hervorgehoben.

In einer Präsentation auf der Konferenz winterwind 2016 wurde die Schwierigkeit eines standardisierten Verfahrens zur Erstellung von Eiswurf-Risiko-Assessments besprochen. Da keine allgemeine Datenbasis zur Verfügung steht, unterscheiden sich die Ergebnisse eines ballistischen Modells wesentlich durch die Wahl bzw. Anteile der angenommenen Eisfragmentgrößen und -dichten. Weiters ist die Verteilung des Eises auf dem Rotor vor dem Abfallen nicht klar bekannt und führt ebenso zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Kommt in dem ballistischen Modell ein logarithmisches Windprofil zur Modellierung der mit der Höhe zunehmenden Windgeschwindigkeit zum Einsatz, so verändert die dynamische Rauigkeitslänge, die selten für den Standort bekannt ist, ebenfalls stark das Ergebnis der Berechnungen. Schließlich besteht die Schwierigkeit des Umgangs mit Windböen, respektive der Wahl der Mittelungsperiode der Windgeschwindigkeit, unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeitsverteilung. Schließlich wird noch die Frage nach der Effektivität von Mitigationsmaßnahmen zur Reduktion der Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen im Gefährdungsbereich, und wie diese im Ergebnis zu berücksichtigen ist, aufgeworfen. (Krenn, 2016)

Ein 2011 erstmalig publiziertes, seither aber in der Literatur kaum mehr erwähntes Modell diskutiert auch die Auswirkung des Auftriebs in den aerodynamischen Berechnungen. Da sich die Untersuchungen auf Eiswurf konzentrieren und bei diesen Situationen, in denen der Auftrieb der geworfenen Fragmente eine signifikante Rolle spielt, vermutlich selten sind, wurde nur das theoretische worst-case Szenario (maximale Angriffsfläche für Auftrieb bei 45 deg Winkel) für eine Platte mit den Maßen 10 cm × 80 cm × 2 cm und 1 kg untersucht. Bei einer Windgeschwindigkeit von 15 m s⁻¹ ergibt sich eine maximale Wurfweite von 311 m. Weiters wird bei frei rotierenden Eisfragmenten der mögliche Einfluss des Magnus-Effekts erwähnt. (Biswas u. a., 2012, S897ff) Auf der Basis dieses Modells wurden auch Risiko-Assessments durchgeführt, die ebenfalls fallspezifische Gefährdungszonen definieren (Bredesen, 2014). Speziell zu erwähnen ist hier noch die Schwelle zur Definition risikorelevanter Eisfragmente. Diese wird mit 40 J kinetischer Energie beim Auftreffen als konservativ angenommen (Bredesen, 2014, S6). Weiters wird ein bei Beobachtungen an einem Funkmast aufgefundenes Klareisstück besonders hervorgehoben, das aufgrund seiner aerodynamischen Eigenschaften (22 cm × 39 cm × 1 cm

Größe) eine Fallweite von 210 m bei 20 m s^{-1} erreichte.

Andere Modelle, die auch zur Beschreibung von Eisfall und Eiswurf herangezogen werden können, beschäftigen sich mit der generellen Dynamik von Trümmern wie z.B. Dachziegeln, die bei Sturm verfrachtet werden können. Ein vereinfachtes Modell, das nur eine zweidimensionale Bewegung, sowie die Rotation um eine fixe Achse berücksichtigt, wurde von Baker (2007) veröffentlicht und von Kordi und Kopp (2009) diskutiert. Hierbei wird zusätzlicher Auftrieb durch die Autorotation berücksichtigt. Es baut unter anderem auf den Arbeiten von Tachikawa (1983) auf. Hier ist zu erwähnen, dass der Effekt von Autorotation auf verschieden geformte Platten bereits in (Iversen, 1979) diskutiert wird.

Eine Betrachtung mit allen sechs Freiheitsgraden wird z.B. in (Noda und Nagao, 2010; Richards u. a., 2008) dargestellt. Diese basieren auf Newton- und Euler-Gleichung und generieren Auftrieb entsprechend der effektiv angeströmten Fläche, berücksichtigen aber keinen zusätzlichen Auftrieb durch Autorotation. Die Modelle benötigen empirisch ermittelte Tabellen für den generierten Auftrieb nach Anströmwinkel.

In Anbetracht der Vielzahl zur Verfügung stehender Modelle ist die Validierung derselben von großer Bedeutung. Alle bisherigen Validierungsversuche wie (Hutton, 2014), (Lunden, 2017) oder (Bourgeois, 2017) basieren auf der Beobachtung abgefallener Eisstücke.

2.1.1 Risikorelevanz von Eisfragmenten

Gegenwärtig hat sich die Wahl von 40 J kinetischer Energie beim Aufprall von Eisfragmenten als konservativ angenommene Grenze für die Auswahl risikorelevanter Eisfragmente etabliert (Bredesen, 2014, S6). Dieser Wert entspricht dem niedrigsten empfohlenen Wert des TNO Green Books (van den Bosch u. a., 1992, Kap 4, S. 26), der wiederum auf der Arbeit von Proctor (1982) über industrielles Helm-Design basiert, welche die Werte aus der Arbeit von Nahum (1975) entnimmt. Es wurde in aktuellen Arbeiten darauf hingewiesen, dass detailliertere Kriterien sinnvoll wären, da die 40 J Grenze ausschließlich das Ziel hat, Todesfälle zu vermeiden, jedoch schwere Verletzungen akzeptiert würden. Während dies für die Vergleichbarkeit von Risikobewertungen untereinander nützlich ist, ist es unzureichend als Akzeptanzkriterium für die Platzierung von Infrastruktur. Als Beispiel sei, wiederum nach Nahum (1975), die wesentlich niedrigere kinetische Energie von 6–14 J genannt, die für den Bruch des Jochbogens notwendig ist.

Als abschwächendes Argument ist zu erwähnen, dass in den meisten Fällen von Raueis ausgegangen werden kann, das eine vergleichsweise hohe Kompressibilität aufweist, wodurch bei einem Aufprall ein Teil der kinetischen Energie in die Verformung des Eisfragments übergeht (Bredesen und Refsum, 2015; Kim und Kedward, 2000). Andererseits ist auch bei niedrigen Energien ein Sturz der getroffenen Person möglich, der zu wesentlich stärkeren Verletzungen (insbesondere Hirnverletzungen durch den Coup-Contre-Coup-Mechanismus) führen kann. Welche Mechanismen und Risikoziele zu berücksichtigen bzw. zu verfolgen sind, ist daher für jeden Einzelfall abzuwägen.

2.1.2 Logarithmisches Windprofil

Da das logarithmische Windprofil im Laufe dieser Arbeit mehrfach zur Beschreibung der Windsituation angewandt wird, soll dieses kurz erklärt werden. Es beschreibt die Windgeschwindig-

keit v_w in Abhängigkeit von der Höhe z mit der Gleichung

$$v_w(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z + z_0}{z_0} \quad (2.3)$$

Hierin beschreibt der Schubspannungskoeffizient u_* den Transfer des Impulses zwischen vertikalen Luftschichten, d.h. wie stark die Geschwindigkeiten in verschiedenen Höhen einander beeinflussen. Weiters geht die von-Kármán-Konstante $\kappa \approx 0.41$ ein, sowie die dynamische Rauigkeitslänge z_0 , die jene Höhe über Grund angibt, auf der das Profil auf 0 zurückgeht.

Die Anwendung des logarithmischen Windprofils ist unter der Voraussetzung einer neutralen Schichtung möglich, also bei guter Durchmischung der Atmosphäre, bei der aufsteigende Luftpakete quasi instantan die Temperatur der Umgebung annehmen. Dadurch erfahren sie keine zusätzliche Beschleunigung oder Abbremsung. Neutrale Schichtung tritt eher bei hohen Windgeschwindigkeiten, die die Durchmischung begünstigen, auf, sowie bei Bewölkung, die starke Erhitzung des Bodens tagsüber und schnelle Abkühlung nachts verhindert.

2.2 Vereisung

Die Dynamik der Vereisung an Strukturen ist ein umfangreiches und gut erforschtes Gebiet. Hier soll ein kurzer Überblick über die prinzipielle Physik und die benutzten Modelle gegeben, jedoch nicht im Detail darauf eingegangen werden.

Üblicherweise werden drei verschiedene Arten der Eisbildung unterschieden:

- Vereisung durch gefrierenden Niederschlag: durch gefrierenden Regen oder Ansammlung nassen Schnees
- In-Cloud Icing: Vereisung durch unterkühlte Wassertropfen in Wolken oder Nebel
- Oberflächenreif (Hoar Frost): ist irrelevant im Kontext der Vereisung von Windenergieanlagen

Weiters wird zwischen trockener und nasser Vereisung unterschieden. Bei nasser Vereisung treffen pro Zeiteinheit mehr Wassertropfen auf der Oberfläche auf, als gefrieren können. Daher rinnen diese ineinander und gefrieren immer zu Klareis. Bei trockener Vereisung schlagen Wassertropfen auf und gefrieren, bevor weitere Tropfen auftreffen. Dies führt zu verschiedenen Formen der Vereisung, die jedenfalls Luftblasen verschiedener Größe enthalten und dadurch opak sind.

Die ISO-12494 (ISO12494, 2001) betreffend „Atmospheric icing of structures“ geht auf Vereisung durch gefrierenden Niederschlag und In-Cloud-Icing genauer ein und beschreibt grob die mechanischen Eigenschaften des gebildeten Eises (Tabelle 2.1) sowie die meteorologischen Bedingungen zur Bildung (Tabelle 2.2).

Klareis verfügt von allen Vereisungstypen über die höchste Dichte (ca. 900 kg m^{-3}). Es entsteht durch gefrierenden Regen oder durch nasses In-Cloud-Icing. Die Bildung ist an allen Teilen einer Struktur gleichermaßen möglich.

Gefrierender Nassschnee entsteht bei der Akkumulation nassen Schnees und darauffolgendem Gefrieren desselben an einer Struktur. Während Nassschnee vor dem Gefrieren nur geringe Adhäsion aufweist, steigt diese durch das Gefrieren stark an.

Rau eis ist eine Form festen Niederschlags, der sich bevorzugt durch das Anfrieren unterkühlter Wassertröpfchen aus Wolken oder Nebel entgegen der relativen Windgeschwindigkeit an

Eistyp	Dichte kg/m ³	Adhäsion und Kohäsion	Aussehen	
			Farbe	Form
Klareis	900	stark	transparent	gleichmäßig verteilt / Eiszapfen
Nassschnee	300-600	schwach (Bildung), stark (durchgefroren)	weiß	gleichmäßig verteilt / exzentrisch
Raueis	600-900	stark	opak	exzentrisch in Windrichtung
Raureif	200-600	schwach bis mittel	weiß	exzentrisch in Windrichtung

Tabelle 2.1: Eistypen und deren Eigenschaften nach ISO12494 (2001)

Eistyp	Lufttemperatur °C	Windgeschw. m/s	Tröpfchengröße	Luft-Wassergehalt
NIEDERSCHLAG				
Klareis	−10 °C bis 0 °C	beliebig	groß	mittel
Nassschnee	0 °C bis 3 °C	beliebig	Flocken	sehr hoch
IN-CLOUD ICING				
Klareis		siehe	mittel	hoch
Raueis	siehe Abbildung 2.1	Abbildung 2.1	mittel	mittel
Raureif			klein	niedrig

Tabelle 2.2: Meteorologische Parameter für atmosphärische Vereisung nach ISO12494 (2001)

einer Struktur ausbildet. Die Struktur ist vergleichsweise locker und schließt große Mengen Luftbläschen ein, die zu einem milchigen Aussehen führen, bei dem einzelne Partikel gut erkennbar sind. Die Bildung ist stark von Temperatur und Windgeschwindigkeit abhängig (siehe Abbildung 2.1).

Einen Überblick über vorhandene Daten und Messmethoden zur Vereisung an Strukturen findet sich z.B. in (COST-727, 2007). Hierin wird auf den, ebenfalls durch die zuvor genannte ISO-Norm 12494 festgelegten, Standard für eine Vorrichtung zur Messung von Vereisung Bezug genommen. Diese ist wie folgt definiert:

Ein glatter Zylinder mit einem Durchmesser von 30 mm wird vertikal ausgerichtet und kann entlang der Vertikalachse frei rotieren. Der Zylinder soll eine Mindestlänge von 0.5 m aufweisen

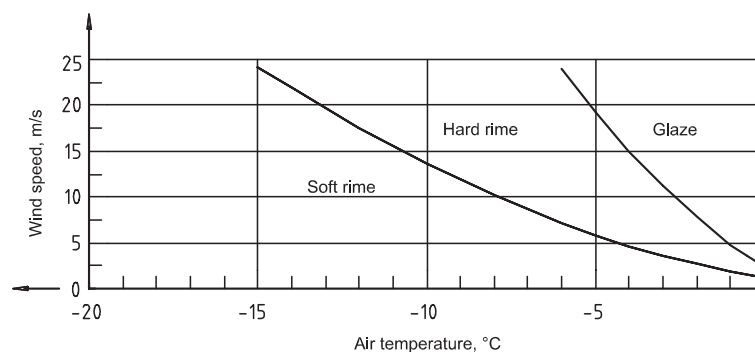


Abbildung 2.1: Arten der Eisbildung in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur aus ISO12494 (2001, S7). „Glaze“ entspricht Klareis, „Hard rime“ Raueis und „Soft rime“ Raureif.

und in einer Höhe von 10 m über dem Boden montiert sein. Dies entspricht den von Makkonen und Stallabrass 1984 durchgeführten Experimenten (Makkonen und Stallabrass, 1984) und wird für Modellrechnungen, wie sie in (Makkonen, 2000) dargestellt werden, übernommen.

Bei der Beschreibung von Vereisung an WEA ist eine Unterscheidung dreier verschiedener Phasen, die einander überlappen können, üblich (Cattin, 2012, S9):

- *Meteorologische Vereisung*: Hier liegen die meteorologischen Bedingungen vor, bei denen es zu Vereisung kommen kann. Diese Phase geht allen anderen voraus.
- *Instrumentelle Vereisung*: In dieser Phase vereisen Strukturen und Instrumente wie Eisdetektoren oder Anemometer.
- *Rotorblatt Vereisung*: In dieser Phase liegt tatsächlich Eis am Rotorblatt vor.

Zwischen Beginn der meteorologischen Vereisung und der instrumentellen Vereisung liegt eine *Inkubationszeit*, deren Länge im Wesentlichen von den beteiligten Oberflächen und damit der Haftung des Eises an denselben abhängt. Die Rotorblattvereisung muss wiederum nicht mit der instrumentellen Vereisung zusammenfallen, da sich die Rotorblattoberfläche und -geschwindigkeit sowie -höhe wesentlich von der des Sensors unterscheiden kann.

Wesentliche Fragen bei der Untersuchung von Vereisung bei WEA sind einerseits die gesammelte Eismasse, üblicherweise in kg/m auf die Blattlänge bezogen, sowie die Position des Eises auf dem Rotorblatt. Seifert beschreibt anhand von im Tauernwindpark (Oberzeiring, Österreich) durchgeführten Beobachtungen, dass während des Betriebs die Eismenge nach außen linear zunimmt und begründet dies mit der höheren relativen Windgeschwindigkeit an der Blattspitze. Nach der Abschaltung wird der Eisaufbau unregelmäßiger und bildet sägezahnartige Strukturen aus. (Seifert, 2003, S7)

Von Seifert (2007a) wird eine Abschätzung der relativen Eistiefe - der aufgebauten Eismenge, die über die Rotorblattvorderkante hinaus steht, vorgestellt, die von einem Eiswachstum ausgeht, das im Wesentlichen der relativen Windrichtung (Angriffswinkel 0°) entgegengesetzt verläuft:

$$\frac{t_{Ea}}{t_a} = 0.45 \cdot e^{-0.05 \cdot R} + 0.14 \quad (2.4)$$

mit t_{Ea} der Eistiefe und t_a der Rotorblattprofillänge, sowie R der Position am Rotorradius.

Demgegenüber zeigen Vereisungssimulationen von Virk u. a. (2012), dass für eine kontinuierlich weiter arbeitende WEA die Eisdicke von der Gondel nach außen zwar zunimmt, im Detail signifikante Eisbildung aber erst ab der Mitte des Rotorblattes einsetzt und nach außen linear zunimmt. Aufgrund der veränderlichen Profilfläche erfolgt die Zunahme der Eismasse allerdings nichtlinear.

Hudecz u. a. (2014) führten Messungen an Anlagen und Experimente im Windtunnel durch, woraus sich einige grundlegende Aussagen über das Verhalten von Eisansatz ableiten ließen. Die angesammelte Eismasse ist linear von der Zeit, unter der Vereisungsbedingungen herrschen, abhängig, d.h. vorhandenes Eis wirkt sich nicht auf die weitere Vereisung aus. Weiters ist das Profil des angesammelten Eises im Wesentlichen vom Angriffswinkel abhängig, da sich die größte Eisdicke entgegen dem angreifenden Wind, also an der Druckseite des Blattes, ausbildet. Hierbei lässt sich feststellen, dass Klareisbildung zu länger gezogenen Profilen in Richtung windabgewandter Seite führt, da das flüssige Wasser am Blatt entlang fließt. Da die Wassertropfen bei Raueis direkt anfrieren und nicht verlaufen, ist das Eisprofil hier auch kürzer.

Li u. a. (2014) führten ebenfalls experimentelle Untersuchungen zur Vereisung im Windkanal durch. Dabei wurde ein NACA7715 Profil mit 22 cm Länge und 20 cm Breite eingesetzt, bei

Angriffswinkeln von bis zu $\pm 90^\circ$. Zwar ergeben sich hier maximale Vereisungsraten von 22% der Profilfläche, jedoch bei sehr hohen Angriffswinkeln, die in der Praxis des WEA-Betriebes kaum vorkommen dürften. Im üblichen Bereich von bis zu 11° finden sich wesentlich niedrigere Werte, allerdings mit einer starken Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Insbesondere bei 0° ergibt sich eine Vereisung von 16% der Profilfläche für 12 m s^{-1} Windgeschwindigkeit, bei 6 m s^{-1} jedoch nur 6%.

Die empirische Modellierung von Vereisung erfolgt meist nach dem erwähnten Modell des frei rotierenden Zylinders, auch bekannt als Makkonen-Modell (Makkonen, 2000). Dieses hat neben Temperatur und Windgeschwindigkeit die wesentlichen Eingabeparameter der Tropfengröße, gegeben durch den mittleren Volumen-Durchmesser (MVD), und des Flüssigwassergehalts (Liquid Water Content - LWC). Dieses Modell wird vielfach eingesetzt und weiterentwickelt und gilt daher als zuverlässig. Problematisch ist dabei vor allem, dass die direkte Messung von MVD und LWC schwer möglich ist, obwohl sich neue Verfahren dazu in Entwicklung befinden (Arstila, 2017).

Parallel zu diesen Modellen, die empirische Formeln für die Abschätzung der Interaktion zwischen Rotorblatt und umgebender Luft einsetzen, existieren auch Modelle die (meist mittels numerischer Strömungsmechanik) das Strömungsfeld um das Rotorblatt berechnen, mithilfe dieser Lösung die Trajektorien der Wassertropen in der Luft bestimmen und mittels Analyse der Grenzschicht und Oberflächenrauigkeit den Auftreffpunkt der Tropfen errechnen. Ein nachgeschaltetes thermodynamisches Modell bestimmt dann den Aufbau des Eises. Diese fortgeschrittenen Eissimulationsmodelle bieten eine hohe Genauigkeit, benötigen aber auch lange Rechenzeiten und sind daher für die Vorhersage von Vereisung ungeeignet. (Lehtomäki u. a., 2016)

2.3 Eisdetektion

Ein Vergleich bestehender Technologien zur Vereisungsdetektion findet sich in einem von meteo-test veröffentlichten Report (Cattin und Heikkilä, 2016). Generell lässt sich unterscheiden in an der Gondel montierte Systeme und am Rotorblatt montierte Systeme. Erstere sind verbreiteter und stehen schon länger zur Verfügung, sind daher auch technisch ausgereifter. Neben der zum Teil jedoch schlechten Genauigkeit (falsch positive Messungen) ist insbesondere die fehlende Fähigkeit festzustellen, ob ein Rotorblatt nach dem Abtauen eisfrei ist, als größter Nachteil dieser Systeme festzuhalten.

Zu Beginn der meteorologischen Vereisung, also der tatsächlichen Eisbildung an einer Struktur, sprechen die Eisdetektionssysteme meist noch nicht an; erst nach einer bestimmten Inkubationszeit wird die Ansprechschwelle der Eisdetektoren erreicht und die instrumentelle Vereisung beginnt. Je nach Detektor ist das Ende der instrumentellen Vereisung gleichzusetzen mit dem Ende der meteorologischen Vereisung plus einer gewissen Erholungszeit der Detektoren. D.h. hier beschreibt die instrumentelle Vereisung den Zeitraum, in dem weitere Vereisung der Anlage stattfindet. Andere Systeme wiederum messen, inwiefern sich Eis auf dem Blatt bzw. dem Detektor befindet. Diese liefern auch nach der meteorologischen Vereisung ein positives Signal, bis die Anlage entweder durch natürliches Abtauen oder Enteisung wieder eisfrei ist.

Diese Faktoren haben einerseits besondere Bedeutung für Überlegungen zur Sicherheit und zum Umfang der Eisbildung, da die Abschaltung der WEA erst bei Erkennung des Eises erfolgen kann und das Wiedereinschalten erst bei zuverlässigem Feststellen eisfreier Rotorblätter. Andererseits

ist dies auch für die Wirtschaftlichkeit des Systems wesentlich, da unter Umständen später als notwendig abgetaut und die Anlage wieder in Betrieb genommen wird.

Die physikalischen Prinzipien, die der Eisdetektion zugrunde liegen, sind sehr verschieden. Das Spektrum reicht hier von der Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit über Ultraschallvibrationen, Infrarotabsorption, zur Änderung der Vibrationsfrequenz des Rotorblattes und kapazitiven und induktiven Verfahren. Im Folgenden sollen einige Systeme von besonderer Relevanz detaillierter beschrieben werden.

2.3.1 Temperatur und relative Luftfeuchte (synoptisch)

Beim sogenannten synoptischen Messverfahren wird Vereisung indirekt über Temperatur und Luftfeuchte detektiert und bei Über- bzw. Unterschreiten eines Grenzwertes durch beide Messgrößen Vereisung gemeldet. Laut Cattin und Heikkilä (2016) liegen übliche Schaltschwellen bei Unterschreiten von 2 °C bis 5 °C und Überschreiten von 90 bis 95% relativer Luftfeuchtigkeit. Dieser Bereich wird zwar bei Vereisung immer erreicht, jedoch tritt umgekehrt im relevanten Bereich oftmals keine Vereisung auf, wodurch es zu vielen falsch-positiven Meldungen kommt. Weiters messen die meisten Luftfeuchtesensoren nach den WMO/CIMO Standards (World Meteorological Organization, 2008, Annex 4A), bei denen bei Temperaturen unter 0 °C 90% Luftfeuchte teilweise nicht mehr erreicht werden kann, da der Dampfdruck relativ zu (flüssigem) Wasser gerechnet wird. Dies ist allerdings ein Fall falsch eingesetzter Messtechnik.

2.3.2 Differenz beheiztes/unbeheiztes Anemometer

Eine Möglichkeit Vereisung festzustellen, besteht im Vergleich der Messwerte zweier parallel installierter Anemometer, von denen eines beheizt wird. Bei Eisbildung nehmen die Messwerte des unbeheizten Anemometers ab, während die des beheizten unverändert bleiben. Dieses Verfahren wird von sehr vielen Herstellern zur Detektion angeboten und gilt als verhältnismäßig zuverlässig. Problematisch ist hier die Wahl der Schaltschwelle, da Differenzen zwischen den Messungen unabhängig von Vereisung durch Turbulenzen auftreten und somit zu falsch-positiven Messungen führen können. Erste Tests in einem für die Untersuchung von Vereisungsdetektoren gebauten Windtunnel zeigen, dass unter starken Vereisungsbedingungen eine Differenz von 20% in zwei Stunden Messzeit nicht erreicht werden konnte (Jokela u. a., 2017).

2.3.3 Ultraschall

Bei diesem System erfolgt die Eiserkennung durch die Messung der Amplitude eines mit Ultraschall angeregten Drahtes, der um eine beheizbare Aluminiumplatte gewickelt ist. Durch Eisansatz verringert sich die Amplitude und bei Erreichen eines einstellbaren Grenzwertes wird Eisansatz angenommen. Durch Aktivieren der Heizung wird der Draht abgetaut und ein neuer Messzyklus kann begonnen werden. Mit über 3000 installierten Sensoren zählt dieser Sensor zu den weitest verbreiteten (Cattin und Heikkilä, 2016, S42ff). Auch bei diesen Sensoren ist die Schaltschwelle frei wählbar, wodurch zwischen Sicherheit und Falsch-Positiv-Meldungen abgewogen werden kann.

2.3.4 Leistungskurve

Eis auf den Rotorblättern verschlechtert generell die Aerodynamik der Blätter, wodurch entweder die Leistung reduziert wird, oder der Pitch-Winkel zur Kompensation angepasst werden muss. Hierzu wird unter normalen Bedingungen (Temperaturen über 2°C) die Leistungskurve spezifisch für die betroffene Anlage durch Vergleich der Leistung mit den Messwerten des beheizten Anemometers auf Nabenhöhe bestimmt. Stimmen gemessene Windgeschwindigkeit und Leistung bzw. erwarteter Pitch-Winkel nicht überein, so wird von Vereisung ausgegangen. Da diese Methode ohne zusätzliche Ausstattung und mit sehr geringem Aufwand unter Nutzung vorhandener Daten einsetzbar ist, wird sie von vielen Betreibern von Windparks eingesetzt. Dennoch wurde sie bislang von keinem Hersteller zertifiziert, wodurch sie von Behörden oft nicht als alleiniges Verfahren akzeptiert wird. Sie ist oftmals als zweite Detektionsmethode, in Fällen in denen zwei unabhängige Detektionssysteme gefordert werden, im Einsatz. Dieses Verfahren ist nur einsetzbar, solange sich die WEA nicht im Stillstand befindet. (Cattin und Heikkilä, 2016, S66ff)

2.3.5 Kapazitive Messung

Bei diesem System werden mehrere autark arbeitende, flache kapazitive Sensoren entlang jedes Rotorblattes aufgeklebt. Die Veränderung der Impedanz des Sensors erlaubt die Feststellung von Vereisung, bzw. des Grades der Vereisung. Die Messwerte werden via Funk an die Anlage übertragen. Da dieses Messsystem blattmontiert und unabhängig vom Betriebszustand der Anlage ist, ist auch die Überprüfung auf Eisfreiheit nach dem Abtauen möglich. Dies ermöglicht prinzipiell ein automatisches Wiederauffahren von Anlagen. Da das System erst seit 2014 verfügbar ist, sind die Betriebserfahrungen beschränkt. Mögliche Probleme stellen die Lebensdauer der Sensoren, die mit 10 Jahren angegeben wird, und die Erosion derselben dar. (Moser, 2017)

2.3.6 Eigenfrequenzmessung

Vereisung der Rotorblätter führt auch zu einer Veränderung der Eigenfrequenzen der Blätter. Diese wiederum sind mithilfe faseroptischer oder piezoelektrischer Verfahren, bzw. durch Beschleunigungssensoren messbar. Die Messung ist sowohl bei drehendem Rotor als auch bei Stillstand möglich, jedoch ist eine minimale Anregung der Rotorblätter durch Wind erforderlich (meist zumindest 2 m s^{-1} bis 3 m s^{-1}). Der Installationsaufwand variiert je nach Verfahren, meist ist aber eine Anbringung von Sensoren innerhalb des Blattes notwendig. Während die Detektion mittels piezoelektrischen Verfahren seit über 10 Jahren verfügbar ist, ist die Betriebserfahrung mit den beiden anderen Verfahren noch vergleichsweise kurz. (Cattin und Heikkilä, 2016)

2.4 Enteisung und Vereisungsprävention

Der „Available Technologies report“ des IEA Task 19 (Lehtomäki u. a., 2016) unterscheidet zwischen Technologien zur Vereisungsprävention („Anti-Icing“) und Enteisung („De-Icing“). Als Vorteile der der Prävention werden die Maximierung der Einsatzzeit der Turbine und der Umstand, dass sich meist gar kein Eis ansetzt, genannt. Nachteile stellen der zum Teil sehr hohe

Energieaufwand und die geringe Auswahl technologischer Optionen dar. Demgegenüber stehen für die Enteisung mehrere, deutlich verschiedene Optionen zur Verfügung und der Energieaufwand ist meist vergleichsweise gering. Durch den entstehenden Eisansatz kommt es jedoch zu größerer Vibrations- und Geräuschentwicklung, sowie der Notwendigkeit, Stillstandszeiten für die Enteisung in Kauf zu nehmen.

Im Folgenden findet sich eine Auswahl verfügbarer Technologien, wovon einige sowohl zum Enteisen als auch zur Prävention geeignet sind.

2.4.1 Heißluft

Im Fall der Heißluftenteisung bzw. -vereisungsprävention wird elektrothermisch Luft an der Blattwurzel auf bis zu 72 °C erhitzt und durch Kanäle entlang der Blattvorderkante zur Blattspitze geführt. An der Blattspitze wird die Luft umgelenkt und im Inneren des Rotorblattes zurückgeführt. Enteisung wird bei stillstehender Anlage durchgeführt, zur Vereisungsprävention ist ein Betrieb auch bei laufender Anlage möglich. Das Verfahren wird seit langem hauptsächlich durch die Firma Enercon eingesetzt und erweist sich in der Praxis als robust. Es ist jedoch nur in einem beschränkten Temperaturbereich einsetzbar. Insbesondere zeigt sich, dass bei anhaltend niedrigen Temperaturen oder starkem Wind die Enteisung nicht zwingend erfolgreich ist. Ist ein Weiterbetrieb bei Vereisung erlaubt, so führt das Stoppen zur Enteisung zu signifikanten Produktionsverlusten. Wesentliche Vorteile sind die Möglichkeit des Nachrüstens des Systems, zumindest bei einigen Rotorblatttypen, und das Fehlen zusätzlicher Kabel im Rotorblatt, die das Blitzschlagrisiko erhöhen würden. (Albers, 2011; Kolar, 2015)

2.4.2 Elektrothermisch

Bei elektrothermischen Heizsystemen werden elektrische Widerstandselemente in Form von Heizdrähten oder Matten nahe der Rotorblattoberfläche einlaminiert. Dieser Schritt ist nur während der Herstellung des Blattes durchführbar. Die Heizelemente können zumeist abschnittsweise mit Strom versorgt und somit die Rotorblatttemperatur gezielt erhöht werden. Durch die Nähe zur Oberfläche und die Möglichkeit des selektiven Heizens zeichnen sich diese Systeme durch eine hohe Effizienz aus und sind sowohl zur Enteisung als auch zur Vereisungsprävention geeignet. Durch die erhöhte Leitfähigkeit der Rotorblätter steigt das Risiko für Blitzschlag, der wiederum diese Systeme beschädigen kann. Reparaturen an elektrothermischen Heizsystemen sind nur eingeschränkt möglich und meist teuer. Eine weitere Schwierigkeit bei Schäden besteht darin, dass an den beschädigten Stellen Hotspots auftreten, an denen die geplante Blatttemperatur deutlich überschritten wird, wodurch das System weiteren Schaden nehmen kann. (Nilsson, 2017; Lehtomäki u. a., 2016)

2.4.3 Mechanisch

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur mechanischen Entfernung, die bei Bedarf als Dienstleistung zugekauft werden können. Bei diesen Verfahren wird mittels Abseilen oder Hubsteiger das Rotorblatt kontrolliert und vorhandenes Eis händisch oder mithilfe chemischer Mittel entfernt. Dies ist nur in Ausnahmefällen bei lang anhaltender schwerer Vereisung ökonomisch sinnvoll. Weiters besteht die Gefahr der Beschädigung der Blattoberfläche.

Ein anderes mechanisches Verfahren nutzt die Elastizität der Rotorblätter um Eis aufzubrechen und abzuschütteln. Hierbei werden die Rotorblätter von einer Ruheposition zur anderen um die eigene Achse gedreht, bis sie bei der Endstellung des Motors anschlagen und somit sehr schnell abgebremst werden. Dies führt zu einer Torsionsschwingung der Rotorblätter die zusätzlich mit dem Anlaufen und schnellen Abbremsen des gesamten Rotors kombiniert werden kann. Weiters ist der Einsatz von eisabweisenden Beschichtungen vorgesehen, der die Effizienz des Verfahrens steigern soll. Vorteil dieses Verfahrens ist die leichte Umsetzbarkeit, die keine zusätzliche Ausrüstung erfordert. Nachteilig ist, dass vollständiges Enteisen schwer erreicht werden kann und die Rotorblätter starker mechanischer Beanspruchung ausgesetzt werden. Diese Enteisungsmethode wird bislang nur bei wenigen Anlagen eingesetzt. (Haraguchi, 2009; Parent und Ilinca, 2011)

2.4.4 Beschichtungen

Beschichtungen von Rotorblättern sind entweder in Form spezieller Lackierungen möglich, dies meistens ab Werk, oder als aufzuklebende Folien. Ein offensichtlicher Vorteil von Beschichtungen ist, dass es sich um ein passives System handelt, das daher kein Eingreifen von außen und keinen Energieeinsatz erfordert. Weiters sind Beschichtungen vielfach auch nachträglich möglich. Allerdings werden Beschichtungen erst seit wenigen Jahren im Einsatz erprobt und bisher konnte für kein kommerziell erhältliches Produkt die Langzeitbeständigkeit gezeigt werden. Weiters variiert die Effizienz im Einsatz für Prävention und Enteisung stark, vermutlich auch abhängig von den lokalen meteorologischen Gegebenheiten. Bei Beschichtungen sind zwei grundlegende Funktionsprinzipien zu unterscheiden. Ein Ansatz ist die Reduktion der Adhäsionskraft von Eis auf der Rotorblatt-Oberfläche, wodurch dieses entweder noch im Vereisungsvorgang, bevor die WEA stoppt, sich in kleinen Mengen wieder löst, oder durch mechanische Verfahren leichter wieder abgelöst werden kann. Der andere verfolgte Zugang ist die Herabsetzung der Benetzbarkeit der Oberfläche, wodurch Wasser, bevor es zur Vereisung kommt, von der Oberfläche abperlen soll. Zusätzlich gibt es Versuche, durch Mikrostrukturierung den lokalen Luftstrom am Rotorblatt so zu verändern, dass Wassertröpfchen nicht in Kontakt mit dem Rotorblatt kommen.

2.5 Adhäsion von Eis

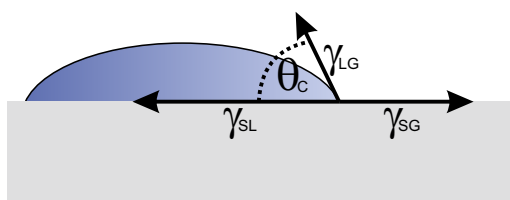


Abbildung 2.2: Kontaktwinkel und Oberflächenenergien

Zur Beschreibung der Eisbildung ist es sinnvoll die Oberflächenenergie der beteiligten Stoffe zu betrachten. Die Oberflächenenergie ist jene Energie, die zum Bilden einer Grenzfläche zwischen unterschiedlichen Stoffen/Phasen aufgebracht werden muss, daher eine Energie pro Flächeneinheit. Im Fall von Flüssigkeiten wird sie als Oberflächenspannung bezeichnet. Die Oberflächenenergie bestimmt wiederum den Kontaktwinkel eines

Flüssigkeitstropfens auf einer festen Oberfläche. In der einfachsten Beschreibung nach Young (1805) ergibt sich der Zusammenhang zwischen den Oberflächenenergien für einen flüssigen

Tropfen auf einer festen Oberfläche, umgeben von Gas und dem Kontaktwinkel θ zu Gleichung (2.5), illustriert in Abbildung 2.2.

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (2.5)$$

γ_{SG} ... Oberflächenenergie zwischen fester und gasförmiger Kontaktfläche

γ_{SL} ... Oberflächenenergie zwischen fester und flüssiger Kontaktfläche

γ_{LG} ... Oberflächenenergie zwischen flüssiger und gasförmiger Kontaktfläche

Unter der einfachen Annahme, dass die thermodynamische Arbeit zum Aufbrechen der Bindung zwischen Wasser und Eis W_A der Differenz zwischen der Energie der Bindung zwischen Oberfläche und Eis γ_{IS} und den Oberflächenenergien jeweils von Eis zu Luft γ_{IG} und fester Oberfläche zu Luft γ_{SG} entspricht, lässt sich schreiben

$$W_A = \gamma_{SG} + \gamma_{IG} - \gamma_{IS} \quad (2.6)$$

Wird weiter angenommen, dass sich die Oberflächenenergien von Wasser und Eis nicht wesentlich unterscheiden, also $\gamma_{LG} \approx \gamma_{IG}$, und weiter $\gamma_{SL} \approx \gamma_{IS}$, so ergibt sich

$$W_A \approx \gamma_{LG} (1 + \cos \theta) \quad (2.7)$$

Die Arbeit zum Überwinden der Adhäsionskraft sollte also grob proportional dem Kontaktwinkel des Wassers an einer Oberfläche sein. Praktisch zeigt sich, dass dies meist nicht zutrifft und das Problem wesentlich komplizierter ist.

So ist die tatsächlich zu verrichtende Arbeit trivialerweise gleich der Adhäsionskraft, integriert über die Länge, nach der die Oberflächen als getrennt angesehen werden können. Für ideale Oberflächen ist diese Länge sehr klein und nur die oben beschriebene thermodynamische Arbeit W_A muss berücksichtigt werden. Reale Oberflächen verhalten sich sowohl elastisch als auch duktil, d.h. Energie dissipiert durch Deformation des Eises und elastische Verformung des Untergrundes.

Eine wesentliche Einflussgröße auf die Adhäsionskraft von Eis auf einer Oberfläche ist die Grenzflächen-Morphologie. Naheliegenderweise nimmt die wirkende Adhäsionskraft pro Flächeneinheit mit der tatsächlichen Kontaktfläche ab. Daher führen Lufteinschlüsse an der Oberfläche sowie Mikrostrukturen, in denen Luftblasen erhalten bleiben, zu einer Reduktion der Kraft. Umgekehrt nimmt die Adhäsionskraft mit zunehmender Rauigkeit der Oberfläche zu, sofern die Oberfläche ohne Einschlüsse bedeckt wird. Dies spielt eine große Rolle für die Nutzung superhydrophober Strukturen, die durch Mikrostrukturierung eine Reduktion der Kontaktfläche erreichen sollen. Hier ist zu bedenken, dass durch die meist hohe Auftreffgeschwindigkeit von Wassertropfen bei WEA das Eindringen in diese Strukturen begünstigt wird, wodurch sogar noch stärkere Adhäsion als auf einer glatten Fläche entsteht. Aus Versuchen ist bekannt, dass die Adhäsionskraft auf Oberflächen generell von der Art der Eisbildung abhängig ist und Eis, das durch Anfrieren von Tröpfchen entsteht, unter Umständen stärker anhaften kann, als im Ganzen angefrorenes Wasser.

Auf festen (nicht-elastischen) Untergründen ist grundsätzlich mit abnehmender Temperatur eine Abnahme der Adhäsionskraft zu erwarten, da Eis mit abnehmender Temperatur spröder

wird und daher leichter abbrechen sollte. Tatsächlich findet sich dieses Verhalten erst bei sehr niedrigen Temperaturen, deutlich unter jenen, die bei Vereisung von WEA normalerweise auftreten. Ein wesentlicher Einflussfaktor dürfte hierbei die Bildung eines Wasserfilms auf der Eisoberfläche sein. Bei beginnender Separation der Oberflächen von Eis und Untergrund entsteht auf der Oberfläche eine in den Körper gerichtete Kraft aufgrund des Ungleichgewichts der intermolekularen Kräfte – diese Kraft kann als Druck auf die Oberfläche interpretiert werden. Wasser besitzt im Gegensatz zu den meisten anderen Stoffen die Eigenschaft, dass der Schmelzpunkt mit zunehmendem Druck zuerst abnimmt, wodurch sich bei Temperaturen knapp unter dem Nullpunkt (abhängig von der Oberfläche bis ca. -13°C) ein Wasserfilm ausbildet, der die Adhäsionskraft reduziert. Dieser Effekt nimmt mit abnehmender Temperatur ebenfalls ab, wodurch die Adhäsionskraft mit abnehmender Temperatur zunimmt. Diese Überlegung basiert auf der Annahme eines festen Untergrundes. Bei der Verwendung elastischer Untergründe ist das genaue Verhalten schwerer vorherzusagen, da einerseits die Oberflächenseparation durch die Kompressibilität des Untergrundes erleichtert werden sollte, andererseits sich schwerer ein Wasserfilm an der Grenzfläche ausbilden kann und daher ein sprödes Brechen unwahrscheinlicher wird.

Ein weiterer Effekt ist der Verlauf des Anfrierens. Zum Zeitpunkt des Frierens besteht in jedem Fall eine Wasser-Festkörper Kontaktfläche, deren Verhalten praktisch unabhängig von der Umgebungstemperatur ist. Die Ausbildung der festen Kontaktfläche erfolgt daher auch immer bei einer Wasser- und Oberflächentemperatur von ca. 0°C , erst dann erfolgt ein weiteres Abkühlen der Kontaktflächen. Da die meisten beteiligten Oberflächen einen wesentlich geringeren thermischen Expansionskoeffizienten als Eis ($50 \times 10^{-6}/\text{K}$) aufweisen, entstehen zunehmend Spannungen zwischen den Oberflächen während des Abkühlens. Hier sollte der vergleichsweise starken Expansion von Eis beim Abkühlen nahe dem Nullpunkt eine wesentliche Rolle zukommen. Weiters ist der Einfluss dieses Effekts stark abhängig von der Zeit, in der die Abkühlung stattfindet, da Eis kriechfähig ist. Das Ausmaß des Kriechens ist wiederum stark von der Kristallstruktur abhängig. Gleichzeitig kommt es durch die Ausbildung eines Wasserfilms unter Druck wieder zu leichterem Gleiten, wodurch der Einfluss der Expansion beim Frieren auf die Adhäsionskraft bei Temperaturen nahe dem Nullpunkt vermutlich gering ist. (Makkonen, 2012)

Schließlich spielen auch Verunreinigungen des anfrierenden Wassers eine Rolle. Abgesehen von der Abnahme des Schmelzpunktes durch viele Verbindungen, führen Inhomogenitäten generell zu einer Reduktion der Kontaktfläche und damit der Adhäsionskraft. Während der Einfluss des Salzgehaltes auf das Anfrieren von Wassertropfen gut untersucht ist, z.B. (Alansatan und Papadakis, 1999), existieren wenige Arbeiten über den Einfluss anderer Stoffe, da diese in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielen.

Von Kreder u. a. (2016) werden verschiedene Verfahren beschrieben, die Adhäsion von Eis auf Oberflächen zu reduzieren. Als einfache und umweltverträgliche, jedoch auch vergleichsweise wenig wirksame Methode werden hierbei selbstorganisierende Mono-Schichten aus hydrophilen und hydrophoben Molekülen beschrieben, durch deren Mischungsverhältnis sich der Kontaktwinkel kontrollieren lässt Petrenko und Peng (2003). Viele weitere Varianten von Beschichtungen werden von Meuler u. a. (2010) verglichen, wobei hier, wie schon von Makkonen (2012) kritisiert, langsames Anfrieren stehenden Wassers als Testmethode angewandt wird, was zu mäßig vergleichbaren Ergebnissen für die Anwendung in der Windenergie führt. Vorteilhaft bei diesen Arten von Beschichtungen ist, dass sie generell sehr glatt sind und das Eindringen von Wasser in Zwischenräume damit nicht möglich ist. Außerdem lässt sich eine hohe

Umweltbeständigkeit mit diesen Beschichtungen erreichen.

Anders verhält es sich mit eisabweisenden strukturierten Oberflächen. Mikrostrukturierte Oberflächen weisen hierbei Erhebungen in der Größenordnung von 10 bis 100 μm auf, welche die Kontaktfläche dramatisch reduzieren und den Kontaktwinkel vergrößern. Nanostrukturierte Oberflächen sind dementsprechend im Bereich von 20 bis 100 nm strukturiert und setzen die Adhäsion weiter herab. Unter Laborbedingungen sind hier exzellente wasser- und eisabweisende Eigenschaften realisierbar. In der praktischen Anwendung ergeben sich allerdings mehrere Schwierigkeiten. Die Oberflächen sind für aufprallende Tröpfchen insofern optimierbar, dass das Frieren verzögert werden kann und sich der Wassertropfen wieder ablöst, bevor er anfriert. Dies ist aber stark von den genauen Bedingungen wie Tropfengröße, Geschwindigkeit, Temperatur und Druck abhängig, sodass eine universell einsetzbare Beschichtung schwer zu erreichen ist. Weiters verbindet sich im Fall strukturierter Oberflächen einmal eingedrungenes und gefrorenes Wasser sehr stark mit der Oberfläche, was nachteiliger sein kann, als der Verzicht auf eine Beschichtung. Weiters ist die Beständigkeit dieser Oberflächen gering und ihre superhydrophoben Eigenschaften nehmen durch Abrasion schnell ab.

Neben diesen sogenannten trockenen Beschichtungen existieren auch nasse, bei denen Mikro- oder Nanostrukturen ein Schmiermittel auf der Oberfläche zurückhalten. Diese weisen exzellente Eigenschaften auf, jedoch verbraucht sich das Schmiermittel im Einsatz und muss verhältnismäßig oft erneuert werden. Bei Beschädigung der Mikro- oder Nanostrukturen gehen die superhydrophoben Eigenschaften lokal verloren. (Kreder u. a., 2016)

3 Eisfall und Eiswurf

Die Untersuchungen des Instituts für Sicherheits- und Risikowissenschaften (ISR) zur Gefährdung durch Eisfall waren anfänglich getrieben durch den vergleichsweise kurzfristigen Bedarf der österreichischen Betreiber nach Gutachten zu dieser Thematik. Unter dem damaligen Leiter des Instituts Wolfgang Kromp wurde dieser Fragestellung erstmalig mit Abwurfversuchen begegnet, deren Ergebnisse im Abschnitt Erste Experimente zu finden sind (Drapalik u. a., 2011). Aufgrund des mangelhaften Wissens um reale Eisformen und zum Vergleich mit experimentellen Werten, wurden Beobachtungen real stattfindenden Eisfalls durchgeführt, wobei Form und Größe fallender Eisstücke, Eismengen auf Rotorblättern, sowie die Flugbahnen und Verteilungen der Fragmente am Boden erhoben wurden. Ausgehend von diesen Daten wurden weitere, fortgeschrittene Experimente mit künstlichen Probekörpern durchgeführt, da mithilfe natürlicher Ereignisse keine statistisch robuste Datenbasis generiert werden kann. Durch den Vergleich mit Modellen wurden diese auf ihre Eignung, Eisfall-Ereignisse zu beschreiben, geprüft. Schließlich wird aufgezeigt, wie diese Daten in Simulationen eingesetzt werden können. Die Beobachtung von Eiswurf wurde bei Kleinwindenergieanlagen durchgeführt, und ebenfalls mit Experimenten ergänzt.

3.1 Erste Experimente

Davon ausgehend, dass, aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Vereisungsereignissen sowie der technischen Schwierigkeiten der Beobachtung derselben in der Natur, keine ausreichende Stichprobenzahl in erwartbarer Zeit zu erhalten wäre, ließ der Experimentalphysiker Wolfgang Kromp erstmalig Probekörper aus Holz in verschiedenen Größen und Formaten für Abwurfversuche anfertigen und unter Mitwirkung des Autors aus verschiedenen Höhen abwerfen, beobachten und auswerten. Der Vereinfachung, die in den meisten ballistischen Modellen angenommen wird, folgend, wurden quaderförmige Probekörper in verschiedenen Dimensionen hergestellt. Die Probekörper wurden in drei verschiedenen Dicken und drei verschiedenen Dichten angefertigt, wozu Fichtenleimholz, MDF-Platten und gedämpftes Akazienholz eingesetzt wurden. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die hergestellten Probekörper.

Bei zwei der Versuchsserien kamen Hubschrauber für Transport und Abwurf aus 200 m Höhe zum Einsatz. Bei den Hubschrauber-Versuchen wurden die Probekörper in Transportnetze verpackt, bei denen zum Abwurf zwei der vier Halteschlaufen mittels Fernbedienung ausgeklinkt wurden. Um Verfälschungen durch den Abwind des Hubschraubers zu vermeiden, wurden die Netze mit 50 m bis 60 m langen Leinen abgehängt. Zwei der Versuchsserien wurden aus geringerer Höhe durch Abwurf von WEA-Naben durchgeführt, wobei die Probekörper einzeln abgeworfen wurden.

Diese Versuche bildeten die Grundlage für langjährige und erfolgreiche gemeinsame Gutachtertätigkeit mit Wolfgang Kromp und dienten auch als Vorlage für dahingehende Arbeiten des TÜV Austria in Kooperation mit Thomas Klopff.

Code			Länge [cm]	Breite [cm]	Dicke [cm]	Dichte [g/cm ³]	Gewicht [kg]	Fläche [m ²]
A	k	x	20	15	4.0	0.83	1.00	0.03
A	m	x	30	20	4.0	0.83	1.99	0.06
A	g	x	50	30	4.0	0.83	4.98	0.15
A	k	y	20	15	2.0	0.83	0.50	0.03
A	m	y	30	20	2.0	0.83	1.00	0.06
A	g	y	50	30	2.0	0.83	2.49	0.15
A	k	z	20	15	1.0	0.83	0.25	0.03
A	m	z	30	20	1.0	0.83	0.50	0.06
A	g	z	50	30	1.0	0.83	1.25	0.15
M	k	x	20	15	4.0	0.75	0.90	0.03
M	m	x	30	20	4.0	0.75	1.80	0.06
M	k	y	20	15	2.0	0.75	0.45	0.03
M	m	y	30	20	2.0	0.75	0.90	0.06
M	g	y	50	30	1.92	0.75	2.16	0.15
M	m	z	30	20	1.02	0.74	0.45	0.06
M	L		200	15	3.82	0.73	8.37	0.30
F	k	x	20	15	4.0	0.50	0.60	0.03
F	g	y	50	30	1.92	0.47	1.35	0.15
F	m	z	30	20	1.02	0.48	0.29	0.06
F	L		200	15	3.82	0.47	5.39	0.30
F	W		20	20	20.0	0.42	3.32	0.04

Tabelle 3.1: Übersicht über die für Abwurf-Experimente eingesetzten Holz-Probekörper

Ort	Datum	Windgeschwindigkeit (m/s)	Abwurfhöhen (m)
Flugfeld Langenlebarn	17.04.2010	12	60/140/200
WEA Scharndorf-Rohrau	26.04.2010	4.5	100
WEA Prinzendorf II	17.05.2010	6.5	100
Flugfeld Spitzerberg	23.06.2010	12	200

Tabelle 3.2: Übersicht über die durchgeführten Abwurfversuche mit Holzprobekörpern

Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht über die vier Abwurfversuchsserien und die damit verbundenen Abwurfbedingungen.

Die Messwerte für die Windgeschwindigkeit stammen von der jeweils nächstgelegenen geeigneten Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), die Höhen ergeben sich entweder aus der Nabenhöhe der WEA oder durch Höhenmessung des eingesetzten Hubschraubers. Die Abwurfposition im Falle der Hubschrauberabwürfe wurde entweder durch Positionsbestimmung des Hubschraubers oder durch Abwurf eines kugelförmigen dichten Referenzkörpers bestimmt. Nach Durchführung der Abwürfe wurden die Positionen der Probekörper am Boden mittels GPS-Empfängern bestimmt. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die Anzahl der abgeworfenen Probekörper nach Typ bei allen Abwürfen.

Im Folgenden werden von ausgewählten Probekörpern die Fallweiten und Richtungen dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl Richtung als auch Fallweite akzeptabel als normalverteilt angenommen werden können (siehe Abbildung 3.1). Daher ist auch eine Darstellung als zweidimensionale Normalverteilung, allerdings bezogen auf die Variablen Fallweite und -richtung, sinnvoll, wie in Abbildung 3.4 dargestellt.

Typ	Langenlebarn 200/140/60 m 12.0 m/s	Scharndorf 100 m 4.5 m/s	Prinzendorf 100 m 6.5 m/s	Spitzerberg 200 m 12 m/s
Agx				30
Agy				39
Agz			10	49
Akx				50
Aky			10	48
Akz			9	50
Amx				50
Amy			10	49
Amz			20	50
FLL	23 (200 m)	11	5	23
Fgy	18 (200 m)	9		25
Fkx				50
Fmz	47 (60 m)	18		49
MLL		6	5	22
Mgy	25 (200 m)	25		25
Mkx				10
Mky			10	9
Mkz			9	
Mmx				10
Mmy			10	10
Mmz	13 (140 m)	37	10	46
WWW		1	5	12

Tabelle 3.3: Übersicht über die eingesetzten Probekörper nach durchgeführten Abwürfen

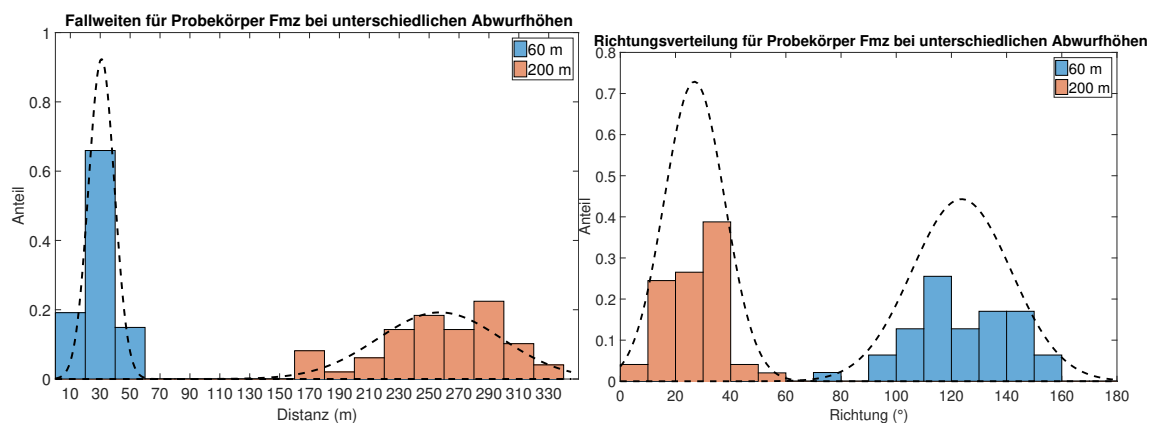


Abbildung 3.1: Fallweiten (links) und Richtungsverteilung (rechts) der Probekörper Fmz im Vergleich bei Abwurfhöhe 60 m und 200 m mit überlagelter angepasster Normalverteilung. Wie zu erwarten ist, nimmt die Breite der Fallweitenverteilung mit der Fallweite zu.

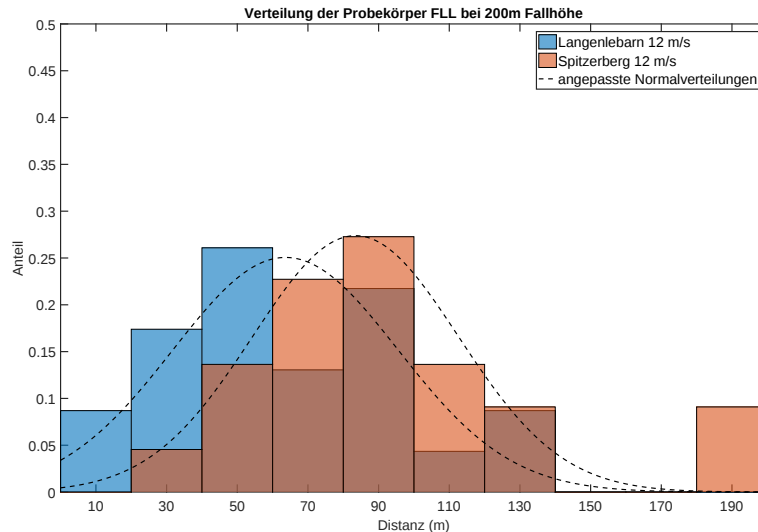


Abbildung 3.2: Erreichte Falldistanzen lattenförmiger Probekörper (200x15x4 cm) mit einer Dichte von 0.47 g cm^{-3} von einer Höhe von 200 m abgeworfen mit angepassten Normaverteilungen (unter Ausschluss von Ausreißern). Die Streuung ist sehr breit, die Ergebnisse bei gleicher Abwurfhöhe zwar ähnlich aber deutlich verschoben.

Die hier dargestellten Probekörper des Typs Fmz, also dünne, mittelgroße Platten geringer Dichte, wurden bei gleicher Windgeschwindigkeit von 12 m s^{-1} von den unterschiedlichen Höhen 60 m und 200 m abgeworfen. Es zeigt sich, dass bei größerer Abwurfhöhe erwartungsgemäß höhere Fallweiten erreicht werden. Der Vergleich der Verteilungsbreite zeigt, dass die Richtungsverteilung mit zunehmender Fallweite kleiner wird. Dies ist eine Konsequenz der Darstellung in Polarkoordinaten; Die Breite der Verteilung gemessen als Abstand der äußersten Probekörper in Metern nimmt mit der Fallweiten ebenfalls zu.

Besonders relevant sind auch die in Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 dargestellten Fallweiten lattenförmiger Probekörper mit den Maßen $200 \times 15 \times 5 \text{ cm}$ und einer geringen Dichte von 0.47 g cm^{-3} (FL). Sowohl bei geringer (100 m) als auch großer Abwurfhöhe (200 m) zeigen die Verteilungen gute Übereinstimmung. Die etwas schlechtere Übereinstimmung bei der geringeren Abwurfhöhe steht in Einklang mit der höheren Windgeschwindigkeit. In allen Fällen sind die Distanzen annähernd normalverteilt. Auffallend ist bei der größeren Abwurfhöhe, dass einige Probekörper Fallweiten von 190 m erreichten und damit deutlich weiter fielen als die anderen untersuchten Körper. Ähnliches zeigt sich bei deutlich dichteren Probekörpern mit gleicher Geometrie, deren Verteilung um ca. 20 m näher der Abwurfstelle liegt, ansonsten aber große Ähnlichkeit mit jener der leichteren aufweist. Diese auftretenden „Ausreißer“ - wenige Probekörper die ungewöhnlich hohe Fallweiten erreichen - sind von besonderer Bedeutung bei der Risikokommunikation.

Tabelle 3.2 zeigt, dass Daten gleicher Probekörper bei unterschiedlichen Abwurfhöhen bzw. Windgeschwindigkeiten vorliegen. Anhand dieser Daten lässt sich die aus manchen Modellen ableitbare Annahme eines grob linearen Zusammenhanges zwischen Fallhöhe und Fallweite für fallende (nicht geworfene) Probekörper überprüfen. Da jedoch für keinen Fall drei Messpunkte mit Variation nur einer Variablen vorliegen, ist eine lineare Anpassung der Fallweiten mit der

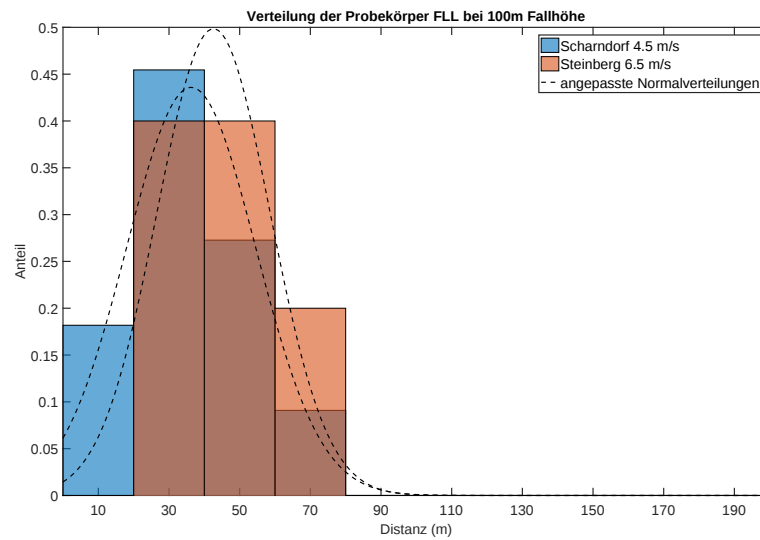


Abbildung 3.3: Erreichte Falldistanzen lattenförmiger Probekörper (200x15x4 cm) mit einer Dichte von 0.47 g cm^{-3} von einer Höhe von 100 m abgeworfen. Wie zu erwarten erreichen die Probekörper bei geringfügig höherer Windgeschwindigkeit auch geringfügig höhere Fallweiten.

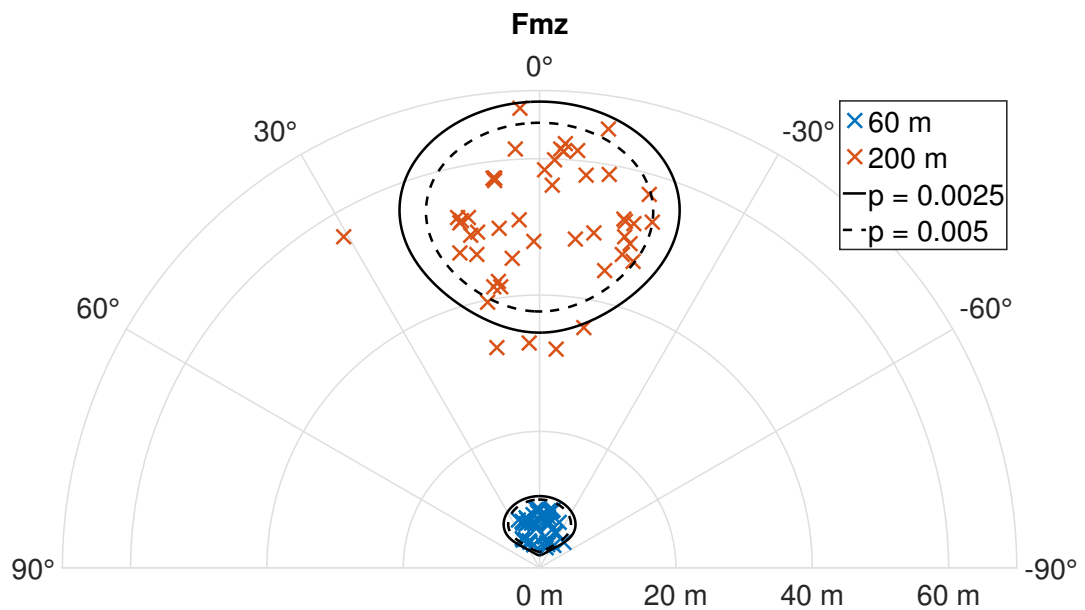


Abbildung 3.4: Zweidimensionale Verteilung der Probekörper Fmz im Vergleich bei Abwurfhöhe 60 m und 200 m mit überlagerten Isolinien der angepassten zweidimensionalen Normalverteilung.

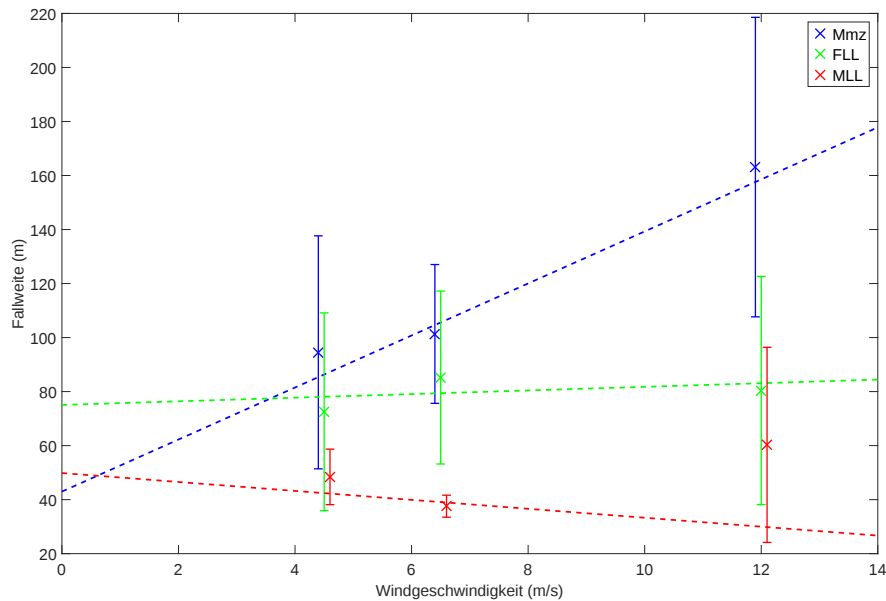


Abbildung 3.5: Vergleich der Abhängigkeit der Fallweite verschiedener Probekörper von der Windgeschwindigkeit. Die Fallweiten wurden auf eine angenommene Abwurfhöhe von 200 m umgerechnet. Eine Zunahme der Fallweite mit der Windgeschwindigkeit ist nur für den Probekörpertyp Mmz klar zu erkennen.

Fallhöhe zur Überprüfung eines linearen Zusammenhangs mit der Windgeschwindigkeit sinnvoll, da für die Fallweiten die triviale Zusatzannahme einer Fallweite von 0 m bei 0 m Fallhöhe gemacht werden kann. Abbildung 3.5 zeigt den Vergleich zwischen der linearen Anpassung für drei verschiedene Probentypen. Zwar ist für jeden der drei Typen ein linearer Zusammenhang innerhalb der Fehlertoleranzen ableitbar, jedoch ist er nur im Fall der MMz Probekörper sinnvoll, da sich in den anderen Fällen keine Zunahme bzw. eine Abnahme der Fallweite mit der Windgeschwindigkeit ergibt. Dies ist vermutlich auf die stark eingeschränkte Messgenauigkeit einiger Parameter bei diesen Experimenten zurückzuführen.

Die benutzten Windgeschwindigkeitswerte wurden, wie beschrieben, nicht am Ort der Experimente bestimmt und sind nur einstündige Mittelwerte. Kurzfristige Variationen, die enormen Einfluss auf die Messergebnisse haben können, konnten nicht erfasst werden. Weiters ist eine Beeinflussung der Probekörper untereinander während des Fallens nicht auszuschließen. Aus diesen Ergebnissen ist daher keine Modellierung der Fallweiten ableitbar. Jedoch geben sie eine gute Orientierung für das prinzipielle Verhalten verschiedener Probekörperformen und über die grundsätzlich erreichbaren Fallweiten.

Neben den Messungen wurden auch Videoaufnahmen der fallenden Probekörper angefertigt. Diese zeigen eine ausgeprägte Eigenrotation einiger Probekörper, die dabei auch sehr hohe Fallweiten erreichen. Aus diesen qualitativen Daten kann abgeleitet werden, dass Eigenrotation eine relevante Größe für die Fallweite und damit auch für die Modellierung derselben darstellt. Insbesondere die zwei in Abbildung 3.2 erkennbaren Ausreißer, die eine Fallweite von 190 m erreichen, sind auf dieses Verhalten zurückzuführen.

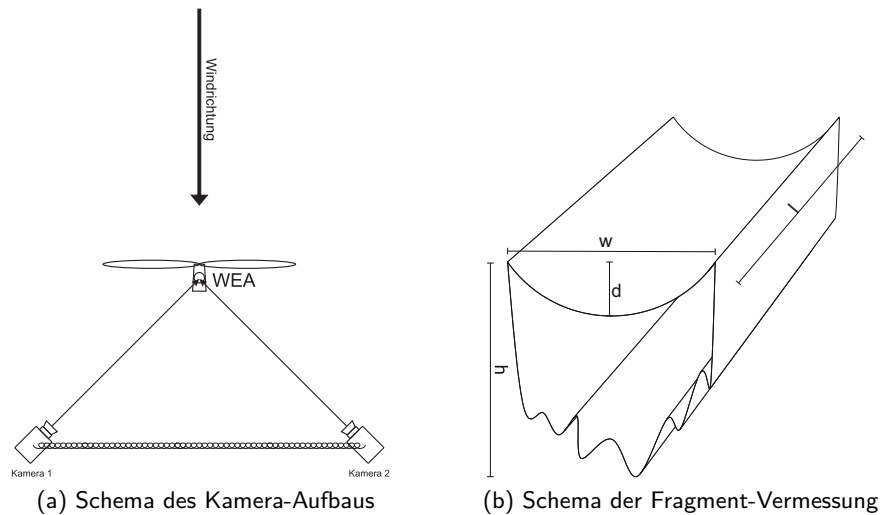


Abbildung 3.6: Schemata für Kamera-Aufbau und Fragmentvermessung bei Eisfall-Beobachtungen

3.2 Monitoring

Basis der Betrachtungen zu Eisfall und Eiswurf ist die Erhebung von Fallweiten und Trajektorien von Eisfragmenten. Dies wurde sowohl für natürlichen Eisfall und Eiswurf als auch in Experimenten durchgeführt. Erst mithilfe der damit generierten umfassenden Datenbasis ist die Modellierung und Simulation sinnvoll durchführbar. Zur Eingrenzung der experimentellen Parameter wurden die relevanten Daten durch ein Monitoring-Verfahren eingegrenzt.

3.2.1 Methode

Ziel des Monitorings war die Erhebung folgender Daten:

- Eismenge bei natürlicher Vereisung
- Form und Dichte natürlicher Eisfragmente
- Fallweiten bei Vereisung
- Trajektorien der Fragmente

Zu diesem Zweck wurden Eisfall-Ereignisse beobachtet. Hierzu wurden drei Windparks ausgewählt, deren Betreuer (sogenannte Mühlenwarte) beim Auftreten von Eisansatz ein Beobachterteam informierten, das sich daraufhin zum Windpark begab und die notwendige Instrumentierung vornahm. Hierbei wurden nur Windparks ausgewählt, deren Anlagen über Abtauvorrichtungen verfügen und der Zeitpunkt des Eisfalls somit kontrolliert werden kann. Die genaue Vorgangsweise bei den Beobachtungen wurde stetig weiterentwickelt und soll im Folgenden beschrieben werden.

Nach der Information durch Mühlenwarte begibt sich ein Team von mindestens vier bis fünf Beobachterinnen und Beobachtern an den jeweiligen Standort. Dort werden die technischen Daten der Anlage und die vorherrschende Windgeschwindigkeit aufgenommen, sowie mittels Teleobjektiv Aufnahmen der Rotorblätter gemacht. Hierbei ist zu beachten, dass das Rotorblatt in voller Länge und möglichst verzerrungsarm abgebildet sein muss, um die spätere Vermessung zu ermöglichen. Im Anschluss daran erfolgt der Aufbau zweier Kameras im 90° Winkel in

ausreichender Entfernung (ca. 250 m), deren Auslöser kabelgebunden verbunden werden (siehe Abbildung 3.6a). Die Auslösung erfolgt elektronisch alle 500 ms.

Nach dem Abfallen des auf den Rotorblättern vorhandenen Eises erfolgt die Fotodokumentation der Eisstücke. Hierzu werden von einem Team abgefallene Eisstücke gesucht und mit Markierungen versehen. Ein zweites Dokumentationsteam geht die Markierungen ab und macht Aufnahmen der Eisfragmente mit Maßstab, sodass nachträglich die Form und Größe ausgemessen werden können. Hierzu werden einerseits Überblicksbilder, die eine Rekonstruktion der ursprünglichen Größe der meist durch den Aufprall fragmentierten Stücke erlauben, und andererseits Detailbilder des Profils angefertigt. Weiters werden von diesen Fragmenten repräsentative Proben genommen, die zur Aufbewahrung und späteren Dichtebestimmung ins Labor transportiert werden.

Die Vermessung der Fotografien der Eisfragmente erfolgt nachträglich, wobei die anzunehmende Länge des Fragments vor der Fragmentierung durch den Aufprall, die Breite und die Bogenform festgehalten werden (siehe Abbildung 3.6b), weiters erfolgt eine Einschätzung der Eisdichte nach Rau- oder Klareis.

Zur Bestimmung der Dichte der abtransportierten Proben wurden verschiedene Verfahren angedacht und getestet. Ausbohren eines definierten Kerns ist aufgrund des schnellen Brechens vor allem von Raueis kaum umsetzbar und die Messung der Verdrängung in Öl führt aufgrund des ungleichmäßigen Eindringens von Öl in die Raueisstrukturen zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Die Methode des Abformens mithilfe von Zement und der nachfolgenden Bestimmung des Volumens funktioniert zwar, zerstört jedoch die Probe und ist mit sehr hohem Aufwand verbunden. Daher kam die Methode des 3D-Scannens zum Einsatz, die zusätzlich den Vorteil einer einfachen Archivierung der Daten bietet.

3.2.1.1 stereofotogrammetrische Auswertung

Zur Auswertung der stereofotogrammetrischen Daten war es notwendig, ein Verfahren zur möglichst präzisen Bestimmung der Blickrichtung der Kameras zu entwickeln, da die mittels GPS, Kompass und Neigungssensor aufgenommenen Daten keine ausreichende Genauigkeit lieferten. Daher wurde der Turmfuß als wohlbekannte Referenz genutzt und ausgehend davon die Drehung und Neigung der Kameras bestimmt. Bei Kenntnis der Pixeldichte des Kamerasensors (im konkreten Fall $\rho_P = 232\,000 \text{ px m}^{-1}$), der Brennweite b und der halben Pixelhöhe des Sensors ($\frac{h_P}{2} = 1728 \text{ px}$), sowie der Entfernung des Turms von der Kamera (k), der Bildposition des Turmfußes (y) und der Entfernung der Kamera von Boden (h), lässt sich unter Annahme ebenen Terrains die Neigung der Kamera (α) wie folgt bestimmen:

$$\alpha = \arctan \frac{y - \frac{h_P}{2}}{\rho_P \cdot b} + \arctan \frac{k}{h} - \frac{\pi}{2} \quad (3.1)$$

Ähnlich ergibt sich die relative Drehung der Kamera zum Turm (β):

$$\beta = \arctan \frac{x - \frac{w_P}{2}}{\rho_P \cdot b} \quad (3.2)$$

Mit diesen Werten können geeignete Rotationsmatrizen zur Beschreibung der Kameraorientie-

rung aufgestellt werden:

$$R^i = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \cos \alpha & \sin \beta \sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta \cos \alpha & -\cos \beta \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

In weiterer Folge kann durch Auflösung der Kollinearitätsgleichungen für beide Kameras nach den globalen Raumkoordinaten die Position eines Objektes im Raum bestimmt werden.

$$\begin{aligned} x^i - x_0^i &= -c^i \frac{R_{11}^i (X - X_0^i) + R_{21}^i (Y - Y_0^i) + R_{31}^i (Z - Z_0^i)}{R_{13}^i (X - X_0^i) + R_{23}^i (Y - Y_0^i) + R_{33}^i (Z - Z_0^i)} \\ y^i - y_0^i &= -c^i \frac{R_{12}^i (X - X_0^i) + R_{22}^i (Y - Y_0^i) + R_{32}^i (Z - Z_0^i)}{R_{13}^i (X - X_0^i) + R_{23}^i (Y - Y_0^i) + R_{33}^i (Z - Z_0^i)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Weiters werden Videoaufnahmen der fallenden Fragmente ausgewertet. Hierbei wird durch Untersuchung der Einzelbilder die Rotationsgeschwindigkeit erfasst.

Ein wesentlich schnelleres Verfahren, das aber z.B. die Bestimmung der Messungenauigkeiten erschwert, nutzt eine Projektionsmatrix $\mathbf{P}$ zur Abbildung eines dreidimensionalen Objektpunktes $\mathbf{X} = (X, Y, Z, W)$ in homogenen Koordinaten auf die Kameraebenen in einen zweidimensionalen Bildpunkt $\mathbf{x} = (x, y, w)$, ebenfalls in homogenen Koordinaten. Bei homogenen Koordinaten werden die zwei- bzw. dreidimensionalen Koordinaten um eine zusätzliche Dimension erweitert, die einen Skalierungsfaktor darstellt. Dadurch sind die Koordinaten auch nur noch bis auf diesen Skalierungsfaktor eindeutig. Dies ist notwendig, damit alle notwendigen Abbildungen als Matrizen formuliert werden können. Somit ist der vollständige Vorgang der Projektion mit der Matrixgleichung

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (3.5)$$

beschrieben, wobei $\mathbf{P}$ zwangsläufig eine 3x4 Matrix ist.

Die Berechnung von $\mathbf{P}$ kann entweder durch mehrere korrespondierende Punkte zweier oder mehr Kameras erfolgen, oder durch die Bestimmung einzelner Komponenten von $\mathbf{P}$. Hierbei wird zerlegt in

- eine Kalibrierungsmatrix $\mathbf{K}$, welche die innere Orientierung der Kamera, also Kammerkonstante c , Dichte der Bildpunkte k_x und k_y , Position des Hauptbildpunktes (x_0, y_0) und den Winkel zwischen den Bildachsen Θ beschreibt,
- eine Positionsmatrix $\mathbf{C}$, welche die Position der Kamera in Weltkoordinaten beschreibt
- und eine Rotationsmatrix $\mathbf{R}$, welche die Rotation der Kamera darstellt.

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}\mathbf{R}[\mathbf{I} | -\mathbf{C}] \quad (3.6)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} ck_x & -ck_x \cot \Theta & x_0 \\ 0 & -ck_x / \sin \Theta & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{R} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_1 \\ 0 & 1 & 0 & -C_2 \\ 0 & 0 & 1 & -C_3 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Damit ist für die Bildpunkte $\mathbf{x}_1$ und $\mathbf{x}_2$ der Kameras mit den zugehörigen Projektionsmatrizen $\mathbf{P}_1$ und $\mathbf{P}_2$ für den Weltpunkt $\mathbf{X}$ zu lösen:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{P}_1 \mathbf{X} \quad \mathbf{x}_2 = \mathbf{P}_2 \mathbf{X} \quad (3.8)$$

Mit dem Kreuzprodukt lässt sich die Skalierungsabhängigkeit eliminieren, wobei $\mathbf{p}^n$ die n-te Zeile der Projektionsmatrix ist.

$$\mathbf{x} \times (\mathbf{P}\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} x(\mathbf{p}^3\mathbf{X}) - (\mathbf{p}^1\mathbf{X}) \\ y(\mathbf{p}^3\mathbf{X}) - (\mathbf{p}^2\mathbf{X}) \\ x(\mathbf{p}^2\mathbf{X}) - y(\mathbf{p}^1\mathbf{X}) \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

Da das Gleichungssystem überdefiniert ist, reicht die Verwendung der jeweils ersten beiden Zeilen der Gleichung für jedes Bild, wodurch sich das gesamte Gleichungssystem für ein Bildpaar zu

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1\mathbf{p}_1^3 - \mathbf{p}_1^1 \\ y_1\mathbf{p}_1^3 - \mathbf{p}_1^2 \\ x_1\mathbf{p}_2^3 - \mathbf{p}_2^1 \\ y_1\mathbf{p}_2^3 - \mathbf{p}_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{pmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.10)$$

ergibt. Das setzt die Annahme fehlerfreier Bildpunkte voraus. Bei fehlerbehafteten Daten sind komplexere Algorithmen zur Lösung sinnvoll.

Die Rekonstruktion der Kameramatrizen ist auch bei unbekannten Koordinaten der korrespondierenden Weltpunkte nur auf Basis einer ausreichenden Anzahl (zumindest 7) von korrespondierenden Bildpunktpaaren möglich. Hierzu wird die Fundamentalmatrix aufgestellt, welche die Projektion eines Bildpunktes auf eine Linie im anderen Kamerasystem beschreibt: $\mathbf{x}_2'\mathbf{F}\mathbf{x}_1 = 0$. Durch Lösen dieser Gleichung für mehrere Bildpunkte kann $\mathbf{F}$ aufgestellt werden. Unter der Annahme fixer Koordinaten für eine der Kameras, üblicherweise wird das Weltsystem in eine der Kameras gelegt, existiert ein vorgegebener Punkt, durch dessen Projektion in das andere Kamerasystem in die Projektionsmatrizen aufgelöst werden kann.

Prinzipiell besteht die Möglichkeit der vollständigen Automatisierung der Stereo-Kamerakalibrierung, wozu ein vorgegebenes Kalibrieremuster, üblicherweise ein asymmetrisches Schachbrettmuster, durch einen möglichst großen Bereich der Bilder beider Kameras bewegt und aufgenommen wird. Dadurch ist auch die automatische Korrektur von Verzeichnungen möglich, was allerdings aufgrund der Qualität der eingesetzten Objektive keinen wesentlichen Unterschied schafft. Das vollautomatische Verfahren konnte nur bei den Wurfversuchen zur Kleinwindkraft benutzt werden, da das Kalibrieremuster scharf abgebildet werden und sich damit im Bereich ausreichender Tiefenschärfe befinden muss. Dies führt bei großen Bildausschnitten zu unpraktikabel großen Kalibrieremustern.

3.2.2 Ergebnisse des Monitorings

Im Folgenden werden die Ergebnisse der systematischen Beobachtungen von Eisfall an WEA beschrieben, wobei die einzelnen Aspekte der Beobachtungen aus Gründen der Übersichtlichkeit separat abgehandelt werden. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die vier durchgeführten Beobachtungen.

3.2.2.1 Vereisungsgrad

Grundsätzlich ist bei der Vereisung an den Rotorblättern zwischen der flächigen Vereisung auf großen Teilen des Flügelblattes und der stabförmigen an der führenden Kante zu unterscheiden. Beide Fälle können sowohl mit Klar- als auch mit Raueis auftreten; auch Mischformen

Windpark	Nabenhöhe [m]	Rotordurchmesser [m]	Windgeschwindigkeit [m/s]
WP1	138	82	12
WP2	135	101	6
WP3	113	71	6
WP4	65	70	4

Tabelle 3.4: Übersicht über die durchgeführten Eisfall-Beobachtungen

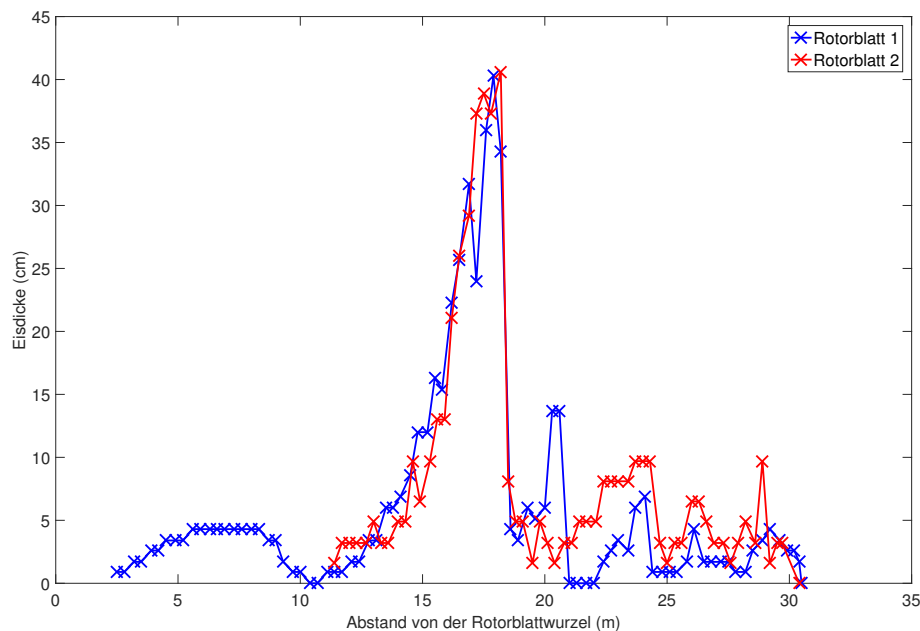


Abbildung 3.7: Dicke des Eisansatzes auf zwei Rotorblättern im Fall von Vereisung an der führenden Kante des Rotorblattes

sind möglich aber selten. Klareis zeichnet sich durch seine hohe Dichte (ca. 0.9 g/cm^3) und Stabilität aus, während Raueis über einen sehr großen Dichtebereich auftritt und wesentlich weniger stabile Formen bildet. Abbildung 3.7 zeigt den Vergleich zweier Rotorblätter einer Anlage (das dritte Blatt konnte aufgrund schlechter Sichtbarkeit nicht vermessen werden) an der Vereisung der Vorderkante auftrat. Auffallend ist der sehr starke Eisaufbau zwischen 15 m bis 20 m Blattlänge. Dieser darf allerdings nicht überbewertet werden, da die Beobachtung des Abfallvorganges zeigt, dass dieser zum Großteil aus Raueis sehr geringer Dichte bestand, das während des Abfallens bis zur Unverfolgbarkeit zerfiel. Diese Messung illustriert und bestätigt die Erfahrungsberichte der Mühlenwarte und Betreiber, dass Vereisung am inneren Drittel des Rotorblattes wenig auftritt, steht aber im Widerspruch zu der Annahme der generell nach außen hin zunehmenden Vereisung.

Im Gegensatz dazu konnte bei der Auswertung der Bilder einer auf einer WEA montierten Webcam festgestellt werden, dass die dort überwiegende flächige Vereisung über die gesamte Rotorblattlänge auftritt, jedoch oftmals verstärkt auf der windabgewandten Seite des Blattes (siehe Abbildung 3.8). Soweit dies nach den Aufnahmen beurteilbar ist, handelt es sich dabei aber oft um wenig dichtes Raueis, sodass nur ein Bruchteil der vereisten Fläche als relevante Fragmente fallen kann.

Bei einem weiteren Ereignis konnte der Eisbesatz am Rotorblatt nicht mehr rechtzeitig fo-



Abbildung 3.8: *Beispiel für flächige Vereisung, erkennbar an der windabgewandten Seite des Rotorblattes*



Abbildung 3.9: *Raueisbildung verstärkt an der Vorderkante, aber auch an der Leeseite des Rotorblattes*

tografisch dokumentiert werden, jedoch lässt sich anhand der gefundenen Fragmente eine großflächige Vereisung mit dünnem Klareis, annehmen.

In Verbindung mit den gefundenen Eisfragmenten lässt sich die aus der Literatur bekannte Annahme bestätigen, dass für die maximal fallenden Eismenge von einem Rotorblatt dessen Länge, weniger dessen Fläche, die maßgebliche Größe darstellt. Jedoch findet auch an der führenden Kante Eis aufbau bis einige 10 cm in das Blatt hinein statt und die Ausbildung entsprechend großflächiger Eisfragmente, insbesondere aus Klareis, ist möglich.

Weiters zeigt Abbildung 3.9, dass auch Raueisbildung sowohl an der führenden (Luv-Seite) als auch der windabgewandten Kante des Rotorblattes (Lee-Seite) auftreten kann. Die damit verbundenen Eismengen sind allerdings gering und die leeseitige Eisbildung vermutlich nicht sicherheitsrelevant.

3.2.2.2 Aufnahme von Positionen/Weiten

Die Verteilung der Fragmente nach dem Eisfall fiel, abhängig von den herrschenden Windverhältnissen, erwartungsgemäß sehr unterschiedlich aus. Abbildung 3.10 zeigt im Vergleich die sehr unterschiedlichen Fallweiten bei 12 m s^{-1} bzw. 4 m s^{-1} mittlerer Windgeschwindigkeit.

Bei der niedrigen Windgeschwindigkeit von 4 m s^{-1} finden sich 94% der Fragmente innerhalb des Rotorradius, während sich bei der höheren Geschwindigkeit keine Fragmente mehr in diesem Bereich finden. Dies ist besonders relevant in Hinsicht auf den Schutz von Bedienpersonal, das sich zum Start des Abtauvorgangs in das Turminnere der Anlage begeben muss. Weiters ist es interessant, mit der Abschätzung der maximalen Fallweiten von Seifert, beschrieben mit Gleichung (2.2) auf Seite 15, zu vergleichen. Für niedrige Windgeschwindigkeiten wird die

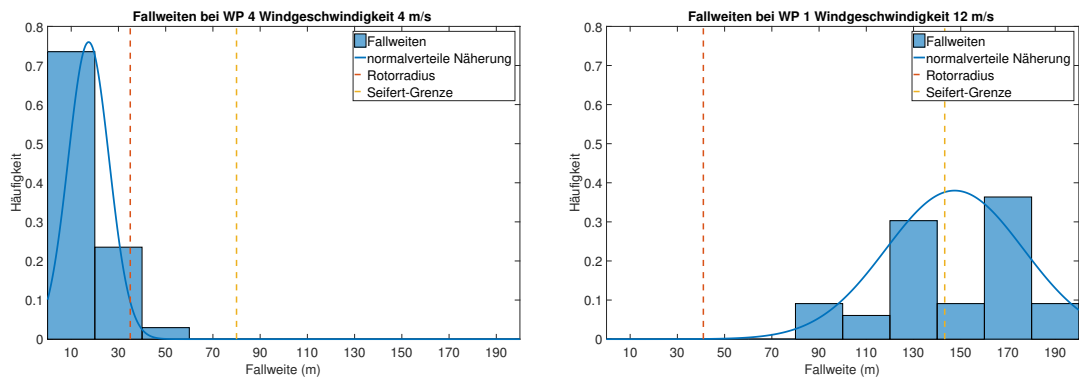


Abbildung 3.10: Vergleich der Fallweiten bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 4 m s^{-1} bei einer Anlagengesamthöhe von 100 m (links) und 12 m s^{-1} und einer Anlagengesamthöhe von 179 m (rechts). Bei niedriger Geschwindigkeit liegen die meisten Eisfragmente innerhalb des Rotorradius, bei hohen liegt etwa die Hälfte außerhalb der Grenze aus der Seifert-Formel.

Grenze nicht erreicht, bei der Kombination aus hoher Geschwindigkeit und Turmhöhe wird die Grenze allerdings deutlich überschritten, da 55% der gefundenen Fragmente weiter fielen, als die berechneten 143 m. Es besteht weiters die Möglichkeit, dass Fragmente außerhalb von 200 m Radius nicht gefunden wurden, da die abzusuchende Fläche quadratisch mit der Entfernung zunimmt. Weiters ist zu erkennen, dass eine Beschreibung der Fallweiten als normalverteilt möglich und sinnvoll ist.

Für die Modellentwicklung besonders interessant sind Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13, welche die Auswirkung linearer Anpassung der Fallweite in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bzw der Nabenhöhe zeigen. Dem liegt wieder die Annahme zugrunde, dass die durchschnittliche Fallweite bei Rückgang der Windgeschwindigkeit auf 0 m s^{-1} bzw. der Nabenhöhe auf 0 m ebenfalls auf 0 m zurückgeht. Um die Skalierungsfaktoren möglichst gering zu halten, wurde jeweils ein Wert nahe dem Mittelwert der Parameter gewählt - 7 m s^{-1} für die Windgeschwindigkeit und 110 m für die Nabenhöhe. Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen eine lineare Zunahme der Fallweite innerhalb der Fehlertoleranzen angenommen werden muss, wobei die Annahme am schlechtesten auf den Fall mit den niedrigsten Parameterwerten zutrifft. Aufgrund der geringen Beobachtungszahl sind zuverlässige Aussagen kaum möglich, jedoch wird bei Betrachtung des Vergleichs der entsprechend linear für Windgeschwindigkeit und Nabenhöhe angepassten Normalverteilungen (Abbildung 3.11) offensichtlich, dass lineare Veränderung nur für den Mittelwert der Fallweiten und nicht für die Streuung derselben zutrifft. Außerdem zeigt sich auch hier klar, dass die lineare Anpassung bei niedrigen Startwerten schlecht zutrifft.

Anhand dieser Annahmen lässt sich, ähnlich der Seifert-Formel, eine Abschätzung für mittlere Fallweiten bei Eisfall entwickeln

$$d = \frac{v \cdot H}{10.74} - 7 \quad (3.11)$$

mit

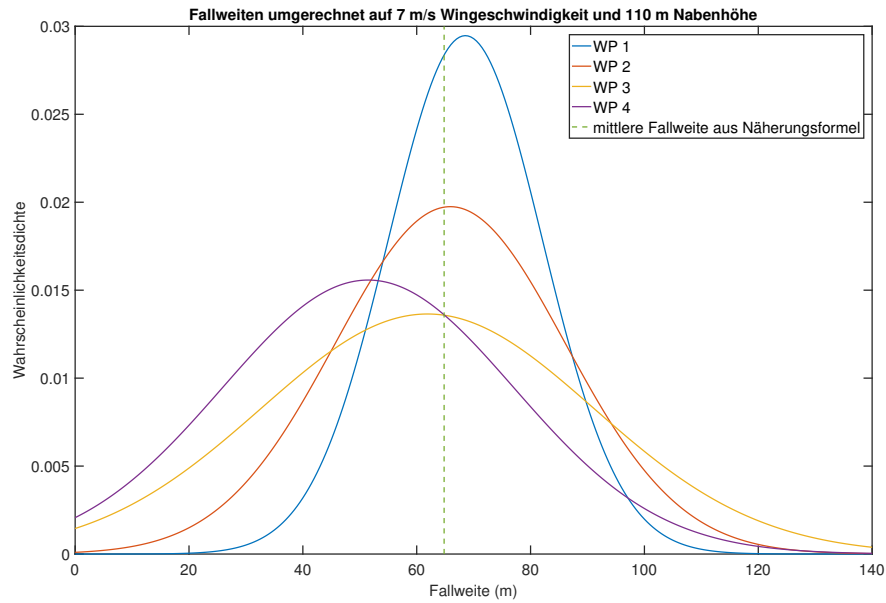


Abbildung 3.11: Vergleich der Fallweiten bei linearer Anpassung abhängig von Windgeschwindigkeit und Nabenhöhe der jeweiligen Anlage. Für geringfügige Anpassungen (WP 1-3) rücken die Maxima der Verteilungen in einen ähnlichen Bereich.

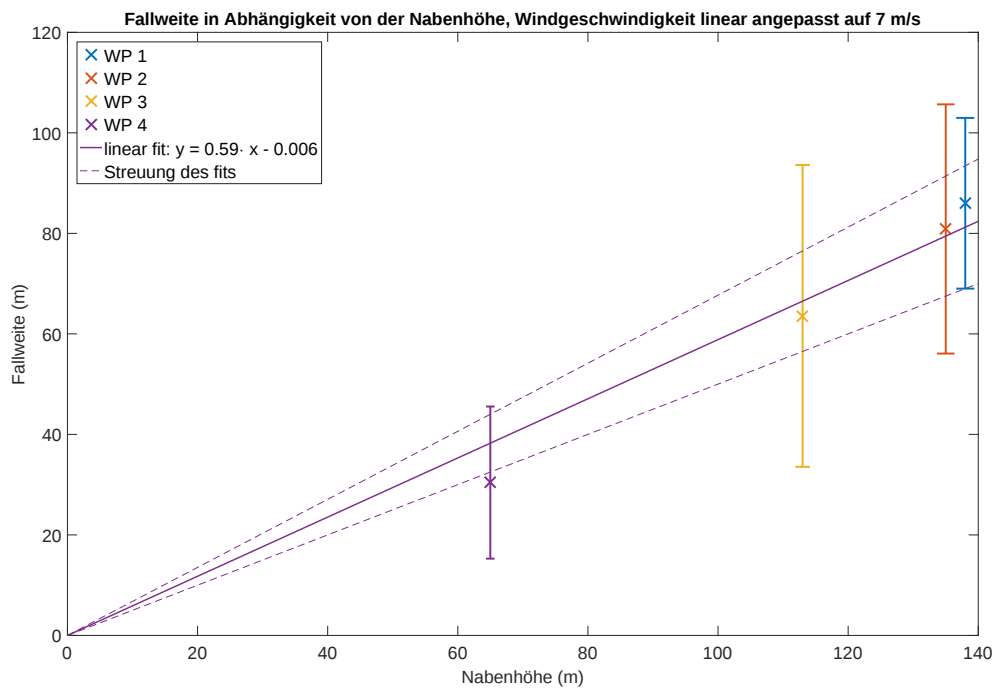


Abbildung 3.12: Vergleich der Fallweiten in Abhängigkeit von der Nabenhöhe bei linearer Anpassung der Windgeschwindigkeit auf 7 m s^{-1} . Ein grob linearer Zusammenhang zwischen Fallweite und Nabenhöhe ist zu erkennen.

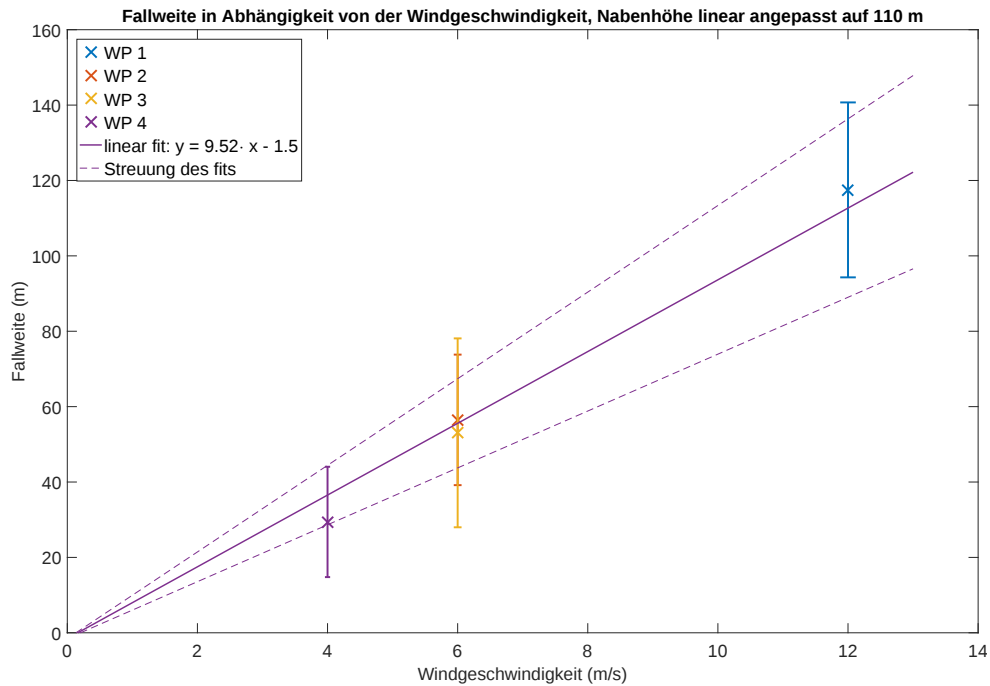


Abbildung 3.13: Vergleich der Fallweiten in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bei linearer Anpassung der Nabenhöhe auf 110 m. Ein grob linearer Zusammenhang zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit ist erkennbar.

v ... Windgeschwindigkeit auf Höhe der Nacelle in m/s
 d ... mittlere Fallweite in m
 H ... Höhe der Nacelle in m

Für die vorhandenen Messwerte ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.993$. Zur Einhaltung der Forderung, dass die Fallweite bei Werten von 0 für die Windgeschwindigkeit oder Nabenhöhe auch 0 m beträgt ergibt sich ein geringfügig anderer Parameter b für die Formel $d = vH/b$: $b = 11.89$, mit $R^2 = 0.86$. Eine Beschreibung der Verteilungsbreiten auf ähnliche Art gelingt nicht, jedoch gibt es einen schwachen Zusammenhang zwischen der relativen Breite der Verteilung σ_{rel} und der Anlagengesamthöhe: $\sigma_{rel} = 0.57 - v \cdot (H + R) / 5570$, mit dem Rotorradius R , jedoch bei einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.8$. Mit diesen Näherungen lassen sich auch Werte für die Maximalweiten abschätzen, sofern eine Wahrscheinlichkeitsgrenze für das Überschreiten einer gewissen Fallweite angenommen wird, die sich als Abweichung vom Mittelwert in Vielfachen von σ Ausdrücken lässt. So finden sich in einer Entfernung von $d \cdot (1 + 3 \cdot \sigma_{rel})$ nur noch 0.36% der fallenden Fragmente. Im Vergleich zur Seifert-Formel ist diese Beschreibung allerdings komplexer, stimmt aber mit den gemessenen Werten auch wesentlich besser überein.

Es ist weiters festzuhalten, dass bei den unterschiedlichen Ereignissen teilweise unterschiedliche Vereisungsbedingungen vorlagen und daher das gebildete Eis nur schlecht vergleichbar ist. Außerdem ist für die weitere Modellentwicklung zu berücksichtigen, dass die WEA während des Abtauvorgangs weiterhin dem Wind nachgeführt wird, sich also auch bei schwachem Wind,

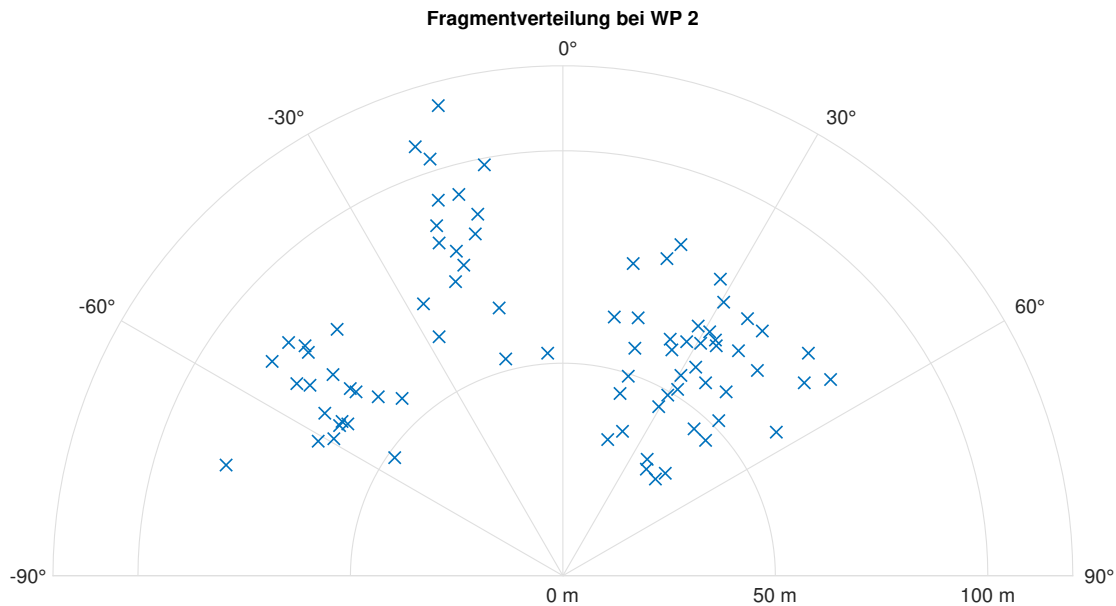


Abbildung 3.14: Exemplarische Verteilung von Eisfragmenten im WP2. Die WEA befindet sich im Ursprung, die Gradangaben sind willkürlich gewählt.

bei dem die Position der Rotorblätter wesentlichen Einfluss hat, Veränderungen der Windrichtung stark auf das gesamte Verteilungsmuster auswirken. Zusätzlich ist der Rotor üblicherweise nicht gebremst sondern im Leerlauf und bewegt sich daher langsam. Bei Anlagen ohne Abtau-anlage, bei denen also der Abtauvorgang auf natürlichem Wege auch wesentlich längere Zeit in Anspruch nehmen kann, sind daher auch andere Verteilungsmuster zu erwarten.

Abbildung 3.14 zeigt eine ausgewählte Verteilung von Eisfragmenten im Umfeld einer WEA. Deutlich erkennbar ist die Bildung von drei Clustern, entsprechend der drei Rotorblätter. Diese ist aufgrund der beim gezeigten Ereignis vorherrschenden, niedrigen Windgeschwindigkeit von 6 m s^{-1} besonders ausgeprägt, war allerdings bei allen untersuchten Ereignissen erkennbar. Daher war auch eine Auswertung der Verteilungsbreite bezogen auf die Windrichtung nicht sinnvoll durchführbar. Es ist jedoch an dem angeführten Beispiel erkennbar, dass bei niedrigen Windgeschwindigkeiten sehr breite Verteilungen möglich sind.

3.2.2.3 Fragmentgeometrien

Insgesamt wurden 384 Fragmente vermessen, von denen der Großteil auch statistisch ausgewertet werden konnte. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen jenen Fällen, in denen die Fragmente im Wesentlichen erhalten waren und daher auch in allen drei Dimensionen untersucht werden konnten und jenen, in denen das abgefallene Eis nach dem Aufprall stark weiter fragmentierte und daher die ursprüngliche Form nur bedingt rekonstruierbar war. Im zweiten, wesentlich häufigeren Fall wurde die Abmessung in zwei Dimensionen anhand des Streubildes, bzw. der Abdrücke im Untergrund bestimmt. Abbildung 3.17 zeigt eine Verteilung der Längen und Breiten der Bruchstücke, wie sie für einen starken Raueis-Ansatz typisch erscheint. In Abbildung 3.15 wird die Zunahme der Breite der Fragmente mit der Länge gezeigt, die den Umstand abbildet, dass dünne lange Eisstücke solange weiter im Fall zerbrechen, bis das Verhältnis Länge zu Breite zu stabilen Bruchstücken führt. Dieses Verhältnis ist aber keineswegs

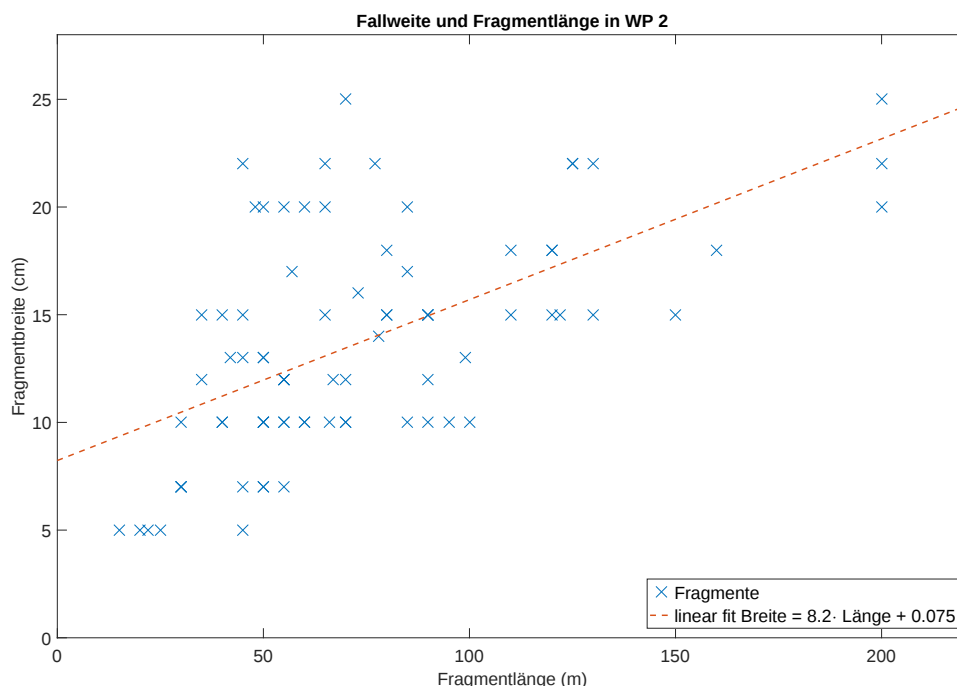


Abbildung 3.15: Eine deutlich ausgeprägte Zunahme der Breite mit der Länge der fallenden Fragmente zeigte sich bei der Beobachtung in WP 2.

konstant, sondern stark von den Bedingungen der Eisbildung und des –falls abhängig und lässt sich bei zwei der vier Beobachtungen gar nicht feststellen. Im in Abbildung 3.15 dargestellten Fall muss festgehalten werden, dass das abgefallene Raueis ausnehmend kompakt war, und es ist zu erkennen, dass der Eisansatz auch sehr stark, d.h. die Fragmente generell sehr breit waren. Daher ist davon auszugehen, dass wenige Fragmente in der Luft aufgrund zu niedriger Dicke weiter zerfielen. Bei der zweiten Beobachtung, bei der kein Zusammenhang zwischen Länge und Breite der abgefallenen Stücke feststellbar war, herrschte dünner Klareisansatz vor. Da Klareis wesentlich stabiler ist als Raueis, darf ähnlich argumentiert werden wie im zuvor beschriebenen Fall.

Schließlich zeigt ein Vergleich der Fallweite mit der Fragmentlänge, dass kürzere und dünnere und daher leichtere Fragmente, wie zu erwarten, höhere Fallweiten erreichen. Der Vergleich verschiedener Eisfall-Ereignisse zeigt weiter, dass dieser Zusammenhang nicht über die qualitative Feststellung hinausgeht, da der Grad, mit dem die Fallweite mit zunehmender Länge abnimmt, bzw. die Fragmentbreite mit der –länge zunimmt, sehr variabel ist.

3.2.2.4 Detaillierte Fragmentdokumentation

Bei den vier beobachteten Ereignissen wurden 24 relevante Fragmente eingesammelt und eingescannt (siehe Abbildung 3.18). Mithilfe der 3D-Scans wurde im Anschluss die Dichte der Proben bestimmt (siehe Abbildung 3.19). Die Dichte der Proben beträgt im Mittel $0.59 \pm 0.15 \text{ g cm}^{-3}$, bei Volumen im Bereich von $74\text{--}1460 \text{ cm}^3$. Das dichteste untersuchte Fragment hat eine Dichte von 0.96 g cm^{-3} , während das Fragment mit der geringsten Dichte bei 0.36 g cm^{-3} liegt. Die Verteilung der Dichten ist im Histogramm in Abbildung 3.19 zu sehen. Tabelle 8.1 im Anhang gibt einen detaillierten Überblick über die Fragmente.

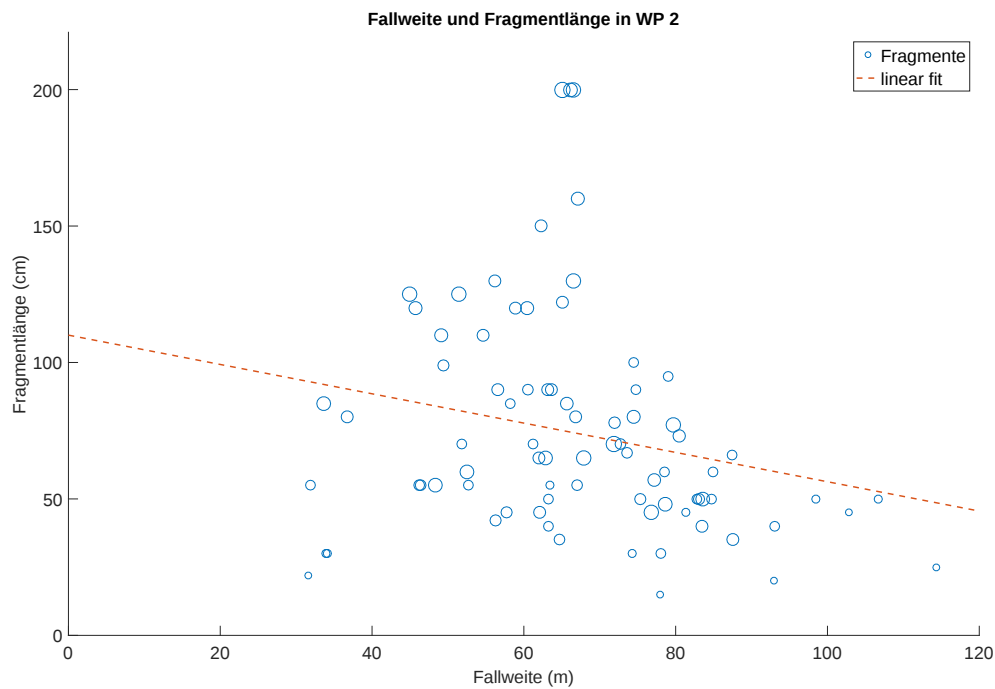


Abbildung 3.16: Zunahme der Fallweite mit Abnahme der Fragmentlänge am Beispiel des WP 2. Die Fragmentbreite wird durch die Größe der Kreise dargestellt.

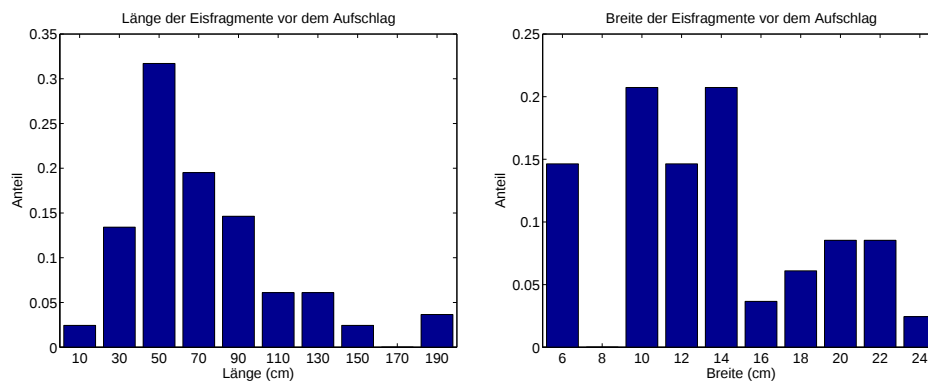


Abbildung 3.17: Histogramme der Längen- (links) und Breitenverteilung (rechts) bei der Beobachtung in WP 2 (91 Fragmente). In diesem Fall treten überwiegend Längen von 30 m bis 50 m auf, während die Breitenverteilung kein ausgeprägtes Maximum aufweist.

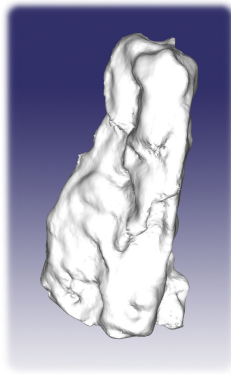


Abbildung 3.18: 3D Scan eines Eisfragments.

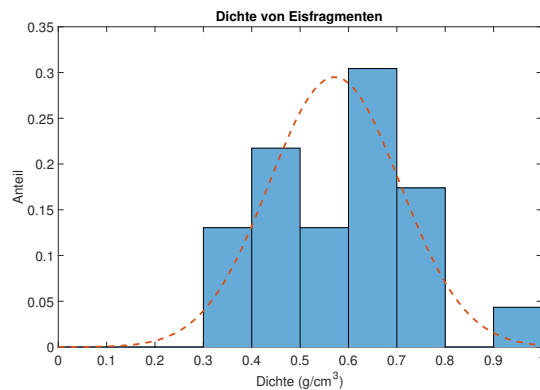


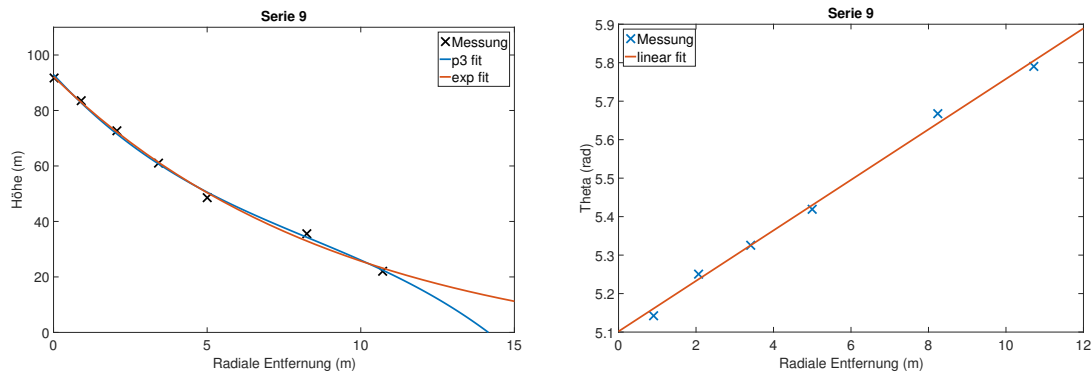
Abbildung 3.19: Histogramm der Dichte aller gesammelten Eisfragmente. Raueis mit einer Dichte von 0.6 kg m^{-3} tritt am häufigsten auf.

Erste Tests bei der Durchführung der Scans wurden mit einem lasergestützten System vorgenommen, das Genauigkeiten im Sub-Millimeter-Bereich durch die Analyse der Reflexion eines Strichlasers erlaubt. Dieses System erwies sich für den Zweck aber als ungeeignet, da die Eiskristalle der Fragmente stark unregelmäßig reflektieren und dadurch das System stören. Als wesentlich effektiver, wenn auch weniger hoch auflösend erwies sich die Nutzung eines stereooptischen Systems, das freihändig um das zu scannende Objekt bewegt wurde. Prinzipiell wäre damit auch eine Erfassung von Fragmenten vor Ort möglich, praktisch erwies es sich als zu zeitraubend, und die Fragmente wurden in Kühlbehältern abtransportiert, um nachträglich im Labor untersucht werden zu können. Durch die damit verbundene Kühlung, Wartezeit und dem Scannen der Objekte unter ihrer ursprünglichen Temperatur können Fehler bei der Dichtemessung entstehen, die jedoch als vernachlässigbar angesehen werden.

Die Dichtemessungen bestätigen die aus der Literatur bekannten Wertebereiche für Eisbildung an Strukturen und ermöglichen zumindest für die untersuchten Gebiete eine Einschätzung der zu erwartenden Dichteverteilung. Bei einer der untersuchten Anlagen befindet sich vor Ort ein meteorologischer Messmast, der eine detailliertere Analyse der Eisbildung durch Vergleich mit den Messwerten erlauben würde, jedoch liegt dies außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

3.2.2.5 Flugbahnbestimmung

Bei zwei Eisfallereignissen konnte eine stereoskopische Aufnahme des Abfallens durchgeführt und ausgewertet werden. Hieraus ergibt sich eine Basis von 20 nachvollziehbaren Flugbahnen, von denen zwei ausgesondert werden müssen, da die beobachteten Fragmente zu stark weiter zerfielen. Bei den Flugbahnen der Fragmente lassen sich grob zwei Typen von Fallverhalten unterscheiden: einerseits der zufällig taumelnde Fall, andererseits der spiralförmige Fall. In ca. 35% der untersuchten Fälle stellte sich keine Stabilisierung der Flugbahn der fallenden Stücke ein, womit die resultierende Bewegung als taumelnd beschrieben werden kann und die erreichten Fallweiten gering sind. Bei weiteren 10% zerfielen die fallenden Fragmente noch während des Fallens so stark, dass diese nicht weiter verfolgt werden konnten und auch als nicht mehr risikorelevant eingestuft werden können. Es handelte sich hierbei vermutlich um sehr wenig kompaktes Raueis, das eher mit anhaftendem Schnee vergleichbar wäre. In 11 Fällen konnte eine ausgeprägte Flugbahn ausgemacht und ein Modell zur Beschreibung derselben



(a) Radiale Entfernung eines fallenden Fragments vom Turm zur Höhe vom Boden und darauf angewandte fit-Funktionen: ein Polynom dritter Ordnung beschreibt die Flugbahn am besten.

(b) Winkel θ zum WEA-Turm im Verhältnis zur radialen Entfernung zum Turm bei einem fallenden Eisfragment. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Winkel und der Entfernung, was zu einer helikalen Flugbahn führt.

Abbildung 3.20: Modellierung der Trajektorien

entwickelt werden. Ein direktes physikalisches Modell wurde ausgeschlossen, da die sehr große Zahl abzubildender Parameter ein aussagekräftiges Modell unmöglich machen würde. Daher wurde einerseits eine rein phänomenologische Beschreibung beschlossen und andererseits die Separierung der dreidimensionalen Bewegung in zwei zweidimensionale Funktionen gewählt. Der Vergleich verschiedener Modelle zur Modellierung der Bewegung in der kartesischen X-Y-Ebene, respektive in derselben in Polarkoordinaten (Radius R und Winkel θ), zeigt, dass eine Modellierung als archimedische Spirale (als einfaches Modell) gute Ergebnisse liefert. Dazu wird ein linearer Zusammenhang zwischen R und θ angenommen. Abbildung 3.20b zeigt eine ausnehmend gute Übereinstimmung zwischen gemessenen Werte und der Modellfunktion. Hier ist weiter festzuhalten, dass sich in einigen Fällen keine Spiralbahn, sondern eine gerade Flugbahn ergibt, die allerdings durch eine gerade mit Steigung 0 ebenso modelliert werden kann.

Die Modellierung des Verhältnisses R - Z , also Entfernung vom WEA-Turm zur Höhe, ist wesentlich schwieriger, da sich die Daten weniger klar darstellen. Der Vergleich verschiedener einfacher fit-Funktionen zeigt (siehe Abbildung 3.20a), dass sowohl mit einem Polynom dritten Grades, als auch mit einer linear verschobenen exponentiell fallenden Funktion eine akzeptable Beschreibung möglich ist. Hierzu sind allerdings gemessene Punkte bis kurz vor dem Aufprall notwendig, da die fit-Funktionen sonst physikalisch unsinnige Ergebnisse, wie z.B. fehlender Schnittpunkt mit der R-Achse, liefern. Dies ist insbesondere dahingehend unbefriedigend, dass eine Extrapolation von Fallweiten kaum möglich ist, da bei einigen Modellierungen Fragmente niemals den Boden erreichen würden. Dennoch stellt diese Modellierung einen wesentlichen Fortschritt zu bisher verwendeten Methoden dar, die im Wesentlichen linear extrapolierten.

Die sich aus der Kombination der zwei zweidimensionalen Modelle ergebenden dreidimensionalen Darstellungen der Flugbahn zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten, lassen sich aber nur dynamisch befriedigend darstellen.

Aus den aufgezeichneten Flugbahnen wurden die Geschwindigkeiten der Fragmente beim Auftreffen errechnet. Aufgrund der schlechteren Auflösung des Untersuchungsaufbaus nahe dem Boden wurde jene Geschwindigkeit gewählt, die ein Fragment gegen Ende der Flugbahn über

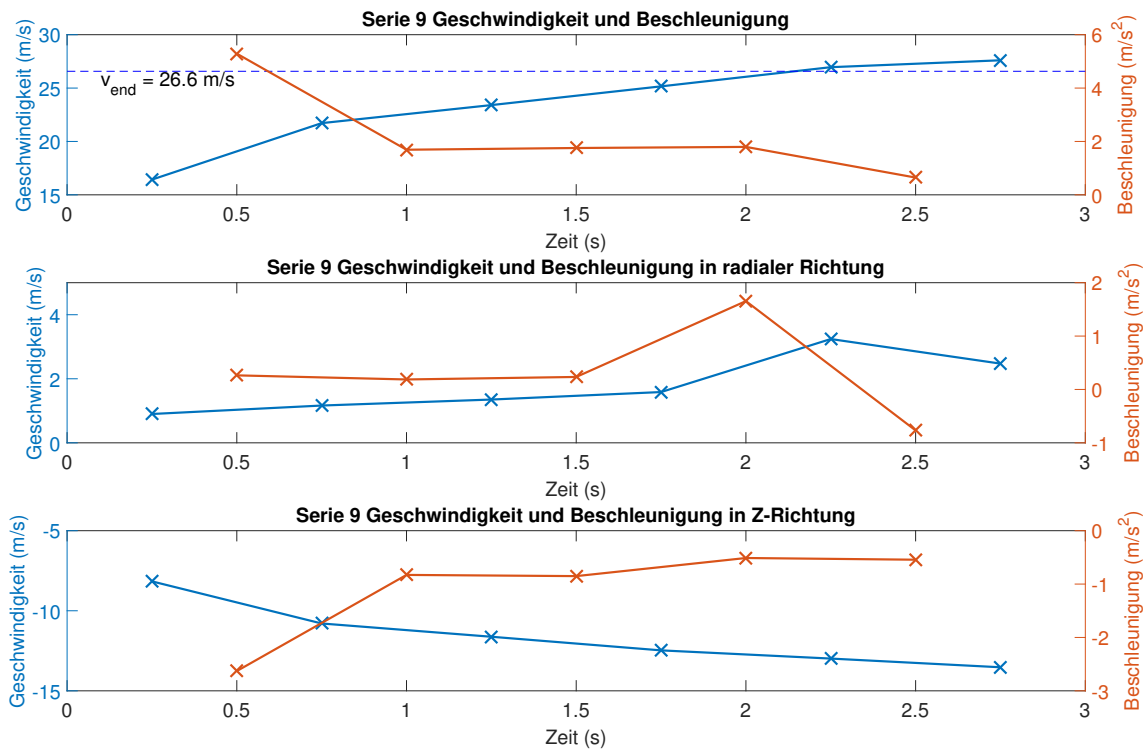


Abbildung 3.21: Beispiel für Geschwindigkeiten und Beschleunigungen eines fallenden Eisfragments. Die radiale Geschwindigkeit ist vergleichsweise niedrig.

mehrere Messpunkte beibehält. Bei Zerlegung in eine Komponente in radiale und eine in Z-Richtung, wie in Abbildung 3.21 dargestellt, zeigt sich, dass im Rahmen dieser Beobachtungen der Hauptteil der Gesamtgeschwindigkeit aus der Abwärtsbewegung stammt, wie dies bei geringer Windgeschwindigkeit zu erwarten war.

Für 15 Trajektorien konnte eine sinnvolle Endgeschwindigkeit ermittelt werden. Abbildung 3.22 zeigt einen Boxplot der errechneten Endgeschwindigkeiten. An diesem ist zu erkennen, dass im Mittel Geschwindigkeiten von 26 m s^{-1} erreicht wurden, bei einer Streuung von ca. 4.5 m s^{-1} . 75% liegen über 22 m s^{-1} , d.h. ein Fragment mit 170 g wäre bei diesen bereits risikorelevant.

Zur Darstellung der Endgeschwindigkeiten wurde ein Boxplot gewählt. Bei diesem stellt eine Box die mittleren 50% der Daten dar. Der Querstrich innerhalb der Box markiert den Median der Werte, d.h. der jeweils daneben liegende Teil der Box umfasst ein Quartil der Daten. Die

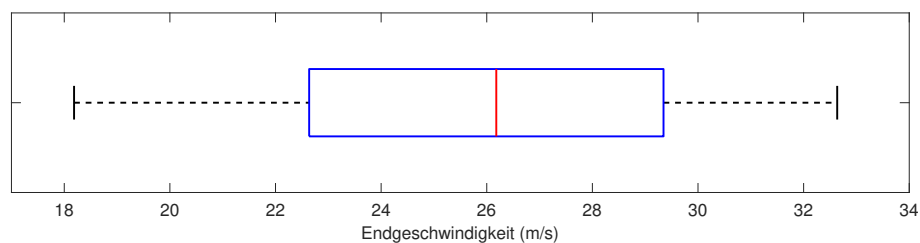


Abbildung 3.22: Boxplot der gemessenen Endgeschwindigkeiten bei beobachtetem Eisfall: Die Endgeschwindigkeiten sind grob normalverteilt, der Mittelwert liegt bei 26 m s^{-1} .

	Windspot 3,5	Easywind 6kW	Schachner SW5
Leistung (kW)	3,5	6	4,8
Rotordurchmesser (m)	4,1	6	5,6
Rotorblattzahl	3	4	3
Drehzahl (rpm)	250	83-124	240
Turmhöhe (m)	19	19	12

Tabelle 3.5: Überblick über relevante Windkraftanlagen für Eiswurfuntersuchungen

Länge der Box entspricht daher auch dem Interquartilabstand. Die Lage des Medianstrichs innerhalb der Box vermittelt damit einen Eindruck der Schiefe der Verteilung. Die Antennen oder Whisker, also die an die Box anschließenden durch einen Querstrich begrenzten Linien verlaufen jeweils zum letzten Wert, der sich innerhalb des 1.5 fachen des Interquartilabstands befindet. Außerhalb dieses Bereiches liegende Werte werden als Ausreißer markiert.

3.3 Monitoring bei KWEA

Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen Klein- und Großwindenergieanlagen, bezogen auf Eiswurf bzw. Eisfall, wurde der Eisansatz bei Anlagen im Energieforschungspark Lichtenegg betrachtet. Dieser Forschungspark besteht seit 2011 und ist auf den Test von Kleinwindkraft- und Photovoltaik-Anlagen in Kombination mit Speicherlösungen spezialisiert. Lichtenegg befindet sich in der Buckligen Welt, Niederösterreich, auf 770 m Seehöhe. Der Testpark liegt exponiert auf einer Hügelkuppe und verfügt somit über günstige Windverhältnisse, die aufgrund der starken Böen sehr gut geeignet sind, die Belastbarkeit von Anlagen zu testen. Die teils harten winterlichen Verhältnisse ermöglichen auch diesbezügliche Untersuchungen von Anlagen. Die Zahl der Messmaste und installierten Anlagen variiert stark, jedoch können zumindest 10 Anlagen installiert werden. Am Gelände des Forschungsparks befindet sich auch eine Großwindenergieanlage des Typs Enercon E-66. Die Zusammensetzung der Kleinwindenergieanlagen in Lichtenegg variiert wie erwähnt, zum Zeitpunkt der Untersuchung wurden folgende Anlagen betrachtet (Tabelle 3.5).

Die Anlagen Easywind 3.5 und Windspot 6 sind horizontale Luv-Läufer, vom Bauprinzip also sehr ähnlich Großwindenergieanlagen, mit dem einzigen Unterschied der vier anstatt drei Rotorblättern der Windspot 6. Die Anlage Schachner SW5 ist demgegenüber ein Leeläufer, der Rotor befindet sich also auf der windabgewandten Seite der Anlage. Im Gegensatz zu Luv-Läufern ist deshalb weder eine aktive Windnachführung noch eine Windfahne zur passiven Nachführung notwendig. Alle Anlagen sind vergleichsweise schwer (mehrere hundert Kilogramm) und entsprechend träge in der Windnachführung.

Im Unterschied zu Großwindenergieanlagen verfügen die installierten Kleinwindenergieanlagen über keine Eisdetektionssysteme und setzen daher bei Vereisung den Betrieb fort. Dies führt dazu, dass bei Vereisungsbedingungen immer wieder Eis aufgebaut und durch die Drehbewegung abgeworfen wird. Aufgrund der meteorologischen Gegebenheiten fand Eisansatz außerdem zumeist nachts statt, wodurch keine direkte Beobachtungen des Ansatzes und des Abwurfs durchgeführt werden konnte. Während der Untersuchungszeit wurden von der ZAMG tägliche Prognosen für Vereisung am Standort erstellt, die Vorhersagegenauigkeit war aber unzureichend für die Planung von Untersuchungen, da die Vereisungswarnungen einerseits viele falsch positive Meldungen enthielten, und andererseits einige zeitlich um ein bis zwei Tage

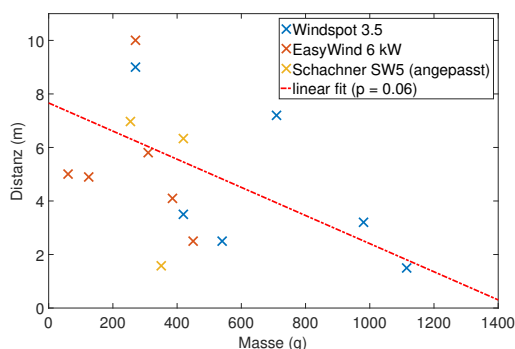


Abbildung 3.23: Verhältnis Masse zu Wurfweite für die untersuchten KWEA: Für die Anlage Schachner SW 5 wurde für die geringere Masthöhe linear korrigiert. Es ergeben sich geringere Wurfweiten für höhere Massen.

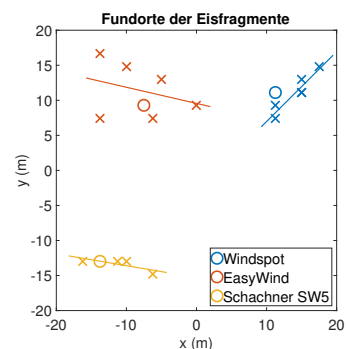


Abbildung 3.24: Fundorte von Eisfragmenten, den jeweiligen Anlagen zugeordnet. Die Linien zeigen die angenommene Wurfebene.

verschobene Meldungen. Ein tägliches Monitoring, mit dem diesen Problemen hätte begegnet werden können, war praktisch nicht durchführbar, da einerseits ein Team von mindestens vier Personen zur effektiven Durchführungen der Untersuchungen notwendig ist und andererseits die Anfahrtszeit über eine Stunde beträgt. Durch diese Umstände konnte im Untersuchungszeitraum 2015-2017 nur ein Eiswurf-Ereignis dokumentiert werden. Die dabei abgeworfenen Stücke wurden gesammelt, vermessen und gewogen, sowie die Wurfweite dokumentiert und von einzelnen Fragmenten 3D Scans angefertigt.

Da nur drei Anlagen an nur einem Zeitpunkt untersucht werden konnten, ist die Aussagekraft über Wurfweiten begrenzt, erlaubt aber eine qualitative Einschätzung. Bei der Analyse des Verhältnisses der Fragmentmasse zur Wurfweite ist eine schwache Korrelation ($p = 0.06$) feststellbar (siehe Abbildung 3.23). Für diese Analyse musste eine lineare Anpassung der Wurfweiten, wie schon in Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben, durchgeführt werden. Hierzu wurden die Wurfweiten der Fragmente, die von der Anlage Schachner SW5 abgeworfen wurden, entsprechend der Unterschiede in den Turmhöhen mit dem Faktor 19/12 multipliziert.

Das Histogramm für die Wurfweite, ebenfalls korrigiert für unterschiedliche Turmhöhen unter der Annahme linearer Skalierung, zeigt, dass die meisten Fragmente eine Wurfweite von 2 m bis 6 m aufweisen (siehe Abbildung 3.25). Der Großteil der Fragmente wiegt weiters 200 g bis 400 g.

Abbildung 3.24 zeigt die Fundorte der Eisfragmente und ihre die zugehörigen Anlagen. Es ist gut zu erkennen, dass die meisten Abwürfe bei einer bestimmten Position der jeweiligen Anlage erfolgen, da die Verteilungen sehr breit zu beiden Seiten einer Anlage sind, d.h. die Fragmente kommen überwiegend in einer Ebene parallel zur Rotorebene zum Liegen und die direkte Verfrachtung durch Wind ist gering. Weiters ist auffällig, dass alle Trefferebenen unterschiedlich orientiert sind. Laut Windmessung lag ausgeprägter Nordwind vor, was in guter Übereinstimmung mit der Schachner-Anlage steht, da diese ein Leeläufer ist. Easywind und Windspot sind weniger gut in den Wind ausgerichtet, allerdings lässt sich dies möglicherweise durch starke Turbulenzen erklären. In der Zeit zwischen 0 und 6 Uhr, in der wahrscheinlich der Eiswurf erfolgte, wurde eine mittlere Windgeschwindigkeit von 8 m s^{-1} gemessen und maximale Böen von 16 m s^{-1} . Die genauere Betrachtung der Winddaten ergibt eine verhältnismäßig hohe Turbulenzintensität von 15%.

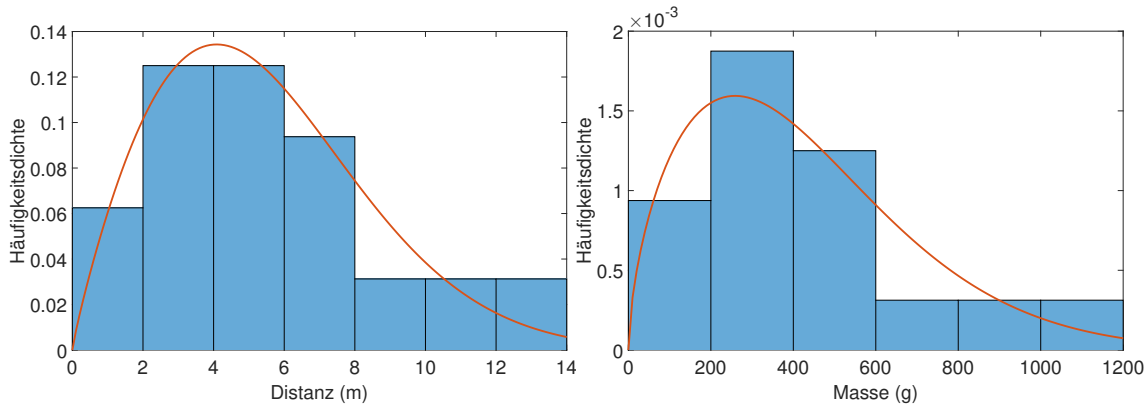


Abbildung 3.25: Histogramme der Fallweitenverteilung (links) und der Massenverteilung (rechts) bei Eiswurf von KWEA.

Die fünf von der Anlage Windspot stammenden Fragmente wurden eingesammelt und gescannt. Bei der Bestimmung der Dichte ergab sich ein durchschnittlicher Wert von $0.76 \pm 0.13 \text{ g cm}^{-3}$. Die Scans ermöglichen eine Reproduktion für weitere Experimente wie in Abschnitt 3.6 beschrieben.

3.4 Experimente

Da sich, wie beschrieben, auf Basis der Beobachtung von Eisfall aufgrund der geringen Stichprobenzahl keine statistisch signifikanten Aussagen treffen lassen und die Probekörperbasis der ersten Experimente (Abschnitt 3.1) als unzureichend eingestuft wurde, wurden weitere Experimente in 1:1 Maßstab zu Eisfall durchgeführt. Bei diesen wurde großes Augenmerk auf die Auswahl der Probekörper gelegt, sowie die Windmessung drastisch verbessert. Weiters wurde die Aufzeichnung der Trajektorien, die schon beim Monitoring eingesetzt wurde, hier ebenfalls durchgeführt.

3.4.1 Auswahl der Probekörper

Im Laufe der Beobachtungen wurden 24 Fragmente eingesammelt und eingescannt. Zur Auswahl geeigneter Vorlagen für die Generierung von Probekörpern wurden folgende Annahmen und Einschränkungen getroffen:

- eine Untergrenze von 40 J kinetischer Energie beim Aufprall (siehe 2.1.1 auf Seite 18)
- eine Endgeschwindigkeit von 20 m s^{-1} (siehe 3.2.2.5 auf Seite 48)
- eine Dichte von 600 kg m^{-3} für Raueis und 1000 kg m^{-3} aufgrund der zur Verfügung stehenden Materialien

Aus den ersten beiden Punkten ergibt sich mit $E_{kin} = \frac{mv^2}{2}$ eine Mindestmasse für Probekörper von $m = 200 \text{ g}$.

Unter Anwendung dieser Kriterien wurden aus der Liste der vorhandenen 3D-Modelle neun Scans als für die Schaffung von Probekörpern geeignet identifiziert (siehe Tabelle 3.6)

Aus diesen wiederum wurden die Fragmente A2 und C2 zur Herstellung in größerer Stückzahl und in verschiedenen Vereinfachungsstufen ausgewählt.

Kennung	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	V [cm ³]	m [g]	ρ [g/cm ³]	E [J]	m' [g]	E' [J]
A2	130.7	79.7	136.9	348.4	260.0	0.75	52.0	209.0	41.8
H	91.8	91.6	148.9	351.2	159.0	0.45	31.8	210.7	42.1
C	86.1	80.5	176.1	338.0	180.0	0.53	36.0	202.8	40.6
x1	118.7	98.1	188.3	721.9	290.6	0.40	58.1	433.1	86.6
F	87.7	79.4	195.8	428.8	248.2	0.58	49.6	257.3	51.5
B2'	130.4	98.0	220.6	726.2	411.7	0.57	82.3	435.7	87.1
B	129.5	90.9	234.7	793.2	414.0	0.52	82.8	475.9	95.2
C2	105.3	126.4	299.0	1078.9	820.0	0.76	164.0	647.3	129.5
D2	121.7	66.1	305.3	938.8	690.0	0.74	138.0	563.3	112.7

Tabelle 3.6: Mögliche Vorlagen für Probekörper und ihre charakterisierenden Parameter Maße (X , Y und Z), Dichte (ρ), Volumen V und Original-Masse (m). Weiters die sich ergebende Masse m' bei einer standardisierten Dichte von 600 kg m^{-3} und die korrespondierende Aufprallenergie bei 20 m s^{-1} Endgeschwindigkeit für Originalmasse (E) und Masse bei standardisierter Dichte (E').

Zusätzlich zu diesen wurde ein Profil von Klareisansatz durch Ausmessen reproduziert, sowie idealisierte konkav-konvexe Klareisprofile.

Zusätzlich zu diesen wurden von den zur Verfügung stehenden Holz-Probekörpern aus den ersten Experimenten folgende Typen als besonders relevant und daher für weitere Experimente geeignet identifiziert: Akz, Amz, Fkx, Fgy. Diese Probekörper zeichnen sich dadurch aus, dass sie dünnes, flaches Klareis und massives Raueis repräsentieren. Außerdem sind ihre Dimensionen jeweils vielfache voneinander, wodurch sich die Skalierung von Modellen überprüfen lässt.

Weiters wurden zusätzliche zylindrische Probekörper aus Holz verschiedener Länge und Durchmesser sowie längs halbiert geschaffen, da Raueisansatz an der Blattvorderkante oft eine leicht zylindrische oder halbzyklindrische (genauer: konkav-konvexe) Form aufweist. Außerdem ist der Vergleich mit Erfahrungen aus dem Eisansatz an Hochspannungsleitungen, der meist zylindrisch ist, möglich (Makkonen, 1998).

Zur Untersuchung des Einflusses der Krümmung auf das Verhalten von Klareisplatten wurden weitere plattenförmige Probekörper aus Polystyrol gefertigt, die an ein Rotorblattprofil geformt wurden.

Die folgenden Abschnitte beschreiben ausgewählte Probekörper im Detail; in Abschnitt 3.4.2 wird eine Übersicht über alle eingesetzten Probekörper gegeben.

3.4.1.1 Naturnahe Probekörper

Zur Herstellung von Probekörpern, die den bei Eisansatz auftretenden Formen möglichst nahe kommen, wurden verschiedene Verfahren getestet. Erste Versuche des Abformens von gesammelten Proben mittels Zement und gießen von Probekörpern in der so entstandenen Gussform erwiesen sich als nicht praxistauglich, unter anderem wegen Wärmeentwicklung und Schrumpfungsvorgängen beim Abguss. Weiters wurde aufgrund der geringen Zahl gesammelter Proben ein nicht-zerstörendes Verfahren bevorzugt. Das Anfertigen von 3D Scans stellte sich als geeignet zur Archivierung der gesammelten Formen heraus und 3D Druck ermöglichte die Reproduktion von Probekörpern. Durch den Einsatz von ABS-Kunststoff zum Druck ist es möglich die Dichte der Probekörper im notwendigen Bereich zu variieren. Nachteilig an diesem Verfahren sind die sehr langen Herstellungszeiten und die Begrenzung der Größe von Probekörpern bei

gängigen kommerziellen 3D Druckern. Der Druck eines einzelnen 250 g schweren Probekörpers dauert zwischen 24 und 36 Stunden - das Verfahren ist zur Herstellung größerer Mengen an Probekörpern in dieser Form daher nicht geeignet. Gängige Drucker sind meist in ihrer längsten Dimension auf 20 cm bis 25 cm begrenzt, was eine weitere Einschränkung darstellt.

Es wurden weiters mehrere Verfahren getestet, Gussformen von gedruckten Probekörpern anzufertigen, um größere Mengen in kurzer Zeit herstellen zu können. Das Abformen mit Silikon wurde als prinzipiell anwendbar identifiziert, aufgrund der hohen Rohstoffkosten für die Anfertigung einer einzelnen Gussform aus hochwertigem Silikon wurde dieses Verfahren aber verworfen. Verfahren des direkten Abformens mit Gips oder ähnlichen hart aushärtenden Stoffen ist wegen der komplexen Formen ungeeignet - das nicht-destruktive Entfernen des Positivs aus der Negativ-Form ist nicht möglich. Ähnlich verhält es sich mit dem 3D Druck von Gussformen, bei dem noch die Schwierigkeit hinzukommt, diese hinreichend abzudichten. Weiters wurde getestet, Positive in Formsand abzuformen. Während die Herstellung der Negative auf diesem Weg sehr vielversprechend war, zeigte sich, dass der Sand sich mit dem äußersten Rand des Gießlings verbindet und damit Oberfläche und Gewicht signifikant verändert.

Schließlich wurde als effizienteste Herstellungsmethode der 3D-Druck von Hohlformen gefunden. Hierzu werden geeignete 3D-Modelle so modifiziert, bzw. in Teile zerschnitten, dass sie stabil aufrecht stehen, was den Druck und Guss wesentlich erleichtert. Durch schneiden und drehen der Schnittstücke ist eine geeignete Konfiguration immer erreichbar. Die so erstellten Modelle werden hohl, aber mit ausreichender Wandstärke von zumindest 0.8 mm, entsprechend zwei Schichten beim Druck mit der gängigen Extruderspitzengröße von 0.4 mm, ausgedruckt, wobei durch geeignete Wahl der Druckgeschwindigkeit und Auflösung der korrekte Ausdruck der obersten Schicht sichergestellt wird. Bei Teilen mit flacher Oberseite wird diese gar nicht gedruckt. Die Ausdrücke werden durch Bestreichen mit Aceton, welches den benutzten ABS-Kunststoff kurzfristig auflöst und zum Verrinnen bringt, abgedichtet. Nach einer Dichtheitsprobe und ggf. Nachbearbeitung werden möglichst auf den Unterseiten der Probekörpern zwei Löcher zum Befüllen und Druckausgleich gebohrt, oder die Böden vollständig entfernt. Die Probekörper werden außen mit geeignetem Trennmittel behandelt und möglichst bündig mit dem Rand in Sand gesteckt. Dann werden sie mit geeignetem Epoxidharz befüllt. Hierzu kommen derzeit zwei verschiedene Harze zum Einsatz: ein reines Epoxidharz mit einer Dichte von ca. 1 g cm^{-3} für Klareisformen und ein mit Schäumer versetztes Harz, dessen Dichte durch das Aufschäumen auf 0.6 g cm^{-3} reduziert wird. Nach dem Aushärten und Reinigen werden die Einzelteile verklebt, wobei sich bei glatten Klebeflächen das Anlösen mit Aceton als beste Methode erwies. Durch die Wärmeentwicklung beim Aushärten des Epoxidharzes kommt es allerdings öfters zu leichten Verformungen vor allem glatter Flächen. In diesem Fall empfiehlt sich das Auffüllen größerer Spalten mit ABS unter Verwendung eines 3D-Pens und das Kleben mit schnell härtendem höher viskosen Epoxidharz.

3.4.1.2 Fragment A2

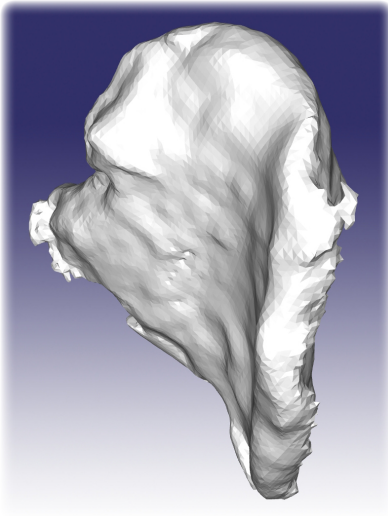


Abbildung 3.26: 3D Scan des Fragments A2

Das Fragment A2 ist ein verhältnismäßig kleines Rau-eisfragment. Die Abformung der Vorderkante des Rotorblattes ist klar zu erkennen, die abgerundete Oberseite und geringe Dicke sprechen dafür, dass in diesem Fall nur geringe Vereisung vorlag. Der Probekörper misst an der dicksten Stelle ca. 32 mm, ist 134 mm breit und 136 mm lang. Trotz der geringen Länge erfolgte der Druck zweiteilig, getrennt in den Hauptteil und eine untere Endkappe. Die mit schäumendem Harz gegossenen Probekörper wiegen ca. 227 g. Zum Test der Vereinfachung der Probekörper wurden vier verschiedene Vereinfachungsstufen dieses Typs hergestellt. Die erste Vereinfachung stellt das Glätten der Oberfläche dar. Während dies noch zu sichtbaren Unterschieden im Designprozess führt, sind die geglätteten und Original-Probekörper nach dem Druck und der notwendigen Nachbehandlung nicht mehr zu unterscheiden. Die zweite Vereinfachung stellt die Reduktion auf die Verbindung zweier Querschnittebenen

mit im Detail stark reduzierten Endkappen dar. Den geringsten Detailgrad hat schließlich ein Probekörper, der aus der Extrusion einer einzelnen Schnittebene mit den vorher erwähnten Endkappen erstellt wird.

Aufgrund der relativ geringen Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen wurden schließlich nur die Originalkörper und die maximal vereinfachten in größerer Stückzahl hergestellt.

3.4.1.3 Fragment C2

Beim Profil des Probekörpers C2 ist klar die Kontaktfläche zum Rotorblatt zu erkennen. Weiters zeichnet sich der Probekörper durch eine wellig-gerippte Struktur aus, die sich regelmäßig im Abstand von ca. 30 mm wiederholt. Um den Produktionsaufwand zu reduzieren, wurde der Körper von einer Gesamtlänge von 299 mm am Fundort auf eine Länge von ca. 160 mm in der Reproduktion gekürzt. Die Breite beträgt ca. 110 mm und die Dicke 60 mm. Zur Herstellung vereinfachter Probekörper wurden zwei Schnittebenen im Abstand von 125 mm gewählt und der Übergang zwischen diesen Ebenen durch Interpolation hergestellt. Die Oberseite ist wiederum eine stark im Detail reduzierte Variante des Originals. Das Gewicht der Probekörper mit einer Dichte von 0.6 g cm^{-3} beträgt 394 g bei den Originalformen und 282 g bei den stark reduzierten Varianten. Der Unterschied zwischen Original und Vereinfachung ist in Abbildung 3.27 dargestellt.

3.4.1.4 Klareis-Probekörper

Zum Vergleich mit Klareisansatz wurden Probekörper geschaffen, die in folgenden Varianten vereinfacht wurden:

- Eine Aufnahme eines gefundenen Fragmentes wurde vermessen und auf dieser Basis ein Profil geschaffen und extrudiert.

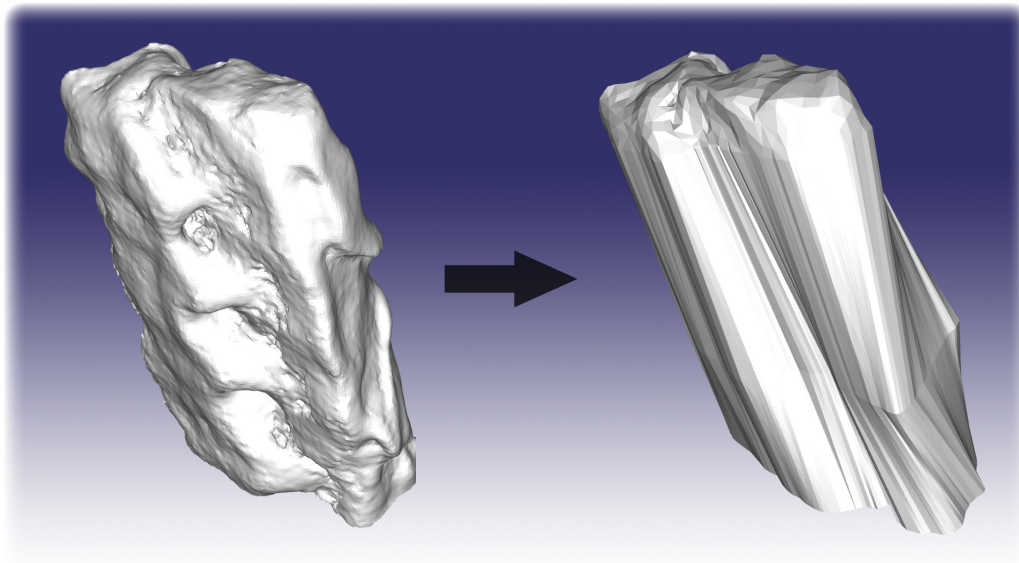
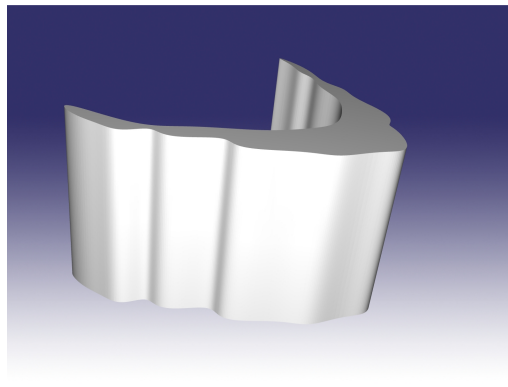


Abbildung 3.27: 3D Modelle des Fragments C2 in Originalform und Vereinfachung



(a) Aufnahme des als Vorlage dienenden Klareisfragments.



(b) 3D-Modell des Klareisfragments.

Abbildung 3.28: Modellgenerierung für Klareisprobekörper.

- Ein konkav-konvexes Profil mit realistischen Maße wurde generiert und extrudiert.
- Kunststoffplatten wurden in eine realistische Form gebogen.
- Flache Platten entsprechender Größe wurden benutzt.

Zur Herstellung eines naturgetreuen Profils wurden die in Abbildung 3.28a dargestellten Aufnahme vermessen und damit der in Abbildung 3.28b dargestellte 3D-Körper generiert. Dieser wurde als Hohlform gedruckt und mit Epoxidharz gefüllt. Der fertige Probekörper ist 136 mm breit, 80 mm hoch und 109 mm lang. Das Profil hat an der dicksten Stelle einen Querschnitt von 32 mm und der fertige Probekörper wiegt ca. 252 g. Dieser Probekörper mit der Typbezeichnung M24 simuliert schweren Klareisansatz, wie er in Österreich eher selten vorkommt.

Ein simples konkav-konvexes Modell wurde mit einer maximalen Breite von 115 mm einer minimalen Dicke von 5 mm und einer maximalen Dicke von 15 mm generiert und auf eine Länge von 140 mm extrudiert. Der entstandene Körper wurde ebenfalls 3D gedruckt und mit Epoxidharz gefüllt, womit sich ein Endgewicht von 187 g ergab. Die Typ-Bezeichnung dieses Probekörpers lautet M08.

Zur Herstellung der gebogenen Platten wurden 5 mm dicke Polystyrol-Platten mit den Seitenlängen 20 cm × 25 cm und 18 cm × 13.5 cm zugeschnitten. Die größeren Platten wurden auf ca. 200 °C erhitzt und direkt thermoplastisch an ein vorhandenes Rotorblattprofil geformt. Die kleineren Platten wurden mit leichtem Versatz flächig mit Aceton verklebt, sodass Platten mit 10 mm Dicke entstanden, die anschließend ebenfalls an das Profil geformt wurden. Durch geeignete Wahl der Dimensionen ergibt sich bei gleichem Seitenverhältnis das selbe Volumen und damit ein ähnliches Gewicht von 225 g bei allen hergestellten gebogenen Platten. Entsprechend ihres Materials und ihrer Dimension, die jenen der DIN Norm für Papiergrößen ähnelt (DIN EN ISO 216, 2007), lauten die Bezeichnungen dieser Platten PS A4 und PS A5.

3.4.2 Übersicht Probekörper

Die folgenden Tabellen (Tabelle 3.7 bis 3.10) beinhalten die Kenndaten über die Dimensionen der produzierten Probekörper. Die angegebenen Werte sind entweder gemessene Mittelwerte oder aus den 3D-Modellen errechnete Werte. Bei nicht-quaderförmigen Probekörpern sind die Dimensionen auf den kleinstmöglichen Quader, der sich um den Körper konstruieren lässt (bounding box), bezogen. Im Fall der halbierten zylindrischen Probekörper wird unter Durchmesser die Länge der Kreissehne und zusätzlich die Höhe des Querschnitts-Kreissegments angegeben.

Tabelle 3.11 enthält für alle Probekörper den für den Vergleich mit Berechnungen wichtigen Formfaktor $c_D \cdot A/m$ (abgekürzt cDAom). Dabei ist die Wahl von $c_D = 1$ üblich, bei der Berechnung der Fläche A gibt es aber zumindest zwei gängige Varianten. A_1 verwendet den Mittelwert der projizierten Körperoberfläche (mpO), A_2 die dominante (üblicherweise die größte) Fläche eines Körpers. Zur Berechnung der gesamten Körperoberfläche wurde bei Probekörpern, die via 3D-Druck erstellt wurden, dieser Wert aus den Modellen ermittelt. Bei allen anderen erfolgt die Berechnung aus den gemessenen Werten.

Kürzel	Masse (g)	Länge (cm)	Breite (cm)	Höhe (cm)
Akz	250	20	15	1.0
Amz	500	30	20	1.0
Fgy	1350	50	30	1.92
Fkx	600	20	15	4.0
Mmx	1800	30	20	4.0

Tabelle 3.7: Übersicht über die benutzten flachen, plattenförmigen Probekörper

Kürzel	Masse (g)	Länge (cm)	Breite (cm)	Höhe (cm)
PS A4	227	24.93	13.30	6.64
PS A5	224	17.94	10.51	5.21

Tabelle 3.8: Übersicht über die benutzten gebogenen, plattenförmigen Probekörper

	Masse (g)	Länge (cm)	Durchmesser (cm)	Höhe (cm)
A2 original	394	17.6	12.0	8.6
A2 vereinfacht	282	15.2	11.2	7.4
C2 Original	227	13.1	13.7	8.0
C2 interpoliert	214	13.1	11.9	6.4
M08	188	14.0	11.5	4.2
M24	252	13.6	10.9	8.0

Tabelle 3.9: Übersicht über die benutzten 3D gedruckten Probekörper

3.4.3 Methode und Durchführung

Zur Untersuchung des Fallverhaltens verschiedener Typen von Eisfragmenten wurden zweimal Abwürfe der Probekörper von WEA durchgeführt. In beiden Fällen wurde zur Durchführung der Experimente eine WEA des Typs Enercon E-66 mit einer Nabenhöhe von 85 m genutzt. Zum Abwurf der Probekörper wurde ein 1.5 m langes Rohr quer zur Gondel mit einer Neigung von 33° gegen den Boden an der oberen Serviceluke montiert. Mit dem Durchmesser der Gondel von ca. 3 m ergibt dies eine effektive Abwurfhöhe von 86.5 m. Der Abwurf der Probekörper erfolgt einzeln, indem ein Körper in das Rohr gelegt wurde und die Länge des geschlossenen Rohres entlang rutschen konnte, bevor er vom Wind erfasst wurde. Auf diese Weise konnten einheitliche Abwurfbedingungen für alle Probekörper geschaffen und Kollisionen mit der Anlage weitgehend verhindert werden.

Kürzel	Masse (g)	Länge (cm)	Durchmesser (cm)	Höhe (cm)	voll/halb
Z8VL	2517	100.0	7.9	-	voll
Z8VK	1266	50.5	7.8	-	voll
Z8HK	576	49.9	8.0	3.7	halb
Z6VL	1282	100.3	5.6	-	voll
Z6VK	645	50.1	5.7	-	voll
Z6HL	604	101.0	5.7	2.7	halb
Z6HK	302	50.1	5.7	2.6	halb

Tabelle 3.10: Übersicht über die benutzten zylindrischen Probekörper

Kürzel	Masse (g)	A_1 (m ²)	$\frac{c_D A_1}{m}$	A_2 (m ²)	$\frac{c_D A_2}{m}$
A2 original	0.227	0.008	0.042	0.018	0.079
A2 vereinfacht	0.214	0.009	0.036	0.016	0.073
C2 original	0.394	0.014	0.037	0.021	0.054
C2 interpoliert	0.282	0.012	0.042	0.017	0.060
M08	0.188	0.010	0.054	0.016	0.086
M24	0.252	0.013	0.051	0.015	0.059
Akz	0.250	0.017	0.067	0.030	0.120
Amz	0.500	0.033	0.065	0.060	0.120
Fgy	1.350	0.083	0.061	0.150	0.111
Fky	0.600	0.022	0.037	0.030	0.050
Mmx	1.800	0.040	0.022	0.060	0.033
Z8VL	2.517	0.068	0.027	0.079	0.031
Z8VK	1.266	0.035	0.027	0.040	0.031
Z8HK	0.576	0.030	0.052	0.040	0.069
Z6VL	1.282	0.048	0.038	0.057	0.044
Z6VK	0.645	0.025	0.039	0.028	0.044
Z6HL	0.604	0.042	0.070	0.057	0.095
Z6HK	0.302	0.021	0.070	0.029	0.095
PS A4	0.227	0.026	0.115	0.033	0.146
PS A5	0.224	0.015	0.068	0.019	0.084

Tabelle 3.11: Übersicht über effektive Flächen (A_1 ist der Mittelwert der projizierten Oberfläche, A_2 die maximale Fläche) und Formfaktoren

Die Aufnahme der dreidimensionalen Trajektorien erfolgte, wie bereits beim Monitoring, mithilfe zweier synchron alle 0.5 s ausgelöster Kameras. Zusätzlich wurden Filmaufnahmen der fallenden Körper in Nahaufnahme gemacht, um Aussagen über das Rotationsverhalten machen zu können. Nach Abwurf aller vorhandenen Probekörper wurden deren Positionen am Boden mittels GPS bestimmt, die Probekörper wieder eingesammelt und je nach verbleibender Zeit alle oder einige davon wieder auf die WEA für weitere Abwürfe transportiert. Aufgrund der großen Mengen an Material und Ausrüstung musste der Transport auf die WEA mittels Servicelift außerhalb des Turms erfolgen.

3.4.3.1 Versuchstag 1

Die ersten Abwürfe erfolgten am 21.11.2016 im Windpark Neusiedl an der Anlage ND 14. Es konnten insgesamt drei Durchgänge mit dem Abwurf aller vorhandener Probekörper durchgeführt werden, was insgesamt 205 einzelne Probenwürfe ergibt.

Windmessungen erfolgten auf Nabenhöhe jeweils zum Zeitpunkt des Abwurfes, zuerst mittels eines mitgeführten Anemometers, später durch Aufzeichnung der Werte des Anlagenanemometers (10 s Mittelwerte). In beiden Fällen sind Störungen durch die Rotorblätter der Anlage möglich, die nicht eingebremst, aber aus dem Wind gedreht waren, also langsam und unregelmäßig drehten und dadurch zeitweise den Windsensor abschirmten. Die Position der Gondel war während der Abwürfe fixiert, sie wurde also nicht dem Wind nachgeführt. Zwischen den Durchgängen zwei und drei musste die Gondel der Anlage gedreht werden, da die Windrichtung soweit gedreht hatte, dass Kollisionen der Probekörper mit Anlagenteilen vorkamen und die Orientierung der Kameras zur Sonne ungünstig war.

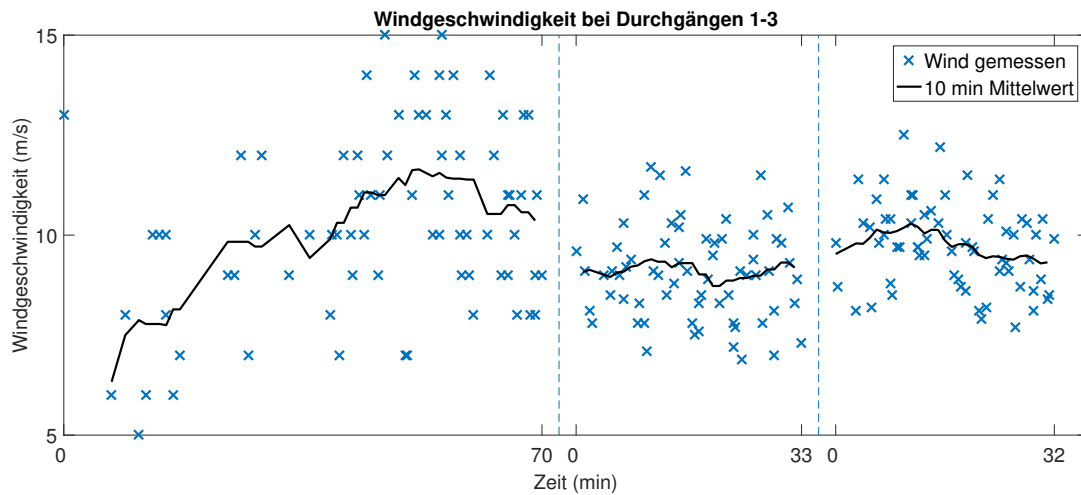


Abbildung 3.29: Gemessene Windgeschwindigkeit und -richtung während der drei durchgeführten Abwurfdurchgänge am Tag 1. Die strichlierte Linie markiert den zeitlichen Sprung zwischen zwei Durchgängen.



Abbildung 3.30: Kamerapositionen an Tag 1

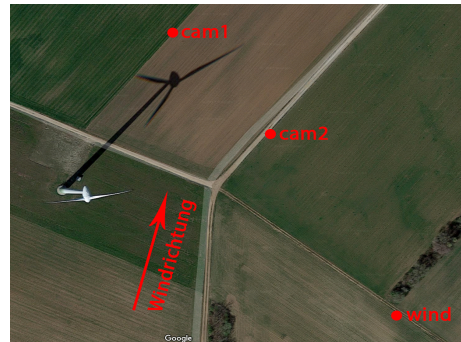


Abbildung 3.31: Kamerapositionen an Tag 2, bei „wind“ befindet sich der Windmessmast

Bei der Positionierung der Kameras wurde versucht, optimale Bedingungen für die spätere Auswertung der Trajektorien zu erreichen. Sie wurden in einem Abstand von ca. 170 m von der WEA mit einem Winkel zueinander von ca. 115° aufgebaut (siehe Abbildung 3.30). Vor dem dritten Durchgang wurde eine der Kameras verschoben, womit der Winkel auf 121° anstieg. Die Flugbahn der Probekörper lag zentral zwischen den beiden Kameras, womit eine gute Auflösung für Fallweite und Höhe erreicht wird, eine etwas schlechtere für Bewegung normal zur Windrichtung.

Die Betrachtung der Windgeschwindigkeit in Abbildung 3.29 zeigt, dass bei allen Durchgängen die Windbedingungen sehr unregelmäßig waren. Beim ersten Durchgang nimmt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit noch zu, bei den weiteren liegt sie im Mittel zwischen 9 m s^{-1} und 10 m s^{-1} . Die Turbulenz-Intensität beim ersten Durchgang beträgt dementsprechend 14%, beim zweiten und dritten 10%.

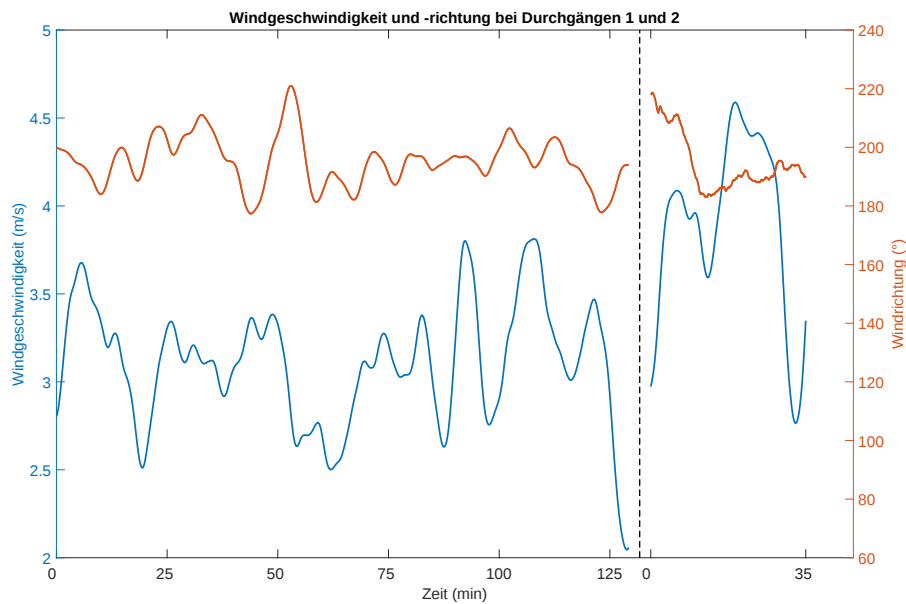


Abbildung 3.32: Gemessene Windgeschwindigkeit und -richtung, geglättet über 10 Minuten Intervalle, während der zwei durchgeführten Abwurfdurchgänge an Tag 2. Die gestrichelte Linie markiert den zeitlichen Sprung zwischen zwei Durchgängen.

3.4.3.2 Versuchstag 2

Die zweiten Abwürfe erfolgten am 30.05.2017 ebenfalls im Windpark Neusiedl an der Anlage ND 03. Es konnten ein Durchgang mit dem Abwurf aller Probekörper und ein weiterer mit ausgewählten wenigen Probekörpern durchgeführt werden, was insgesamt 275 einzelne Probenwürfe ergibt.

Aufgrund der Geländeverhältnisse konnten die Kameras nicht optimal positioniert werden, wodurch Kamera 1 fast in Windrichtung ausgerichtet ist und Kamera 2 sich in einem Winkel von 40° zur anderen Kamera befindet, wie in Abbildung 3.31 zu sehen ist. Die Windnachführung der WEA war während der Experimente aktiv, dadurch wechselte die Ausrichtung in der Durchführungszeit geringfügig. Die Auswirkung auf die Messungen kann als vernachlässigbar angenommen werden.

Die Windmessung wurde mit einem 2D-Ultraschall Windsensor mit einer zeitlichen Auflösung von 1 s durchgeführt, der auf einem 6 m Mast in 230 m Entfernung von der Anlage positioniert wurde. Die Position des Windsensors wurde vor Beginn der Experimente festgelegt. Da der Wind bis zur Durchführung deutlich drehte, ist die Ausrichtung nicht optimal zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit bei der WEA. Abbildung 3.32 zeigt die gemessene Windgeschwindigkeit und -richtung, gemittelt über 10 min Intervalle, und umgerechnet auf die Abwurfhöhe. Zur Umrechnung wurde ein logarithmisches Windprofil (siehe Abschnitt 2.1.2) angenommen mit einer Rauigkeitslänge von 0.03 m.

Ein Vergleich der Windgeschwindigkeiten an Tag 1 und Tag 2 ist in Abbildung 3.33 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die Windgeschwindigkeitsbereiche kaum überlappen.

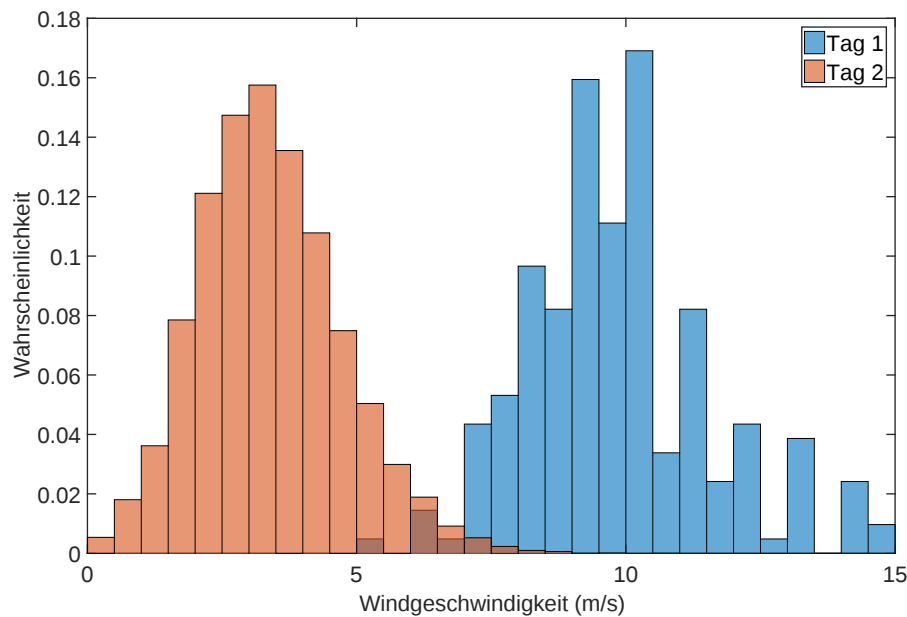


Abbildung 3.33: Windgeschwindigkeitsverteilungen an beiden Versuchstagen. Es ergeben sich mittlere Windgeschwindigkeiten von 3.4 m s^{-1} und 9.7 m s^{-1} .

3.4.4 Ergebnisse

Die Analyse der generierten Daten erfolgt soweit möglich analog zu den ersten Experimenten. Aus den zwei Tagen, an denen Experimente durchgeführt wurden, stehen einmal 205 und einmal 275 Probenpositionen am Boden zur Verfügung. Weiters wurde eine ebenso große Anzahl Videos generiert, von denen aber nur ein Teil tatsächlich auswertbar ist. Die Untersuchung dieser Daten geht den Fragen nach

- inwiefern eine Beschreibung der Verteilungen am Boden durch zweidimensionale Normalverteilungen möglich ist,
- wie sich die Windgeschwindigkeit auf die Fallweite auswirkt und
- welche Auswirkung die verschiedenen Variationen der Probekörper auf die Fallweite haben.

3.4.4.1 Beschreibung durch Normalverteilung

Zur Untersuchung der Eignung verschiedener üblicher Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der gefundenen räumlichen Verteilungen wurde zuerst ermittelt, inwiefern sich die zweidimensionale Verteilung durch Separation in zwei unabhängige Parameter beschreiben lässt. Dazu wurden die Daten nach Tagen, an denen die Experimente durchgeführt wurden, und Proben-typen gruppiert und für jede Gruppe der Korrelationskoeffizient und der zugehörige Signifi-kanzwert für die Darstellung in Polarkoordinaten (θ, ρ) und in kartesischen Koordinaten (x, y) berechnet. Zuvor wurde jeder Cluster um den Turmfuß so gedreht, dass der Schwerpunkt der Verteilung bei 0° liegt, sodass die Mittelwerte für θ und x jeweils 0 sind. Weiters wurden θ und x jeweils als Absolutwerte betrachtet, sodass sie der Abweichung von der 0° - bzw. y -Achse

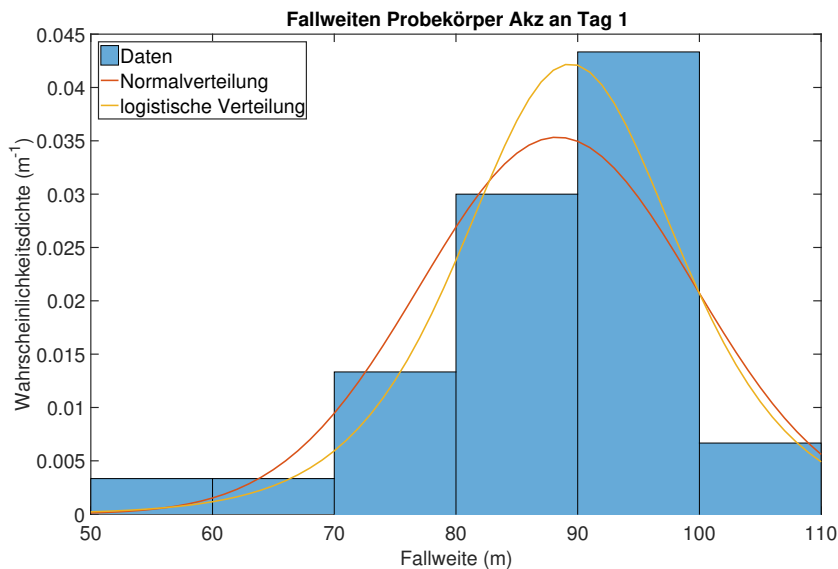


Abbildung 3.34: Vergleich von Normal- und logistischer Verteilung für Probekörpertyp Akz an Tag 1. Obwohl qualitativ eine logistische Verteilung angemessener erscheint, ist die Übereinstimmung nicht messbar besser.

entsprechen. Von 25 gebildeten Clustern zeigten nur 5 eine signifikante Korrelation zwischen θ und ρ . In diesen fünf Fällen nimmt die Breite der Verteilung mit dem Radius ab. Bei der Betrachtung in kartesischen Koordinaten finden sich 4 signifikanten Korrelationen, zwei positiv und zwei negativ. Ein Überblick über alle 25 Cluster findet sich im Anhang in Tabelle 8.2.

Zur weiteren Untersuchung wurde ein χ^2 -Test der Anpassungsgüte für Normalverteilung, Extremwertverteilung, logistische Verteilung und Weibull Verteilung für die Darstellung in Polarkoordinaten durchgeführt. Die genauen Ergebnisse dieser Auswertung finden sich im Anhang in Tabelle 8.3. Hierbei zeigte sich, dass die Extremwertverteilung und Weibull-Verteilung vergleichsweise schlechter zur Anpassung geeignet sind und die logistische Verteilungsfunktion geringfügig besser abschneidet als die Normalverteilung. Es wurde ein Signifikanzniveau von 0.05 gewählt - bei diesem können mit der logistischen wie mit der Normalverteilung 17 der 25 Cluster für ρ und 16 der 27 für θ beschrieben werden. Weitere Unterschiede zeigen sich in der Güte der Anpassung, im Mittel ist hier die Differenz jedoch auch gering. Abbildung 3.34 zeigt einen der Fälle bei denen der Unterschied zwischen logistischer Verteilung und Normalverteilung am stärksten ausgeprägt ist. Aufgrund der für diese Art von Vergleichen geringen Stichprobenzahl ist der Qualitätsgewinn durch Verwendung der logistischen Verteilung fraglich, insbesondere da keine physikalisch nachvollziehbare Begründung für einen Vorteil dieser Verteilung gegenüber anderen besteht. Daher wird für die weiteren Untersuchungen die zweidimensionale Normalverteilung über die Polarkoordinaten zur Darstellung der räumlichen Verteilungen gewählt.

Wie bereits in Abschnitt 3.1 gezeigt, bietet sich für vergleichende Abbildungen die Berechnung von Isolinien der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion an. Durch die Wahl der Wahrscheinlichkeitsdichte wird die Darstellung unabhängig von der Anzahl der untersuchten Probekörper und durch die vorherige Normierung der Schwerpunktposition ist ein direkter Vergleich, unabhängig von der zum Zeitpunkt der Untersuchungen vorherrschenden Windrichtung, möglich. In allen folgenden Abbildungen sind die Isolinien bei 0.005 und 0.01 eingezeichnet, sofern nicht anders

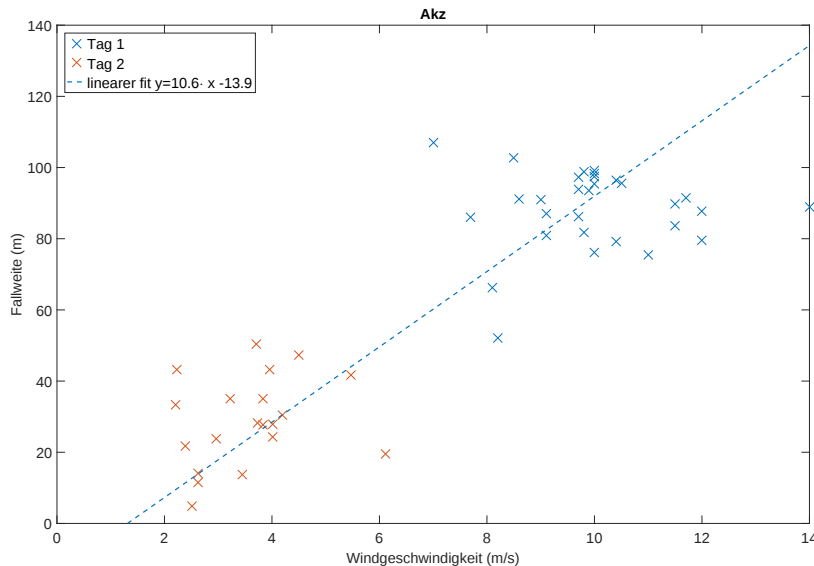


Abbildung 3.35: Ein linearer Zusammenhang zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit kann für den Probekörpertyp Akz bei Betrachtung beider Versuchstage festgestellt werden, für individuelle Versuchstage ergibt sich kein Zusammenhang.

beschrieben.

Auch zur Nutzung in weiteren Risiko-Untersuchungen ist die Wahrscheinlichkeitsdichte gut geeignet, da sie integriert über eine gewählte Fläche die Wahrscheinlichkeit dafür liefert, dass ein abgeworfener Probekörper, bzw. ein fallendes Eisfragment, in diesem Bereich landet.

3.4.4.2 Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Es wurde eine Überprüfung des Einflusses der Windgeschwindigkeit auf die Fallweiten vorgenommen. Hierzu wurde für jeden Probentyp die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Fallweiten berechnet, sowohl insgesamt als auch für die einzelnen Durchgänge bzw. Tage. Diese Untersuchung wurde auf Probekörper beschränkt, von denen zumindest sechs Positionen am Boden pro Untersuchungstag zur Verfügung standen und die an beiden Tagen benutzt wurden. Tabelle 3.12 zeigt die Korrelationen, wobei jene, die klar positiv korreliert sind ($\rho > 0.3$), fett hervorgehoben wurden. Sowohl für die einzelnen Durchgänge als auch für die Tage separat betrachtet, ist keine klare Korrelation zwischen Windstärke und Fallweite feststellbar. Mehrfach ergibt sich sogar eine negative Korrelation, was physikalisch unsinnig ist. Auffällig ist, dass bei Durchgang 3 am Tag 1 vier der sechs Probekörper positive Korrelationskoeffizienten aufweisen. Dies steht möglicherweise in Zusammenhang mit den vergleichsweise ruhigen Windverhältnissen während dieses Durchgangs und der Kürze des Durchgangs selbst (dies lässt weniger Zeit für Änderung der Windverhältnisse). Bei Berechnung der Korrelation über beide Untersuchungstage entsteht eine klare Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Fallweiten (siehe 3.35).

Diese Daten zeigen zusätzlich, dass die Variation von Fallweite und Windgeschwindigkeit innerhalb kurzer Zeit vergleichsweise groß ist. Einerseits stellt dies eine Einschränkung bei der Entwicklung eines Modells für den Zusammenhang dieser beiden Größen dar, da mit den momentan verfügbaren Daten nicht zwischen einem linearen und einem komplexeren Zusammen-

Typ	N_1	N_2	$\rho_{1,1}$	$\rho_{1,2}$	$\rho_{1,3}$	ρ_1	ρ_2	ρ_{tot}
Akz	30	20	-0.53	0.24	0.49	0.01	0.27	0.87
Amz	29	23	0.27	-0.46	-0.08	0.03	-0.13	0.71
C2	15	7	0.52	0.37	0.25	0.26	0.51	0.88
C2Loft	13	17	-0.69	0.53	0.58	0.25	0.14	0.84
PS A4	26	21	0.52	-0.20	0.75	0.41	0.48	0.87
PS A5	19	20	0.45	-0.40	0.40	-0.16	0.35	0.71

Tabelle 3.12: Übersicht über die Korrelation zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit für an beiden Tagen abgeworfene Probekörpertypen mit $N > 5$.

Negative Korrelationskoeffizienten werden kursiv dargestellt, positive > 0.3 fett gedruckt

$N_m \dots$ Anzahl Probekörperpositionen an Tag m , $\rho_{tot} \dots$ Korrelation für alle Tage, $\rho_m \dots$ Korrelation für Tag m , $\rho_{m,n} \dots$ Korrelation für Tag m Durchgang n

hang unterschieden werden kann. Daher muss vorläufig eine lineare Abhängigkeit von Fallweite und Windgeschwindigkeit angenommen werden. Andererseits ist dieser Umstand von Relevanz für Sicherheitsbetrachtungen, da unabhängig von der Art der Vereisung mit großer Streuung bei der Eisfragmentverteilung aufgrund der Windgeschwindigkeitsvariationen zu rechnen ist.

3.4.4.3 Verteilungen

Abbildung 3.36 zeigt einen Vergleich der Verteilungsmuster der Probekörper Akz und PS A5 an Tag 1 der Experimente. In der Abbildung sind sowohl die individuellen Positionen der Fragmente als auch die überlagerten Isolinien der zweidimensionalen Normalverteilungen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Näherung durch die Normalverteilung die Fragmentpositionen bis auf wenige Ausreißer gut abbildet. Der direkte Vergleich zeigt, dass die gebogenen Probekörper, bei ähnlicher Masse und ähnlichen Dimensionen, deutlich geringere Distanzen zurücklegen, was auf die zusätzliche Turbulenz bzw. kleinere effektive Fläche zurückzuführen ist. Demgegenüber zeigt Abbildung 3.37, dass die Verteilungen der Probekörper Amz und PS A4, also die jeweils etwa doppelt so großen Pendants der oben genannten, sehr nahe aufeinanderliegen. Dies lässt sich wiederum auf die fertigungsbedingt doppelt so hohe Masse der Amz gegenüber den PS A4 erklären. Dies spiegelt sich nur begrenzt in der Beschreibung durch Formfaktoren wider. Diese sollten für fallende Probekörper grob proportional der Fallweite bei gleicher Windgeschwindigkeit sein. Die Formfaktoren für Akz und Amz sind mit $0.065 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ bzw. $0.067 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ praktisch gleich und es zeigt sich dass der Schwerpunkt der Verteilungen auch vergleichbar ist. Der Probekörper PS A5 hat einen ähnlichen Formfaktor von $0.056 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ und zeigt kürzere Fallweiten, was zumindest schwache Übereinstimmung mit der Theorie bedeutet. Jener von PS A4 ist mit $0.11 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ fast doppelt so groß, während die Fallweiten von Amz und PS A4 sehr ähnlich sind - hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zur Theorie. Dies wiederum lässt sich damit erklären, dass die ballistischen Modelle, die Formfaktoren benutzen, von würfelförmigen, also kompakten Eisfragmenten und nicht von plattenförmigen ausgehen.

Der Vergleich der Probekörper C2 mit ihrer vereinfachten Variante in Abbildung 3.38 zeigt analog zum Vergleich der flachen Platten (Akz und Amz) mit den gebogenen (PS A5 und PS A4) in Abbildung 3.36 und Abbildung 3.37, dass die vereinfachten Probekörper größere Fallweiten aufweisen. Allerdings ist die Masse der vereinfachten Probekörper um 28% geringer als jene der naturnahen, was in jedem Fall größere Fallweiten bewirkt. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten ist bei diesen Probekörpern eine starke Verzerrung der Verteilungen zu erkennen. Dies

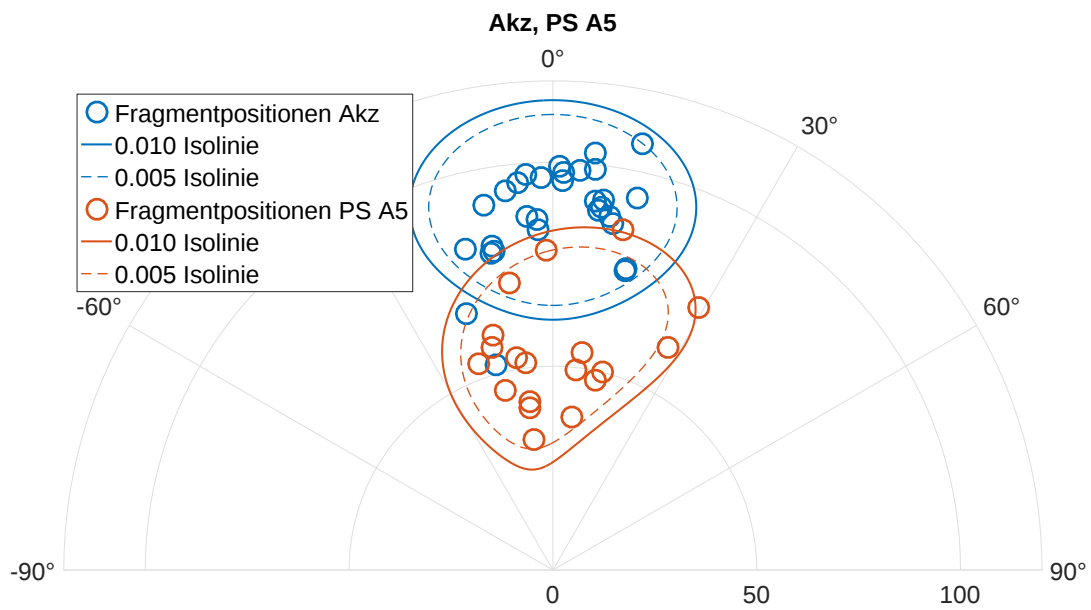


Abbildung 3.36: Vergleich der Verteilungen der flachen Akz Probekörper mit den gebogenen PS A5 an Tag 1. Flache Probekörper erreichen bei gleichen Bedingungen höhere Fallweiten.

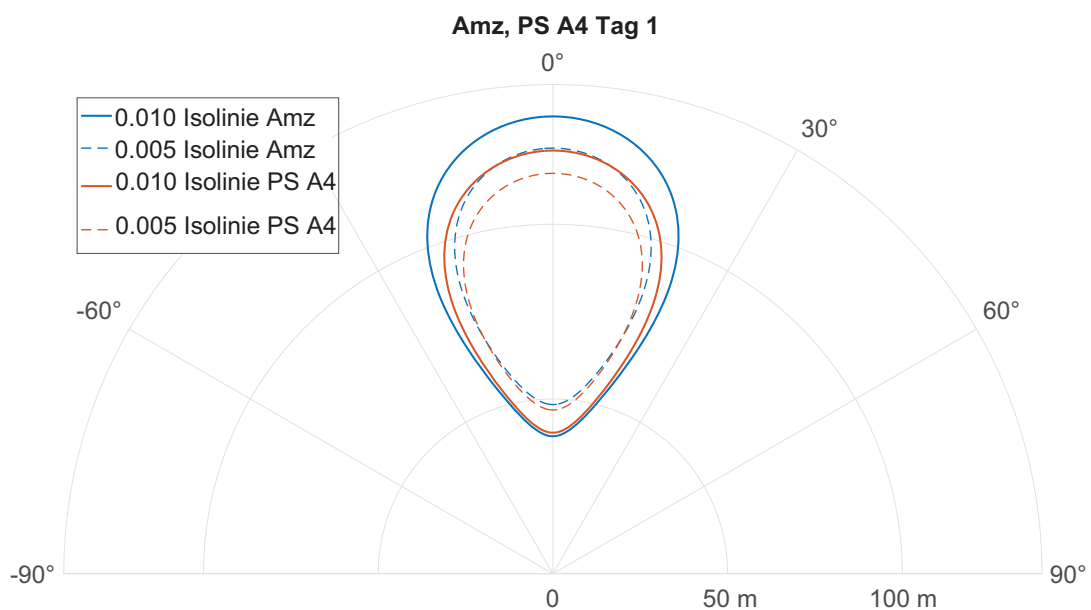


Abbildung 3.37: Angepasste zweidimensionale Normalverteilung für die Probekörpertypen Amz und PS A4. Die Reduktion der Fallweite durch die Krümmung der PS A4 wird durch die höhere Masse der Amz teilweise kompensiert.

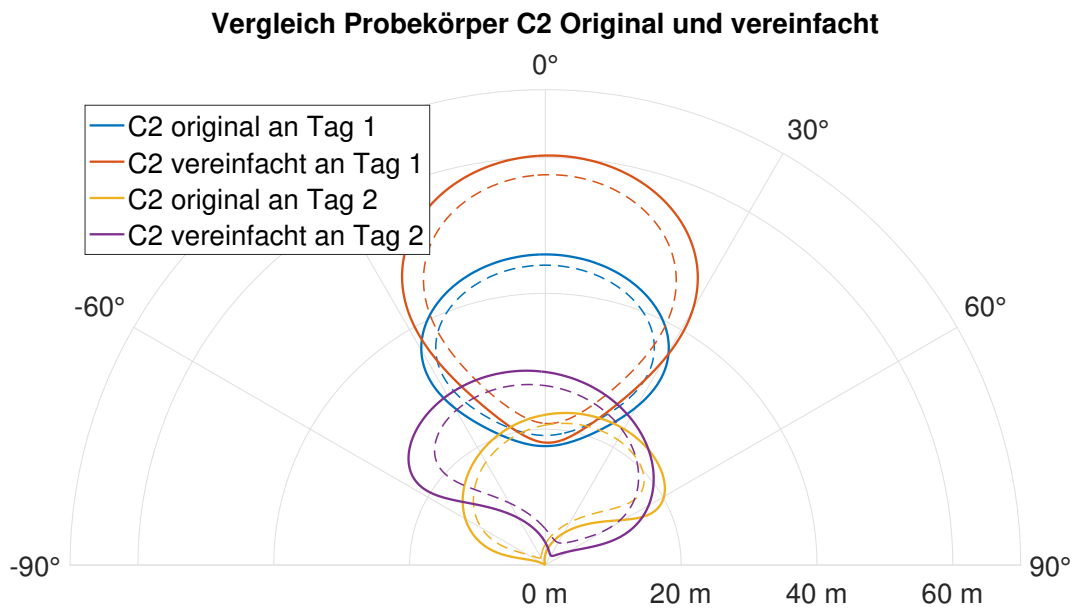


Abbildung 3.38: Vergleich der Verteilungen der Probekörper des Typs C2 mit ihrer vereinfachten Variante an beiden Versuchstagen.

ist möglicherweise auf eine starke Änderung der Windrichtung während der Versuche oder auf Turbulenzen hinter der WEA zurückzuführen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für zylindrische Probekörper in Abbildung 3.39 ist zu erkennen, dass keine großen Fallweiten erreicht werden. Jedoch ist zu sehen, dass vor allem leichtere Probekörper sehr hohe Streuung zeigen. Der Schwerpunkt der Fallweiten der kleinsten eingesetzten zylindrischen Probekörper, 6 cm durchmessende Halbzylinder mit einer Länge von 50 cm, fällt bei einer Windgeschwindigkeit von $3.2 \pm 1.0 \text{ m s}^{-1}$ nahe 15 m, die größten Fallweiten liegen jedoch bei 40 m. Während bei den 6 cm-Durchmesser Zylinder der Median der Fallweite kaum variiert, ist die Streuung der Halbzylinder wesentlich größer, als jene der Vollzylinder. Bei Analyse der Videos zeigt sich, dass das Fallverhalten der halbierten Zylinder wesentlich unregelmäßiger ist und zwischen geradem Fall, Flattern und Rotation wechselt. Bei Vollzylindern ist der Einfluss der Oberfläche größer als jener der Masse, da sich die Fallweiten bei gleichem Durchmesser wenig unterscheiden, die Streuung aber bei längeren Zylindern wesentlich größer ist. Besonders fallen unter allen zylindrischen Probekörpern die Z8HK, also Halbzylinder mit 8 cm Durchmesser und 50 cm Länge auf. Diese erreichen mit Abstand die größten Fallweiten, obwohl sie die etwa doppelte Masse und ca. 30% größere Oberfläche besitzen als die ähnlichen Z6HK. Wesentlich für Sicherheitsüberlegungen ist hier, dass Probekörper, die realen Eisstücken näher kommen, in diesem Fall die Halbzylinder, wesentlich größere Streuung aufweisen und Ausreißer sehr hohe Fallweiten erreichen können.

3.4.4.4 Trajektorien

Für den Versuchstag 1 konnten von 199 aufgenommen Trajektorien 72 erfolgreich ausgewertet werden. In den verbleibenden Fällen konnten keine ausreichende Anzahl korrespondierender Punktpaare identifiziert werden, um eine aussagekräftige Rekonstruktion der Trajektorie durchzuführen. Aufgrund schlechter Bildqualität konnten die Trajektorien für den zweiten Un-

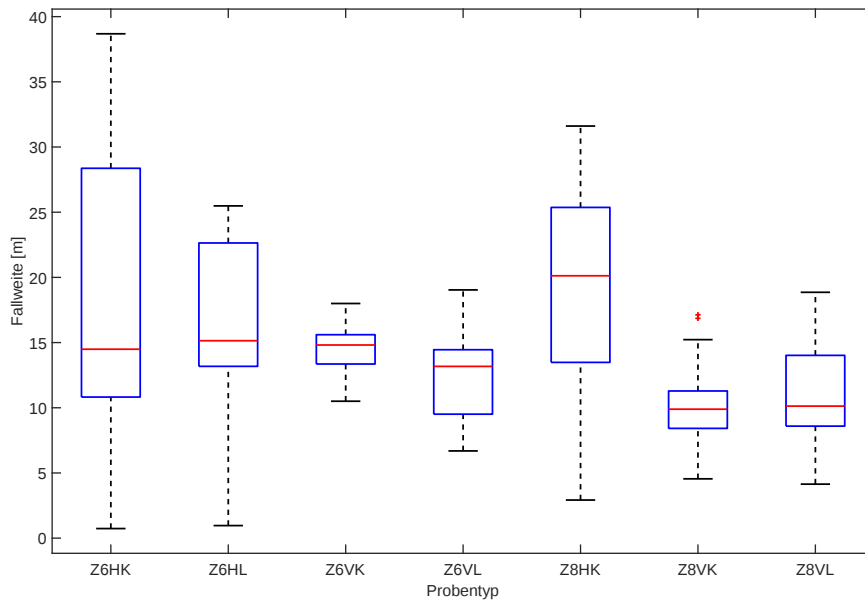


Abbildung 3.39: Fallweiten zylindrischer Probekörper bei Windgeschwindigkeiten von $3.2 \pm 1.0 \text{ m s}^{-1}$. Besonders auffällig ist die große Fallweite der 50 cm langen, 8 cm durchmessenden Halbzylinder, die mit einfachen Modellen nicht erklärt werden kann.

tersuchungstag nicht ausgewertet werden.

Mehrere Punkte sind im Vergleich mit Modellaussagen besonders bedeutend. Bei Betrachtung der Flugbahn in der X-Y-Ebene, also unter Auslassung der Höheninformation, zeigt sich, dass die untersuchten Probekörper in den meisten Fällen gekrümmte Flugbahnen beschreiben (siehe z.B. Abbildung 3.40). Während bei Eiswurf eine gekrümmte Bahn zu erwarten ist, da die Initialgeschwindigkeit normal zur Windgeschwindigkeit gerichtet ist, ist im Fall von Eiswurf eine lineare Bewegung anzunehmen. Der Vergleich der einzelnen Flugbahnen zeigt keine klare Bevorzugung eines bestimmten Grades der Krümmung oder einer bestimmten Krümmungsrichtung der Kurve. Dies schließt einen systematischen Einfluss, z.B. durch den Windschatten des WEA-Turmes aus. Die Ablenkung eines Probekörpers verlangt, dass Kräfte auf diesen wirken, die seine Flugbahn destabilisieren und damit zu einer taumelnden Bewegung führen sollten. Dies ist insbesondere bei plattenförmigen Proben zu erwarten, da diese im Verhältnis zur angegriffenen Fläche eine geringe Trägheit besitzen. Unter den verschiedenen untersuchten Probekörpertypen ist zu erkennen, dass plattenförmige eher zu gekrümmten Flugbahnen führen, jedoch konnten die Trajektorien von kompakten Körpern nur in 7 Fällen rekonstruiert werden. Dies ist unter anderem auf deren geringere Fallzeit und Fallweite zurückzuführen.

Die Krümmung der Flugbahn lässt sich durch die Angabe der Änderung des Polarwinkels θ mit der radialen Entfernung R in Polarkoordinaten gut darstellen (siehe Abbildung 3.41). Hierbei ist in vielen Fällen ein näherungsweise linearer Zusammenhang, entsprechend einer Spiralbahn, feststellbar. Eine weitere große Zahl an Flugbahnen weist erst eine starke Änderung des Raumwinkels auf, gefolgt von einer Stabilisierung auf einer linearen Bahn, also konstantem Winkel.

Für Sicherheitsüberlegungen besonders bedeutend ist die Veränderung der Höhe mit der Fallweite, da daraus geschlossen werden kann, ob Fallweiten mit der Fallhöhe linear zunehmen. Dazu wurde die Höhe zum radialen Abstand aufgetragen, sowie der Abstand des Fundortes

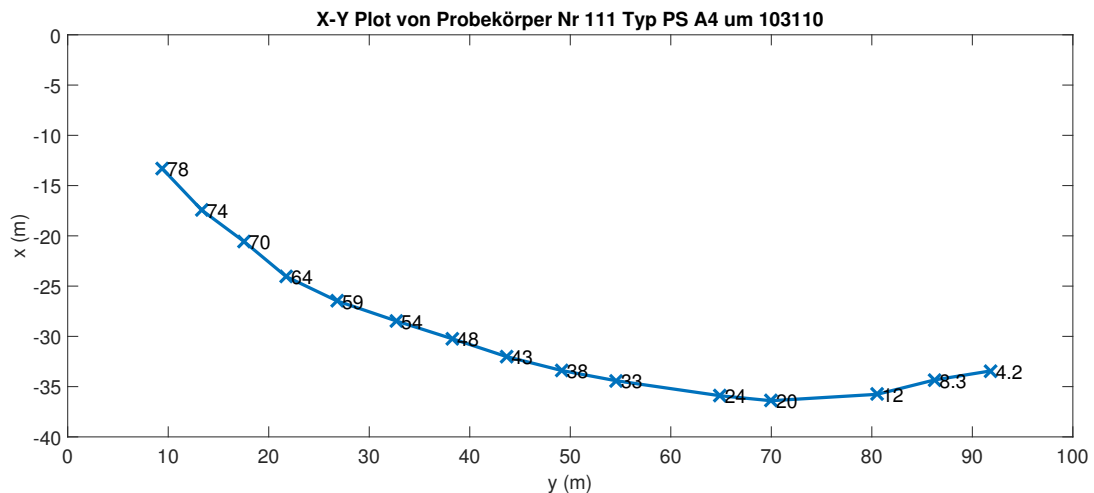


Abbildung 3.40: Beispiel für eine gekrümmte Probekörper-Flugbahn. Kreuze markieren Messpunkte, die verbindende Linie dient der Orientierung. Die Zahlen neben den Messpunkten geben die Höhe relativ zum Turmfuß wieder.

des zugehörigen Fragments vom Turm. Die aus der stereofotogrammetrischen Rekonstruktion stammenden Punkte wurden linear und mit einem Polynom dritter Ordnung angenähert (siehe Abbildung 3.42). Letzteres wurde gewählt um zwei Wechsel der Flugbahnkrümmung zuzulassen und zumindest in den meisten Fällen einen Punkt mit $z = 0$, also einen Schnittpunkt mit dem Boden, zu erreichen. Von den 72 untersuchten Flugbahnen wurden 69 qualitativ besser mit dem Polynom dritter Ordnung angenähert, in drei Fällen war kein Qualitätsunterschied zur linearen Näherung gegeben. Beim Vergleich zwischen gemessenen und mithilfe der Annäherungen extrapolierten Auftreffpunkten der Fragmente zeigt sich, dass in drei Vierteln der untersuchten Fälle die Extrapolation mit dem Polynom dritter Ordnung innerhalb von $\pm 10\%$ der Messung befindet, in zwei Dritteln der Fälle trifft dies auf die lineare Näherung zu. Im direkten Vergleich zeigt sich, dass in 14 Fällen die Extrapolation mit dem Polynom dritter Ordnung deutlich bessere Ergebnisse liefert, in 12 Fällen die lineare Näherung, und in den verbleibenden 46 Fällen der Unterschied bei unter fünf Prozentpunkten liegt. Bei letzteren liegt bei 4 Fällen die lineare Näherung außerhalb der 10% Grenze, womit die andere Näherungsvariante vorzuziehen ist. Zusammenfassend liefert also für 25% der betrachteten Flugbahnen eine Näherung mit Polynom dritter Ordnung eine Extrapolation des Auftreffpunkts innerhalb von $\pm 10\%$ und ist deutlich besser als die Näherung mit linearer Extrapolation. Umgekehrt ist in 75% der Fälle die lineare Extrapolation besser oder gleich gut. Für den Vergleich mit simplen Näherungen wie der Seifert-Formel lässt sich daraus ableiten, dass ein linearer Zusammenhang für den Großteil der betrachteten Fälle näherungsweise genutzt werden kann, jedoch nicht alle Situationen damit ausreichend beschrieben werden.

Weiters ist die Bestimmung der Endgeschwindigkeit, also der Geschwindigkeit des Probekörpers beim Aufprall auf dem Boden, von wesentlicher Bedeutung. Zur Bestimmung dieser Werte wurden die Differenzen der Positionen der einzelnen Punkte der Trajektorien berechnet und durch den Zeitabstand der zugrundeliegenden Einzelbilder dividiert. Die resultierenden Werte sind akzeptable Näherungen für die Geschwindigkeit zu den Zeitpunkten zwischen zwei Einzelbildern. Der letzte Wert dieser Reihen ist besonders anfällig für Fehler; einerseits nimmt die Bestimmungsgenauigkeit der Position mit der Höhe ab und andererseits kann bei jenen Serien,

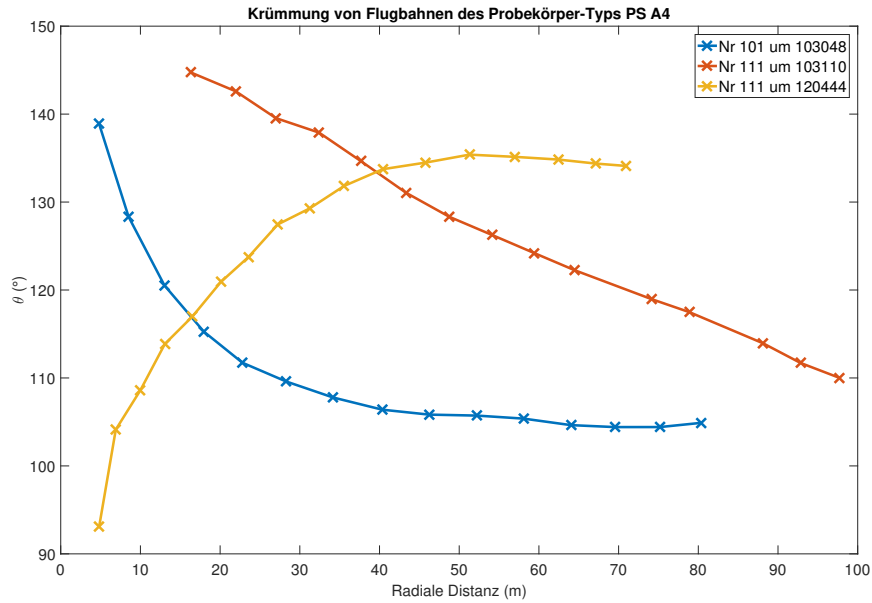


Abbildung 3.41: Beispiel für die Änderung des Raumwinkels θ mit der radialen Distanz: alle Probekörper sind vom Typ PS A4, zeigen aber gänzlich unterschiedliches Verhalten.

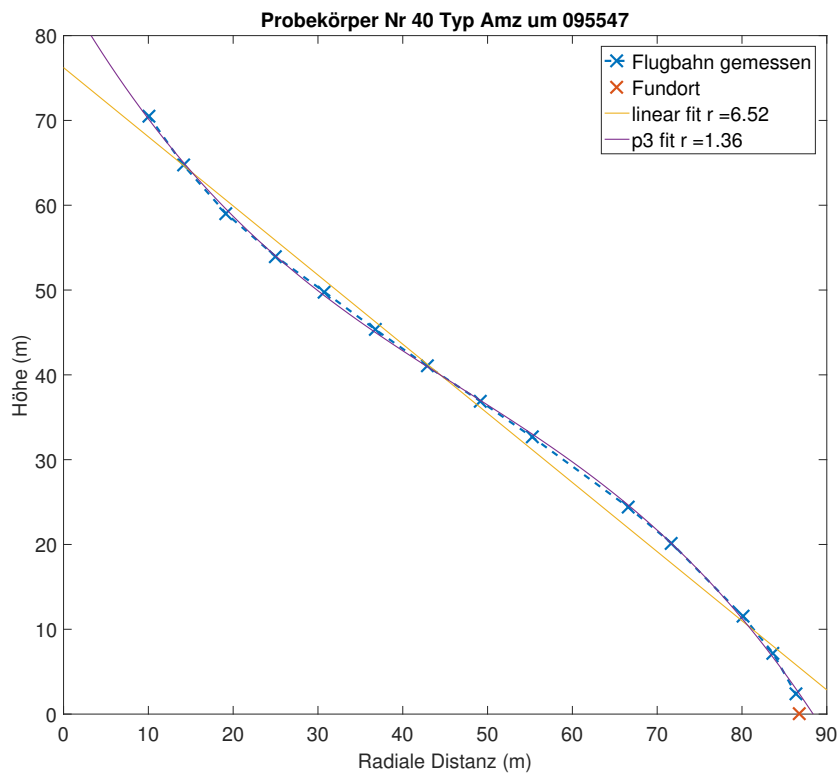


Abbildung 3.42: Beispiel für die Veränderung der Höhe mit dem radialen Abstand, sowie die lineare Näherung und Näherung mit Polygon dritter Ordnung im Vergleich - letzteres beschreibt die Daten deutlich besser.

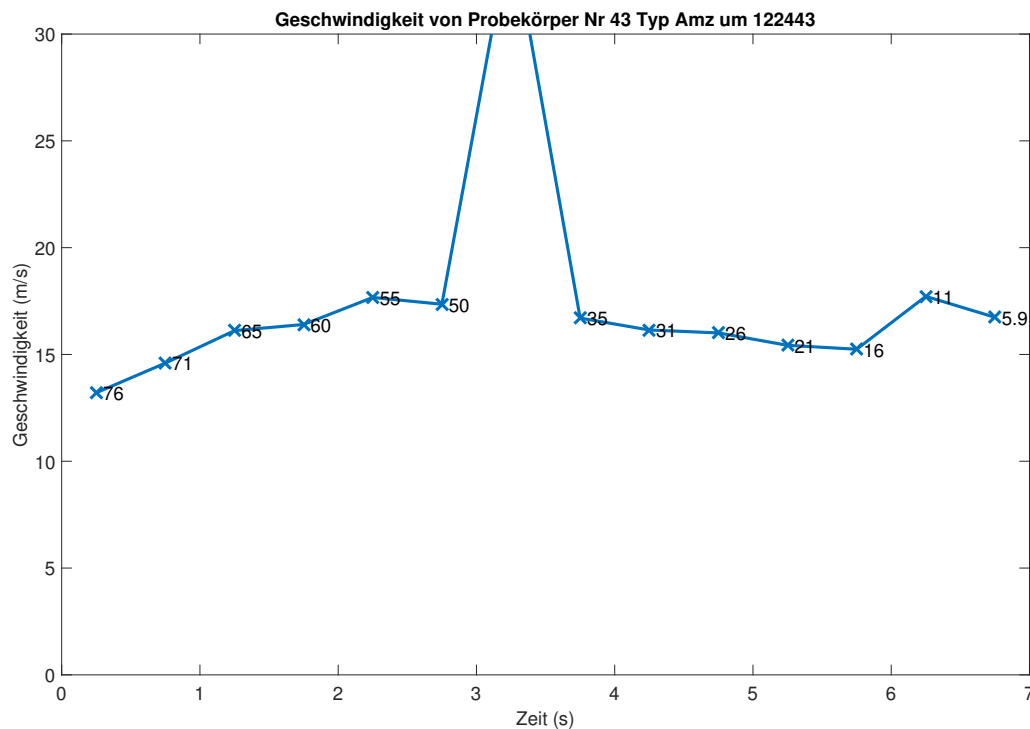


Abbildung 3.43: Beispiel für die Geschwindigkeit eines Probekörpers. Zahlen neben den Markierungen geben die Höhe an. Ein einzelner Messfehler bei ca 3.5 s ist erkennbar, sowie die Unsicherheit bei geringen Höhen (an den letzten zwei Messwerten abzulesen).

bei denen der Aufprall aufgenommen wurde, der Zeitraum zwischen Aufprall und Aufnahme nicht exakt bestimmt werden. Weiters können einzelne Werte durch fehlerhafte Bestimmung der Bildpunkte zum Teil stark abweichen. Während sich dies in den meisten Fällen durch die Verwendung von Näherungen und Mittelwerten bzw. die qualitative Betrachtungsweise nicht auswirkt, können die Werte für die Endgeschwindigkeit durch solche Fehler stark schwanken. Daher wurde entschieden, zur Bestimmung der Endgeschwindigkeit den Mittelwert der vorletzten drei Werte der Geschwindigkeit heranzuziehen. Abbildung 3.43 zeigt beispielhaft die Geschwindigkeit eines Probekörpers mit der Zeit, Abbildung 3.44 einen Vergleich der gemessenen Endgeschwindigkeiten. Zweitere Abbildung zeigt, dass die Endgeschwindigkeit abhängig vom Probekörpertyp stark unterschiedlich ist. Ein Vergleich mit den Formfaktoren in Tabelle 3.11 impliziert eine umgekehrte Relation zwischen Formfaktor und Endgeschwindigkeit. Insgesamt wurden bei 26 von 71 dafür auswertbaren Flugbahnen Endgeschwindigkeiten über 20 m s^{-1} gemessen, die höchste lag bei 23 m s^{-1} , die niedrigste bei 11 m s^{-1} .

3.5 Unterschiede Groß- und Kleinwindkraft

Nach der DIN Norm 61400-2 (DIN EN 61400-2, 2015) sind Kleinwindenergieanlagen definiert mit einer Rotorfläche unter 200 m^2 und einer installierten Leistung von unter 50 kW . Praktisch ist eine Ausdehnung auf bis zu 100 kW sinnvoll, da bis zu diesem Bereich WEA in größerem Umfang gehandelt werden. Dieser weite Bereich verlangt wiederum nach einer Unterscheidung in Unterbereiche, da die Anforderungen und technischen Ausführungen der Turbine je nach Größe

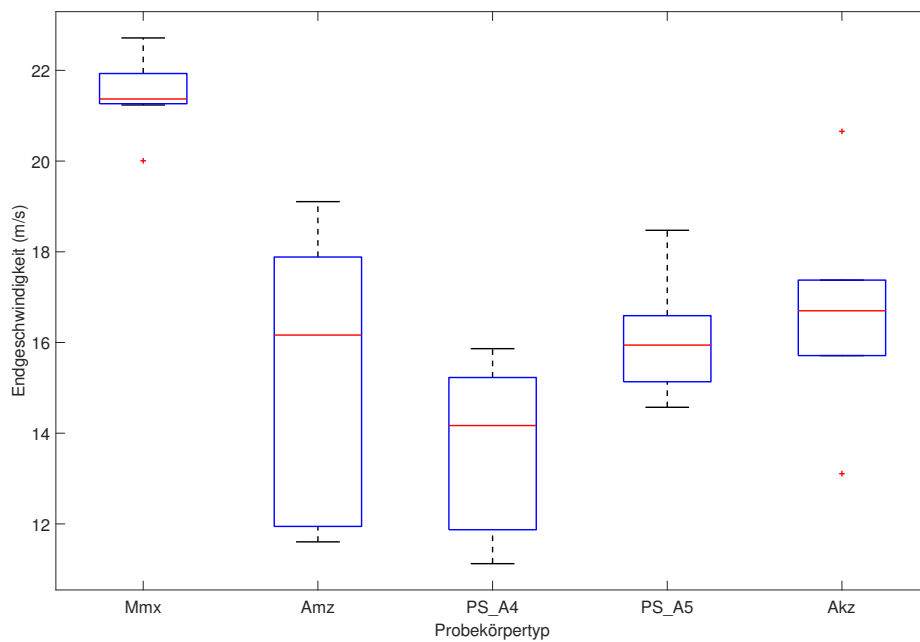


Abbildung 3.44: Vergleich der Endgeschwindigkeiten verschiedener Probekörpertypen. Sie variieren stark nach Probekörpertyp.

stark variieren. Ab einer Leistung von ca. 10 kW gleichen Kleinwindenergieanlagen (KWEA) technisch Großwindenergieanlagen (GWEA) und verfügen über ähnliche technische Sicherheitseinrichtungen. Dies bedeutet, dass die Anlagen mit Eisdetektionssystemen ausgestattet werden und eine Abschaltung bei Eisansatz möglich ist. Daher ist auch die Sicherheitsbetrachtung hinsichtlich Eiswurf und Eisfall ähnlich der bei GWEA. Praktische Unterschiede entstehen allerdings durch die meist wesentliche andere Standortwahl. Anlagen im 10 kW bis 100 kW Bereich sind beliebt für den Einsatz im Industrie- und Gewerbegebiet, da vergleichsweise hohe Anschlussleistungen zur Verfügung stehen und grundlegende Sicherheitsmaßnahmen wie z.B. Schutz vor Betreten der Umgebung durch Unbefugte gegeben sind.

Kleinere Anlagen werden aus ökonomischen Gründen meist mit dem Minimum an Sicherheitssystemen betrieben. Bei den meisten Anlagen liegt deshalb eine elektrische Bremse durch Generatorkurzschluss zur Verhinderung von Überdrehzahl vor. Ein Grund für die Beschränkung auf dieses Bremssystem ist das Fehlen eines Pitch-Systems, das ein Anpassen an die Windgeschwindigkeit erlauben würde. Dadurch liegen auch keine Detektoren zum Feststellen von Eisansatz oder Unwucht vor, weswegen bei Kleinwindenergieanlagen immer mit Eiswurf zu rechnen ist. Daher ist die Standortwahl bei KWEA für Sicherheitsbetrachtungen von sehr großer Bedeutung.

Eine beliebte Variante ist das Aufstellen auf Masten in der Nähe von Gebäuden im ruralen Raum. 10 m bis 20 m hohe Masten stellen eine kostengünstige und effektive Methode zum Erreichen akzeptabler Montagehöhen dar. Eine andere Möglichkeit ist die Montage auf Gebäudedächern, die neben der Nutzung der Gebäudehöhe, auch die Verwendung der vorhandenen elektrischen Anschlüsse ermöglicht. Gerade letztere Variante verdient besondere Betrachtung in Bezug auf die Gefährdung von Personen, da hier große Nähe sowohl zu den direkten Nut-

zern, z.B. durch Terrassen, Balkons, Anbauten etc., als ggf. auch zu unbeteiligten Passanten gegeben ist.

Durch die vergleichsweise geringe Montagehöhe der Anlagen liegen auch geringere Fallhöhen und damit auch Fallweiten vor. Weiters ist die Rotorblattfläche von KWEA um Größenordnungen kleiner als die von GWEA, wodurch auch die Menge des angesetzten Eises wesentlich geringer ist. Andererseits reichen auch bei weitem geringere Massen der Eisfragmente aus, um risikorelevante Größen zu erreichen, da durch die Schleuderbewegung höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, und die Zeit bis zum Aufprall oft zu kurz ist, um eine wesentliche Abbremsung durch den Luftwiderstand zu erreichen.

Eine wesentliche Herausforderung bei Sicherheitsanalysen von KWEA stellt die Heterogenität der Anlagendesigns dar. Im Gegensatz zu GWEA existiert neben Anlagen mit horizontaler Rotationsachse, sogenannten Horizontalläufern, eine Vielzahl von Designs mit vertikaler Rotationsachse.

Vertikalläufer haben den wesentlichen Vorteil der Windrichtungsunabhängigkeit, womit sie zumindest theoretisch bei böigem Wind bessere Ergebnisse liefern sollten. Unabhängig davon sind geringere Drehzahlen und damit eine geringere Geräuschbelastung möglich. Nachteilig ist vor allem das bedeutend schlechtere Verhältnis von Erntefläche, also jener Fläche, in der dem Wind Energie entzogen wird, zu Materialaufwand bzw. Gewicht. Abgesehen von den wirtschaftlichen Nachteilen führt die höhere Masse zu stärkeren Vibrationen dieser Anlagen, die im Falle der Montage auf Gebäuden auch auf diese übertragen werden. Dies wiederum führt zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Wohnqualität, bzw. kann die Gebäudestruktur schädigen.

Bei Horizontalläufern überwiegen zwar die Designs mit drei Rotorblättern, jedoch sind auch Anlagen mit einem bis zu sechs oder mehr Rotorblättern im Einsatz. Vorteil einer höheren Blattzahl ist vor allem das höhere Drehmoment beim Anlaufen der Anlage sowie die niedrigere Umdrehungsgeschwindigkeit. Nachteilig sind höherer Materialeinsatz und damit höheres Gewicht und Produktionskosten. Bei einer niedrigen Blattzahl ist vor allem die höhere Geräuschentwicklung durch Geschwindigkeit und Schwingungen problematisch.

3.6 Eiswurf bei Kleinwindenergieanlagen

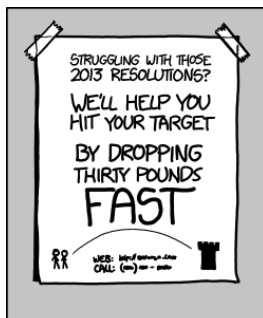
Da Eiswurf bei Kleinwindenergieanlagen meist aus ökonomischen Gründen in Kauf genommen werden muss, ist eine Untersuchung der möglichen Wurfweiten sicherheitsrelevanter Eisstücke von großer Bedeutung, insbesondere für den Einsatz von KWEA im urbanen Gebiet. Da bei Eiswurf im Moment der Ablösung eines Eisstückes potenziell eine hohe Anfangsgeschwindigkeit besteht, sind auch kleinere Eisstücke als relevant einzustufen. Weiters ist bei Sicherheitsüberlegungen zu berücksichtigen, dass auch stärker gefährdete Personengruppen wie z.B. Kinder eine höhere Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Gefährdungsbereich aufweisen können, als dies bei Großwindenergieanlagen der Fall ist. Deshalb erscheint es sinnvoll, die Grenze für relevante Stücke konservativ auf 30 J abzusenken. Ausgehend von dieser Überlegung lassen sich Gewichtsgrenzen definieren, die stark abhängig von der Rotorblattspitzengeschwindigkeit der untersuchten Anlagen sind. Da bei Vereisung das Erreichen der Maximaldrehzahl einer Anlage durch die verschlechterte Aerodynamik der Rotorblätter praktisch auszuschließen ist und die Eisfragmente durch den Luftwiderstand nach dem Wurf abgebremst werden, werden 50% der Maximaldrehzahl als konservative obere Grenze gewählt. Tabelle 3.13 gibt eine Übersicht über

Anlage	Maximaldrehzahl [rpm]	Rotorradius [m]	Blattspitzengeschwindigkeit [m/s]
Easywind	124	3.00	39
Schachner	240	2.80	70
FU Wind Sky	1500	0.75	118
Black 300	1000	0.61	64
Amperius VK 58	300	1.25	39
Amperius VK 250	150	2.70	42
Ecovent 10 kW	90	4.20	40
silentfuturetec	165	2.00	35

Tabelle 3.13: Maximaldrehzahl, Rotorradius und resultierende Blattspitzengeschwindigkeit einiger ausgewählter KWEA

einige KWEA, um eine Orientierung über mögliche Blattspitzengeschwindigkeiten zu geben. Bei den betrachteten Anlagen liegen diese zwischen 35 m s^{-1} und 118 m s^{-1} , wobei die meisten Anlagen nur 70 m s^{-1} erreichen. Bei Annahme der erwähnten 50% der Maximaldrehzahl und 30 J Aufprallenergie ergibt sich ein minimales Gewicht von ca. 50 g bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 35 m s^{-1} . Bei Großwindenergieanlagen kann auch bei Eiswurf meist von niedrigeren Aufprallgeschwindigkeiten ausgegangen werden, da eine große Fallhöhe zum Abbremsen der geworfenen Stücke zur Verfügung steht. Bei KWEA ist mit wesentlich niedrigeren Fallhöhen im Bereich von 10 m bis 20 m zu rechnen.

3.6.1 Methodik und Experimenteller Aufbau



Quelle: xkcd.com/1160/

Da KWEA über keine Enteisungssysteme verfügen ist die Beobachtung des Eiswurfs, wie in 3.3 beschrieben, sehr schwierig und ohne permanente Überwachung von Anlagen praktisch unmöglich. Von den durchgeführten Beobachtungen nach den Vereisungsereignissen steht allerdings eine Datenbasis von abgeworfenen Eisstücken und deren Wurfweiten zur Verfügung. Wie auch bei der Großwindkraft ist diese Basis unzureichend, um Risikoabschätzungen durchzuführen. KWEA bieten im Unterschied zur Großwindkraft jedoch die Möglichkeit mit vergleichsweise geringem Aufwand Experimente zur Untersuchung des Eiswurfs durchzuführen.

Wie auch bei den Experimenten zum Eisfall bei GWEA liegt eine wesentliche Schwierigkeit in der Begrenzung der nicht kontrollierbaren Einflussgrößen. Bei Eisfall stellt die Windgeschwindigkeit die dominante Einflussgröße dar, deren exakte Messung, wie in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, eine zentrale Herausforderung in Experimenten ist. Bei Eiswurf, insbesondere bei geringen Höhen, ist davon auszugehen, dass die Verfrachtung durch Wind eine untergeordnete Größe gegenüber Variablen wie der Blattspitzengeschwindigkeit darstellt. Da die Frage, ob die Ablösung vom Rotorblatt bei bestimmten Rotorblattstellungen wahrscheinlicher ist als bei anderen, experimentell schwer abzuklären ist, wird in den Experimenten vorläufig von einer Gleichverteilung der Wahrscheinlichkeiten ausgegangen.

Folgende Parameter sollten in Experimenten variiert und die Auswirkung auf die Trajektorien und insbesondere die Wurfweite untersucht werden:

- Blattspitzengeschwindigkeit
- Fragmentgeometrie
- Fragmentdichte
- Rotorblattstellung bei Ablösung

Zu diesem Zweck wurde eine Wurfvorrichtung für Probekörper aus Kunststoff konstruiert, die den im Rahmen des Monitorings gescannten Eisstücken entsprechen. Durch einen Motor mit einstellbarer Drehzahl wird eine Welle angetrieben, an der sich zwei je 1 m lange Ausleger befinden. Am äußeren Ende eines Auslegers befindet sich eine Haltevorrichtung für die künstlichen Fragmente. Diese besteht aus der Extrusion eines NACA 64-618 Profils, ein aerodynamisches Profil, das für Abschnitte von Rotorblättern benutzt wird, um eine möglichst große Ähnlichkeit mit tatsächlichen Rotorblättern zu erreichen. Als maximale Umdrehungsgeschwindigkeit ω wurde 250 rpm gewählt. Mit den folgenden Gleichungen 3.12 und 3.13 lässt sich bei einem Rotorradius r die notwendige Haltekraft F , die Blattspitzengeschwindigkeit v und die maximale Energie E_{max} zum Zeitpunkt des Wegschleuderns berechnen:

$$\begin{aligned} F &= m\omega^2 r \\ E_{max} &= \frac{mv^2}{2} \\ v &= \omega r \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$E_{max} = \frac{F \cdot r}{2} \tag{3.13}$$

Zur Befestigung der Probekörper am Profil wurden verschiedene Varianten getestet. Der Einsatz von Elektromagneten schien am erfolgversprechendsten, da eine sehr schnelle Auslösung möglich ist und nur geringe konstruktive Anforderungen bestehen. Aus den obigen Gleichungen ergibt sich für einen 250 g schweren Probekörper bei Maximaldrehzahl eine notwendige Haltekraft von 170 N. Tests mit Elektromagneten mit einer Haltekraft von 200 N zeigten, dass sich die Probekörper bereits bei wesentlich niedrigeren Umdrehungsgeschwindigkeiten lösten. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Vibrationen und damit das Auftreten von normal zur Halterichtung der Magneten wirkenden Kräfte zurückzuführen. Eine weitere überprüfte Alternative stellt die Befestigung mit Hilfe einer Gewindestange, die aus einer Aufnahme herausgedreht wird und damit auslöst, dar. Dies funktioniert zwar prinzipiell, die Auslösezeit ist jedoch vergleichsweise lang und der exakte Zeitpunkt des Ablösens der Probekörper kann nicht akzeptabel kontrolliert werden. Vielversprechend wäre noch die Verwendung eines Hakens, der durch einen Servomotor aus einer Öse am Probekörper bewegt wird. Diese Variante wurde nicht mehr getestet, da der konstruktive Aufwand vergleichsweise hoch und die Auslösezeit ebenfalls potenziell zu lang ist.

Der schließlich eingesetzte Aufbau besteht aus einem Seil durch den Probekörper, dessen Enden mit einer Sprengkapsel verbunden sind. Diese Schlaufe ist an einem Haken am Ende des Auslegers fixiert. Bei Anlegen einer Spannung an die Sprengkapsel explodiert diese und trennt



Abbildung 3.45: *Experimenteller Aufbau für Eiswurf-Untersuchungen bei KWEA.*

die Seilenden voneinander. Durch Videoaufnahmen konnte überprüft werden, dass die so erreichte Auslösezeit im Bereich von 20 ms liegt, bei 250 rpm entsprechend einem Winkelbereich von 30° .

Abhängig vom Auslösewinkel wird einer der Arme mit einem Gegengewicht anstatt eines Probekörpers ausgestattet, da Würfe abwärts als trivial eingestuft werden und Probekörper bei Würfen oft beschädigt werden. Der Einsatz von Gegengewichten ist notwendig, da die entstehende Unwucht nach Abwurf eines Probekörpers sonst den Aufbau beschädigen könnte.

Die Sprengkapseln an beiden Auslegern sind mit einer Auslösevorrichtung nahe der Welle am Rotor verbunden. Diese Auslösevorrichtung besteht aus zwei derart parallel geschalteten Schaltern, dass bei Aktivierung beider Schalter eine Spannung an den Sprengkapseln anliegt. Der erste der beiden Schalter ist ein Funkmodul, das bei Empfang eines entsprechenden Signals seinen Zustand von Aus zu Ein wechselt. Der zweite Schalter ist ein Reedkontakt, der bei Vorliegen eines äußeren Magnetfeldes ausschaltet. Das äußere Magnetfeld wird durch einen verschiebbaren Permanentmagneten am feststehenden Teil der Apparatur geliefert. Dies ermöglicht die freie Wahl der Rotorstellung bei Auslösung. Nach Aktivieren beider Schalter liegt bis zur Rückstellung mittels eines mechanischen Schalters Spannung an den Sprengkapseln an, sodass eine vorzeitige Abschaltung bei Verlassen des Feldes des Permanentmagneten durch den Reedkontakt verhindert wird. Die vorgesehene Auslösesequenz besteht somit im „Scharfmachen“ des Reedkontaktes mittels Funkschalter und schließlich Auslösen des Wurfes durch Spannung an den Sprengkapseln bei Passieren des Permanentmagneten.

Um den mechanischen Aufwand zu reduzieren, besteht keine elektrische Verbindung zwischen Rotor und stehendem Aufbau. Daher befindet sich auch die für die Auslösevorrichtung notwendige Energieversorgung durch Batterien auf dem Rotor.

Der eingesetzte Motor erlaubt keine exakte, last-kompensierte Drehzahlsteuerung. Daher wird die tatsächliche Drehzahl mithilfe einer Lochscheibe und einer Gabellichtschranke gemessen. Abbildung 3.45 zeigt den vollständigen Aufbau.

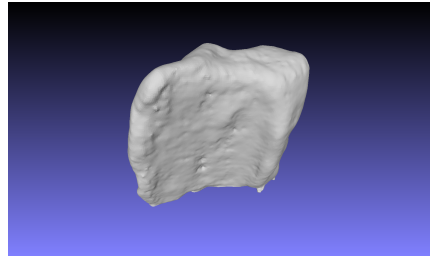


Abbildung 3.46: Probekörpertyp NBL an der Fundstelle (links) und das dazu passende 3D-Modell (rechts).

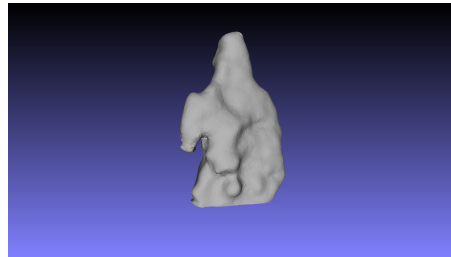


Abbildung 3.47: Probekörpertyp NAL an der Fundstelle (links) und das dazu passende 3D-Modell (rechts).

3.6.2 Eingesetzte Probekörper

Zur Simulation von Klareisplatten wurden, wie schon in Abschnitt 3.4.1.4 beschrieben, Polystyrol-Platten zu einem geeigneten Profil gebogen. Für diese Experimente wurden Platten mit einem Gewicht von durchschnittlich 192 g und den Ausgangsmaßen 23 cm × 9 cm auf eine Breite von 6.9 cm gebogen.

Der Probekörpertyp NBL zeigt deutliche Raueisbildung von der führenden Kante weg verlaufend an der Luv-Seite des Rotorblattes. Das Stück stammt vermutlich vom Rotorblatt der Anlage Windspot und wurde in einer Entfernung von 9 m von der Anlage gefunden. Das gesammelte Fragment wiegt 270 g und weist eine Dichte von 0.8 g cm^{-3} auf. Der daraus entwickelte Probekörpertyp NBL hat eine reduzierte Dichte von ca. 0.6 g cm^{-3} und wiegt 103 g.

Probekörpertyp NAL zeigt einen wesentlich dünneren Aufbau des Eises, der in einer Keilform endet. Die am Rotorblatt anliegende Seite ist mit 5 cm im Verhältnis zur Breite des gesamten Stückes von 7 cm vergleichsweise groß. Zusätzliche Komplexität erreicht der Probekörper durch den Überhang auf einer Seite. Das Stück stammt vermutlich ebenfalls von der Anlage Windspot und wurde in einer Entfernung von 7.2 m gefunden. Das Gesamtgewicht vor der Fragmentierung betrug 720 g bei einer Dichte von 0.74 g cm^{-3} . Der daraus entwickelte Probekörper hat eine Länge von 15 cm, ein Gewicht von 106 g und eine mittlere projizierte Oberfläche (mpO) von 62 cm^2 .

Weiters wurden idealisierte Formen für Raueis generiert, die in kurzer (15 cm) Bauform mit der Bezeichnung ICL produziert wurden, sowie in langer (20 cm) mit geringer Dichte von 0.6 g cm^{-3} unter der Bezeichnung IDL und als weitere Referenz in langer mit hoher Dichte von 1.0 g cm^{-3} unter der Bezeichnung IDS. Details finden sich in Tabelle 3.14, ein Bild der fertigen Probekörper in Abbildung 3.48. Zur vereinfachten Montage wurden die Fixier-Schlaufen aller Probekörper mit Kabelbindern verbunden, sodass diese schnell gespannt werden können.

Bezeichnung	Anzahl	Masse [g]	Länge [cm]	Breite [cm]	Höhe [cm]	mpO [cm ²]	cDAom [m ² /kg]
ICL	5	179	8.0	4.0	15	83	0.047
IDL	5	232	8.0	4.0	20	106	0.046
IDS	3	371	8.0	4.0	20	106	0.029
NAL	5	107	7.9	5.4	13	62	0.058
NBL	5	103	9.7	6.1	10	57	0.055
P1S	10	192	6.9	4.0	23	129	0.067
P1L	6	97	6.6	3.4	23	85	0.087

Tabelle 3.14: Übersicht über die für Versuche zum Eiswurf bei KWEA eingesetzten Probekörper



Abbildung 3.48: Probekörper für Eiswurf. Der Kabelbinder für Schnellmontage und die Zündkapsel mit Verkabelung sind links oben und unten zu erkennen.

Die mittleren projizierten Oberflächen wurden wenn möglich aus den 3D-Modellen berechnet. Für die P1S und P2S Probekörper wurde ein rechtwinkeliges Dreieck als Querschnittfläche angenommen und die Berechnungen wurden dementsprechend durchgeführt.

3.6.3 Versuchsdurchführung

Experimente wurden an zwei Tagen durchgeführt. Der erste Tag diente im Wesentlichen zur Optimierung des Aufbaus, weshalb mit der Durchführung der Versuchswürfe spät begonnen wurde. Aufgrund der Wetterverhältnisse musste vorzeitig abgebrochen werden, wodurch nur acht erfolgreiche Würfe durchgeführt werden konnten. Folgender Ablauf hat sich zur Durchführung der Experimente bewährt:

Ähnlich den Fallversuchen bei GWEA erfolgt durch ein Team der Aufbau der fixierten Kameras für die Stereo-Aufnahmen, während durch ein zweites Team die Montage der Wurfvorrichtung erfolgt.

Zur Wahl des Aufstellungsortes der Kameras ist Vorwissen über die maximale Wurfweite von Vorteil. Bei Einsatz der Wurfvorrichtung auf einer Höhe von 10 m wurde eine Wurfweite von 41 m nicht überschritten - dementsprechend kann der Bildausschnitt gewählt werden. Weiters ist zu berücksichtigen, ob mit zwei Probekörpern oder mit Gegengewicht gearbeitet wird, da entsprechend der Mast, von dem geworfen wird, in der Bildmitte oder am äußersten Rand des Bildes liegen sollte. Mithilfe eines Kalibrierbildes (asymmetrisches Schachbrettmuster), das

durch den Bildausschnitt in der erwarteten Wurfebene bewegt und von den fixierten Kameras aufgenommen wird, ist eine Bestimmung der Kameraparameter und eine Überprüfung der Kameraeinstellungen, vor allem der Tiefenschärfe, möglich. Aufgrund der vergleichsweise kleinen Probekörper und der nicht genau bekannten Wurfebene ist eine hohe Tiefenschärfe notwendig - hierfür ist vor allem starkes Umgebungslicht von Vorteil. Eine Kalibrierung auf der Basis von 10-15 Bildern, an denen das Kalibriermuster möglichst durch den gesamten Bildausschnitt bewegt wird, erwies sich als optimal. Eine probeweise Kalibrierung mit wenigen Bildern vor Ort ist in annehmbarer Zeit möglich und sinnvoll.

Zur Montage der Wurfvorrichtung wird eine Montageplattform am benutzten Turm fixiert. Um größtmögliche Flexibilität zu erhalten, wurde diese Plattform sowohl für die Fixierung an einem Gittermastturm als auch einem Rundmasten vorbereitet. Die nötige Haltekraft wird in beiden Fällen durch Ankleben erreicht. auf diese Plattform kann die Wurfvorrichtung aufgesetzt und verschraubt werden. Zur Energieversorgung und Datenübertragung werden Leitungen zur Wurfvorrichtung verlegt.

Während der Versuchsdurchführung befindet sich ein Mitarbeiter oder eine Mitarbeiterin am Turm um den aktuellen Wurf vorzubereiten. Ausgelöst wird mittels Fernsteuerung durch einen zweiten Mitarbeiter oder eine zweite Mitarbeiterin am Boden. Während des Fluges des Probekörpers werden im Abstand von 500 ms Stereobilder gemacht und der Probekörper in möglichst starker Nahaufnahme mit der Filmkamera (50 fps) verfolgt. Nach dem Wurf wird die Vorrichtung auf den nächsten Wurf vorbereitet, indem die Auslöseelektronik zurückgesetzt wird und die paarweise verpackten Probekörper bzw. Probekörper/Gegengewicht Kombinationen an den Enden der Ausleger angebracht werden. Abhängig von den Probekörpern werden zusätzliche Wuchtgewichte an den Auslegern angebracht. Gleichzeitig wird der Auftreffpunkt des zuvor geworfenen Probekörpers aufgenommen und der Probekörper eingesammelt. Dieser kann nun für einen weiteren Versuch präpariert werden.

Während der Wurfversuche an Versuchstag 1 wurde eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3.3 m s^{-1} aus Richtung 5° gemessen.

3.6.4 Wurfweiten

An zwei Tagen wurden 74 erfolgreiche Würfe durchgeführt. Dabei wurden sieben verschiedene Probekörpertypen aus zwei verschiedenen Rotorpositionen mehrfach abgeworfen. Tabelle 3.15 zeigt die Zahl der Abwürfe nach Probekörpertyp. Die gewählten Rotorpositionen waren 45° und 0° um den Fall der maximalen Wurfweite und einen symmetrischen Fall abzudecken.

Abbildung 3.49 zeigt die Fundorte der Fragmente am Versuchstag 1. Wie zu erkennen ist, variierten die Wurfweiten zwischen 30 m und 41 m. Ein weiterer Probekörper wurde in einer Entfernung von 54 m gefunden, allerdings ist aus den Filmaufnahmen bekannt, dass dieser nach dem Aufprall nochmals hochgeschleudert wurde und daher in großer Entfernung zum Auftreffpunkt zu liegen kam. Dies ist auf den harten Untergrund zurückzuführen, durch den auch zwei Probekörper zerbrachen. Die Fragmente sind als einzelne Fundorte aufgeführt. Nicht dargestellt sind die Gegengewichte, von denen zwei die bei einem Abwurfwinkel von 45° abwärts zu erwartende Distanz von ca. 10 m zurücklegten. Ein drittes Gegengewicht wurde fast doppelt so weit geworfen; ob dies auf verspätete Auslösung oder Abprallen vom Boden zurückzuführen ist, kann nicht nachvollzogen werden. Jedenfalls machen diese ersten Ergebnisse bereits auf das Problem aufmerksam, dass bei der Gefährdung durch herabfallende Anlagenteile das Abprallen vom Boden für die erreichbare Weite zu berücksichtigen ist.

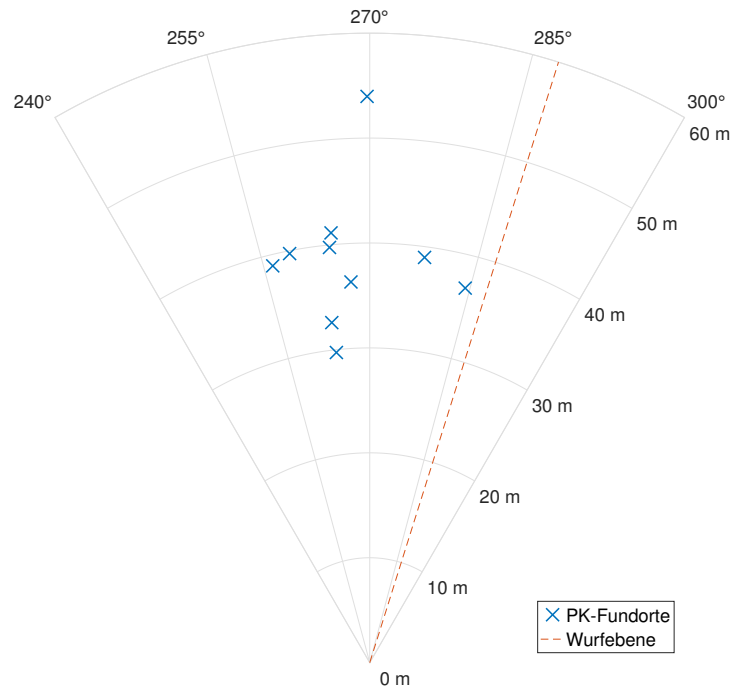
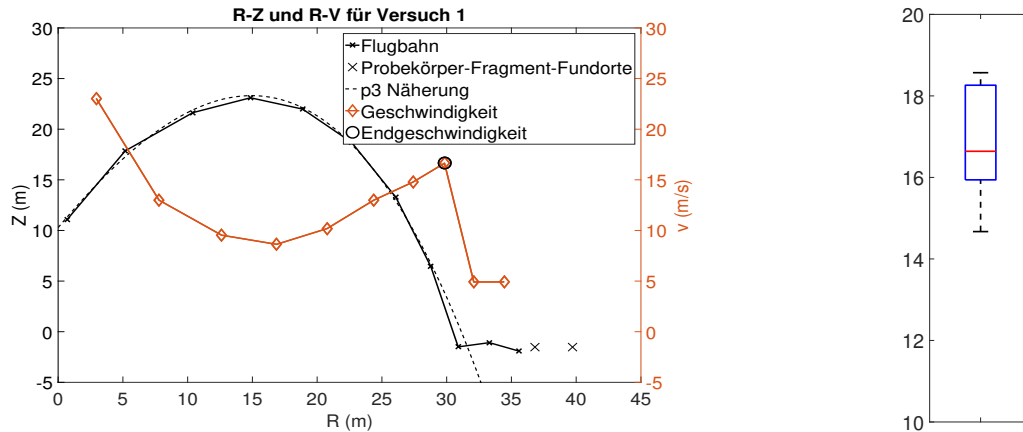


Abbildung 3.49: Fundorte der geworfenen Probekörper an Versuchstag 1. Die Verfachtung in Windrichtung (normal zur Wurfebene) ist deutlich erkennbar.

	Tag 1 (Wurfwinkel 45°)		Tag 2 (Wurfwinkel 0°)		Tag 2 (Wurfwinkel 45°)	
	Anzahl	mittlere Wurfweite	Anzahl	mittlere Wurfweite	Anzahl	mittlere Wurfweite
ICL	3	36.7 ± 4.3 m	5	37.4 ± 10.4 m		
IDL	5	37.0 ± 4.2 m	7	34.4 ± 1.9 m		
IDS	2	46.4 ± 10.7 m	4	39.6 ± 1.8 m		
NAL			7	31.1 ± 6.7 m	5	26.5 ± 6.5 m
NBL			6	27.9 ± 9.2 m	4	25.9 ± 6.4 m
P1S			5	14.1 ± 5.8 m		
P1L			3	13.2 ± 2.5 m		

Tabelle 3.15: Übersicht über die Anzahl abgeworfener Probekörper und die sich ergebenden Wurfweiten



(a) Beispiel für den Verlauf des radialen Abstands mit der Höhe sowie der damit verbundenen Geschwindigkeit. Am Ende der Trajektorie ist das Aufspringen des Probekörpers zu Erkennen, das auch den Unterschied zwischen Fragment-Fundorten und bestimmter Flugbahn erklärt.

(b) Boxplot der gemessenen Endgeschwindigkeiten.

Abbildung 3.50: Endgeschwindigkeiten der gemessenen Trajektorien.

3.6.5 Trajektorien

Abbildung 3.50a zeigt die Rekonstruktion der Flugbahn eines Probekörpers. Der Aufprall am Boden und das zusätzliche Abprallen sind deutlich zu erkennen. Wie bei der Großwindkraft lässt sich der Verlauf der Flugbahn mit einem Polynom dritten Grades akzeptabel beschreiben. Außerdem ist der Verlauf der Geschwindigkeit zu sehen. Der Messwert, der für die Endgeschwindigkeit herangezogen wird, ist gesondert markiert. Aufgrund der kurzen Flugphase erreichen die Probekörper keine stabile Endgeschwindigkeit; daher wird die letzte Geschwindigkeit vor dem Aufprall des Probekörpers benutzt.

Abbildung 3.50b stellt die Endgeschwindigkeiten als Boxplot dar. Im Mittel findet sich eine Endgeschwindigkeit von 16.5 m s^{-1} , wobei auch hier wieder eine große Schwankung gegeben ist. Wie zu erwarten, ist die Endgeschwindigkeit bei Probekörpern höherer Dichte entsprechend höher, im Bereich von 18 m s^{-1} .

3.7 Modellierung

Die übliche Modellierung von Eisfall und Eiswurf geschieht mit Hilfe ballistischer Modelle (z.B. Bredesen und Refsum, 2015; Seifert, 2007b). Wie in 2.1 beschrieben, ist eine zugrundeliegende Annahme, dass die auftretenden Eisstücke als grob würfelförmig und damit auch praktisch frei von Auftriebskräften modelliert werden können. Aus den durchgeführten Beobachtungen und Experimenten lässt sich ableiten, dass dies nur bedingt zutrifft. Bei Raueisstücken mit kompakter Geometrie scheint dieser Modellierungsansatz durchaus sinnvoll; dünnes Klareis hingegen verhält sich eher ähnlich Platten und zeigt daher ein komplexeres Verhalten. Tachikawa (1983) beschreibt das mögliche Verhalten frei fallender Platten in einem uniformen Strömungsfeld, wobei sich zeigt, dass abhängig von der initialen Orientierung zum Strömungsfeld unterschiedliche Rotationsmodi erreicht werden, die entsprechend zu positiven oder negativen Auftriebskräften

führen. Dies steht in Einklang mit den Experimenten, die besonders große Fallweiten bei regelmäßiger Rotation der flachen plattenförmigen Probekörper zeigen. Dieses Verhalten lässt sich, wesentlich schwächer ausgeprägt, bei den gebogenen Platten finden; es ist anzunehmen, dass durch die höhere Turbulenz seltener ein Zustand stabiler Rotation erreicht wird. Da diese aber auch realen Eisstücken näher kommen, als flache Platten, scheint eine direkte Abhängigkeit zwischen initialem Fallwinkel und dem Verhalten für reales Eis unwahrscheinlich.

Aus Sicherheitsüberlegungen erscheint eine Modellierung zumindest dreier verschiedener Eis-typen sinnvoll:

- kompaktes Raueis (einfaches ballistisches Modell)
- flaches Klareis (Modell mit Autorotation)
- stangen- bzw. rechteckförmiges Raueis mit einem Verhältnis Länge zu Breite größer 4:1 (Bredesen und Refsum, 2015, Abschnitt C)

Baker (2007) beschreibt ein ballistisches Modell, das Autorotation und dadurch auftretende Auftriebskräfte berücksichtigt. Die Ergebnisse dieses Modells für Platten sind stark abhängig von den Randbedingungen wie initialem Winkel und Variationen im Strömungsfeld, zeigen also insgesamt ein Verhalten, das typisch ist für chaotische Systeme. Eine weitere Untersuchung dieses Modells durch Kordi und Kopp (2009) verbessert dieses zwar, bringt aber keine wesentlichen Veränderungen. CFD-Simulationen durch Kakimpa u. a. (2012) führen zu einem veränderten Modell, das einen weiteren Parameterbereich abdeckt. Der Vergleich zwischen Simulation und Berechnung zeigt allerdings weiterhin große Unterschiede in jenen Fällen, in denen Platten die stabile Autorotation nicht nahezu sofort erreichen. Somit lässt sich mit Hilfe des detaillierten Modells eine Abschätzung der möglichen Fallweiten erreichen. Der Nutzen aus dieser Möglichkeit muss aber gegenüber dem damit verbundenen Aufwand abgewogen werden, insbesondere, da Klareisansatz - zumindest in Österreich - vergleichsweise selten auftritt, dann allerdings unter Umständen verbunden mit hohen Windgeschwindigkeiten.

Der dritte Fall der langen Raueisstangen ist besonders schwierig zu behandeln. Die vorhandenen Modelle können diesen nicht wiedergeben, da diese sehr komplexe dreidimensionale Rotationen durchlaufen können. Aufgrund ihres sehr hohen Gewichts ist allerdings generell mit eher niedrigen Fallweiten zu rechnen. Besonders relevant ist hier die Abschätzung der zu erwartenden Längen nicht weiter während des Falls zerbrechender Fragmente. Die längsten im Rahmen des Monitorings beobachteten Fragmente lagen im Bereich von 2 m bis 3 m.

3.7.1 Analyse des Modells nach Biswas u. a. (2012)

Das Modell nach Biswas u. a. (2012) wird vielfach benutzt um das Risiko von Eiswurf einzuschätzen. Es basiert auf der Annahme kompakter Eisstücke, auf die weder Auftriebs- noch Rotationskräfte wirken. Eisstücke werden durch einen Formfaktor $c_D A/m$ charakterisiert, der sich aus der effektiven Fläche A , der Masse m und dem Strömungswiderstandskoeffizienten c_D zusammensetzt. Für letzteren wird üblicherweise $c_D = 1$ oder $c_D = 1.2$ gewählt, für die Wahl der effektiven Fläche werden zumindest zwei verschiedene Ansätze genutzt: die größte Fläche eines Körpers (Biswas u. a., 2012) oder die mittlere projizierte Fläche $A = 0.5(ab + bc + ca)$ (Bredesen und Refsum, 2015) für einen quaderförmigen Körper mit Kantenlängen a , b und c . Bredesen und Refsum nehmen die Gültigkeit des Modells zumindest für ein Verhältnis der kleinsten zur größten Kantenlänge von 1:5 an.

Es wird die Windrichtung üblicherweise konstant parallel der x-Achse gewählt und für die Windgeschwindigkeit v_w ein logarithmisches Windprofil angenommen. Mit der Erdbeschleunigung g

und der Luftdichte ρ_L ergibt sich damit folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 x}{dt^2} &= -\frac{c_D A}{2m} \rho_L v_{x,rel} v_{rel} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= -\frac{c_D A}{2m} \rho_L v_y v_{rel} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\frac{c_D A}{2m} \rho_L v_z v_{rel} - g\end{aligned}\tag{3.14}$$

Die Geschwindigkeiten werden zur Vereinfachung mit $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$ und $v_z = \frac{dz}{dt}$ abgekürzt.

$$\begin{aligned}v_{x,rel} &= v_x - v_w \\ v_{rel} &= \sqrt{v_{x,rel}^2 + v_y^2 + v_z^2}\end{aligned}\tag{3.15}$$

$$v_w(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z + z_o}{z_0}\tag{3.16}$$

Wird bei Betrachtung von Eisfall, also mit Initialgeschwindigkeit 0 m s^{-1} , das logarithmische Windprofil durch eine konstante Windgeschwindigkeit wie bei Morgan und Bossanyi (1996) ersetzt, so ist leicht ersichtlich, dass nach einer kurzen Beschleunigungsphase ein Gleichgewicht zwischen den wirkenden Kräften erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt ist die Trajektorie linear. Näherungsweise zeigt sich das bei ausreichender Fallhöhe bzw. einem schwach ausgeprägten Windprofil auch bei Verwendung des logarithmischen Windprofils. Unterschiede treten vor allem gegen Ende des Falls auf, da hier die Geschwindigkeit in x-Richtung die Windgeschwindigkeit deutlich überschreitet und daher das Fragment abgebremst wird. Die Unterschiede zwischen beiden Ansätzen und der Vergleich mit einem linearem Fall sind in Abbildung 3.51 dargestellt. Für das Beispiel wird ein fiktiver quaderförmiger Probekörper mit den Maßen $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ und einer Dichte von 600 kg m^{-3} angenommen. Weiters wird die Oberflächenrauigkeit mit 3 cm festgesetzt.

In Abbildung 3.52 ist der Zusammenhang zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit für beide Ansätze zu sehen. Wie zu erwarten, nimmt die maximale Fallweite im Modell mit konstanter Windgeschwindigkeit schneller zu. Allerdings ist auch zu erkennen, dass in diesem Beispiel der Unterschied weniger als 10% beträgt, der Genauigkeitsgewinn also sehr gering ist. Eine weitere wichtige Eigenschaft dieses Modells liegt darin, dass sich für eine gegebene Windgeschwindigkeit bzw. einen gegebenen Schubspannungskoeffizienten und eine Höhe genau eine Fallweite ergibt. Dies ist numerisch von Vorteil, da Tabellen vorausberechneter Werte angelegt und nach Bedarf abgerufen werden können, wodurch Simulationen mit sehr hohen Stichprobenzahlen möglich werden. Nachteilig ist, dass dies die Realität nur sehr eingeschränkt abbildet, da z.B. bei Windstille im Modell die Fallweite immer 0 m beträgt, unabhängig von der Form des betrachteten Eisfragments oder der Ausrichtung, etc. Ein weiterer Vorteil dieses Modells besteht darin, dass der Unterschied zwischen Eisfall und Eiswauf nur in der Wahl der Initialgeschwindigkeit besteht.

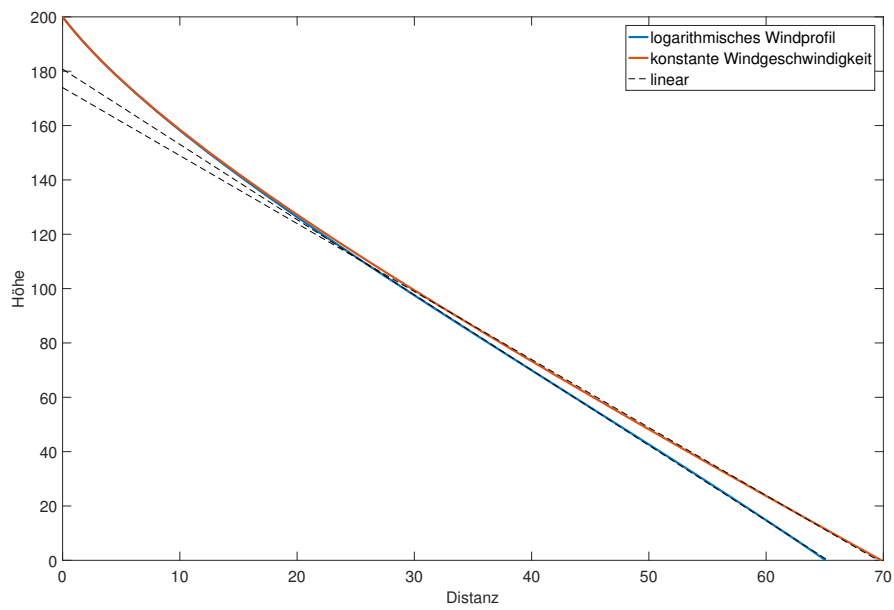


Abbildung 3.51: Vergleich der Auswirkung des logarithmischen Windprofils gegenüber konstanter Windgeschwindigkeit auf die Fallweite im Biswas Modell für die Trajektorie . Die Unterschiede der Fallweiten betragen ca. 10%.

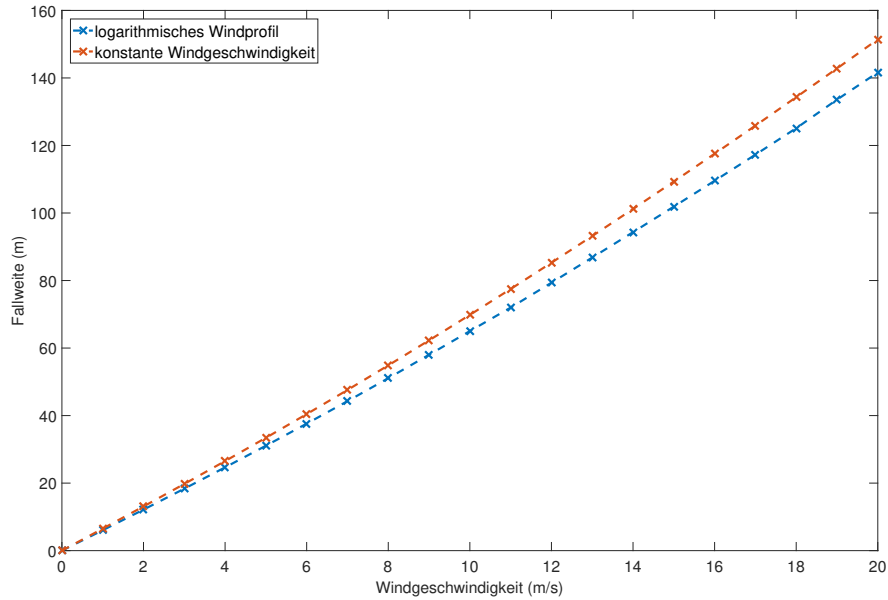


Abbildung 3.52: Vergleich der Auswirkung des logarithmischen Windprofils gegenüber konstanter Windgeschwindigkeit auf die Fallweite im Biswas Modell für die Variation der Windgeschwindigkeit.

3.7.2 Analyse des Modells nach Baker (2007)

Das Modell nach Baker reduziert das Problem auf zwei räumliche Dimensionen und bringt eine weitere Gleichung für die Rotation ein. Die Annahme ist eine Platte vernachlässigbarer Dicke, die um eine feste Achse normal zur Windrichtung (Wind aus positiver x-Richtung) und parallel zur y-Achse rotiert. Der Winkel β beschreibt hierbei die Ausrichtung der Platte zur relativen Windrichtung v_{rel} , der Winkel θ die Ausrichtung der Platte relativ zur y-Achse. Die Faktoren zur Beschreibung des Luftwiderstandes c_D , des Auftriebs c_L und des Drehmoments durch Luftwiderstand c_M sind empirische Werte abhängig vom Winkel β . Aus Gleichung (3.21) ist zu erkennen, dass der Strömungswiderstandskoeffizient zwischen 0.26 bei minimaler und 1.24 bei maximaler Angriffsfläche variiert. Die Faktoren für Auftrieb durch Autorotation c_{LA} und für Drehmoment durch Autorotation c_{MA} wiederum sind von je einem empirischen Faktor k_{LA} und k_{MA} und der Rotationsgeschwindigkeit abhängig. Weiters dient ein Wert ω_{max} zur Beschränkung der Rotationsgeschwindigkeit, da keine Faktoren zur Berücksichtigung von Turbulenzen, die ansonsten die Rotationsgeschwindigkeit begrenzen würden, existieren und somit eine unbegrenzte Beschleunigung erfolgen würde.

Baker schlägt die Verwendung von $k_{LA} = 0.4$ und $k_{MA} = 0.12$ mit Bezug auf Iversen (1979) und Tachikawa (1983) vor und weist darauf hin, dass die Ergebnisse der Autoren untereinander und abhängig von der Form der untersuchten Körper wesentlich differieren.

Die Beschreibung des Körpers erfolgt durch die effektive Fläche A , die Masse m , das Trägheitsmoment I und die charakteristische Länge l . Baker wählt hierbei für A die Fläche der Platte (die Dicke sei vernachlässigbar), für l die Länge quer zur Rotationsachse und für das Trägheitsmoment $I = \frac{m}{12}l^2$.

Weiters ist erkennbar, dass bei der Annahme, dass für kompakte Körper die Autorotation und der Auftrieb vernachlässigbar werden, sich die Gleichungen auf eine zweidimensionale Variante des Biswas Modells reduzieren.

Das Modell wird in dieser durch den Einsatz des logarithmischen Windprofils wie im Biswas-Modell erweitert.

$$\begin{aligned}\frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{A}{2m} \rho_L (c_D v_{x,rel} - (c_L + c_{LA}) v_z) v_{rel} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{A \rho_L}{2m} (c_D v_z + (c_L + c_{LA}) v_{x,rel}) v_{rel} - g \\ \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= \frac{A l \rho_L}{2I} (c_M + c_{MA}) v_{rel}^2\end{aligned}\tag{3.17}$$

$$\beta = \theta + \arccos\left(\frac{v_{x,rel}}{v_{rel}}\right)\tag{3.18}$$

$$v_{x,rel} = v_x - v_w\tag{3.19}$$

$$v_{rel} = \sqrt{v_{x,rel}^2 + v_z^2}\tag{3.20}$$

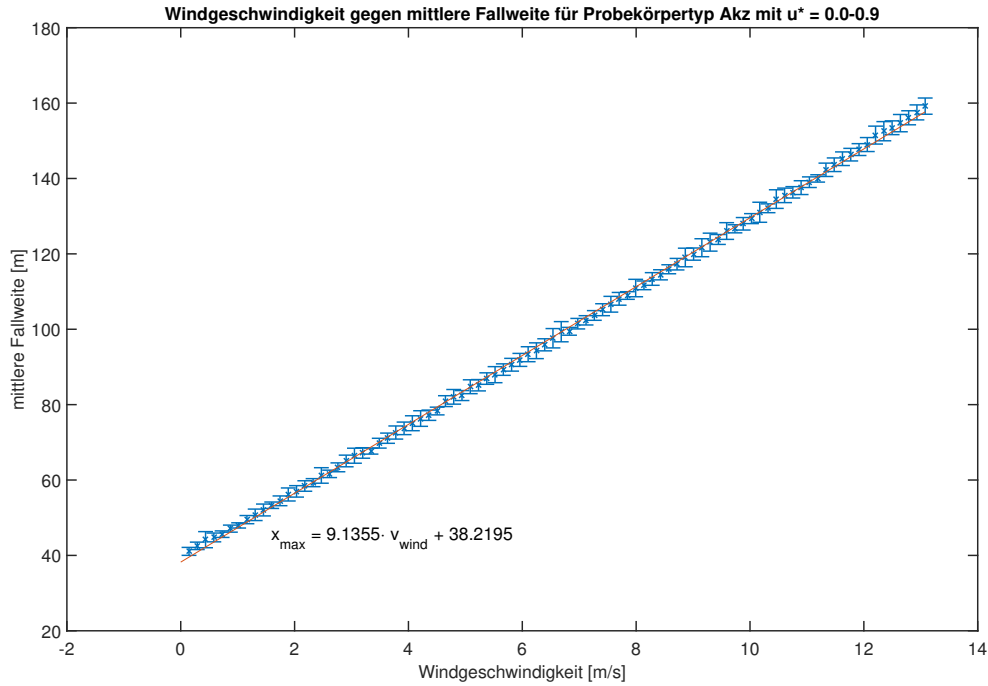


Abbildung 3.53: Die Zunahme der durchschnittlichen Fallweite mit der Windgeschwindigkeit zeigt einen linearen Zusammenhang.

$$c_D = 0.75 \left(1 + 0.65 \cdot \sin \left(2\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (3.21)$$

$$c_L = 1.2 \cdot \sin(2\beta) \quad (3.22)$$

$$c_M = 0.2 \cdot \cos(\beta) \cdot (c_D \sin(\beta) + c_L \cos(\beta)) \quad (3.23)$$

$$c_{LA} = k_{LA} \frac{\omega}{\omega_{\max}} \quad (3.24)$$

$$c_{MA} = k_{MA} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{\max}} \right) \frac{\omega}{\omega_{\max}} \quad (3.25)$$

Das Modell nach Baker zeigt ein für chaotische Systeme typisches Verhalten; geringe Veränderungen in den Randbedingungen führen zu großen Veränderungen der Ergebnisse. Insbesondere zeigt das Modell eine starke Abhängigkeit von der Wahl der maximalen Rotationsgeschwindigkeit sowie von der Anfangsorientierung des betrachteten Fragments (siehe Abbildung 3.55).

Bei Betrachtung des Mittelwertes der Fallweiten bei Variation der Windgeschwindigkeit ergibt sich ein in guter Näherung linearer Zusammenhang (siehe Abbildung 3.53). Demgegenüber ist das Verhalten mit der Fallhöhe wesentlich komplexer. Nach einer zuerst exponentiellen Zunahme der Fallweite ergibt sich wieder ein linearer Zusammenhang. Dies spiegelt unter anderem das logarithmische Windprofil wider. Bei Erreichen einer kritischen Fallhöhe nimmt die Fallhöhe wiederum wesentlich langsamer linear zu, wie in Abbildung 3.54 zu erkennen ist. Dieses Verhalten konnte bisher experimentell nicht bestätigt werden, da die notwendigen Höhen bei Abwürfen von WEA schwer erreichbar sind.

Die qualitative Untersuchung des Verhaltens abgeworfener Platten zeigte in fast allen Fällen eine Rotation um die Hauptträgheitsachse, praktisch also der Raumdiagonale, des Körpers.

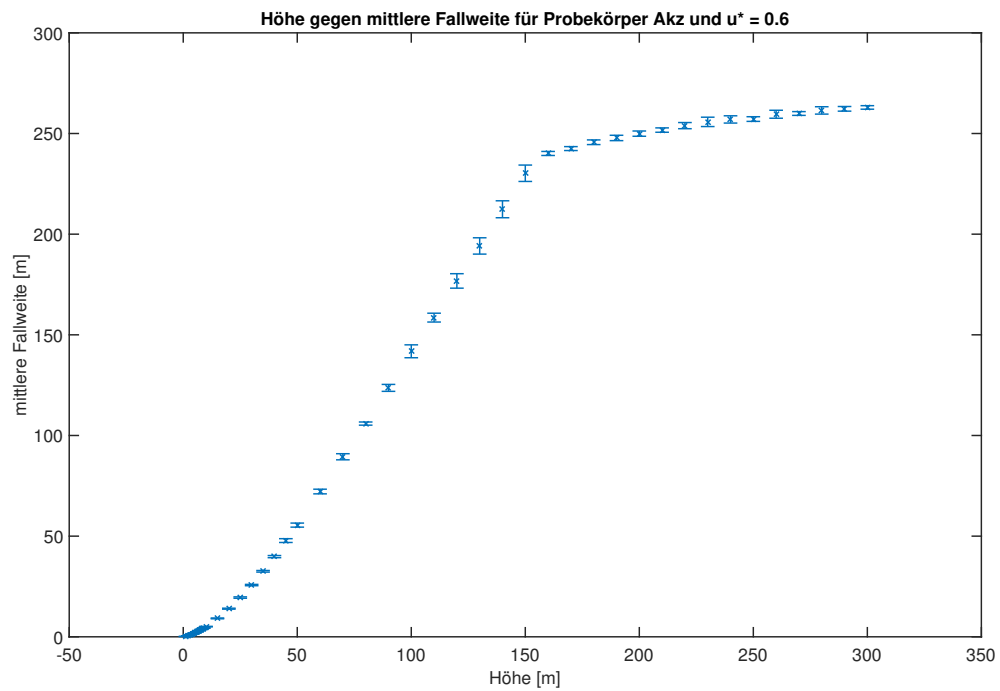


Abbildung 3.54: Die Zunahme der durchschnittlichen Fallweite mit der Höhe erfolgt in drei Phasen: exponentielle Zunahme (hier bis ca 30 m), schnelle lineare Zunahme (hier bis ca 510 m) und langsame lineare Zunahme

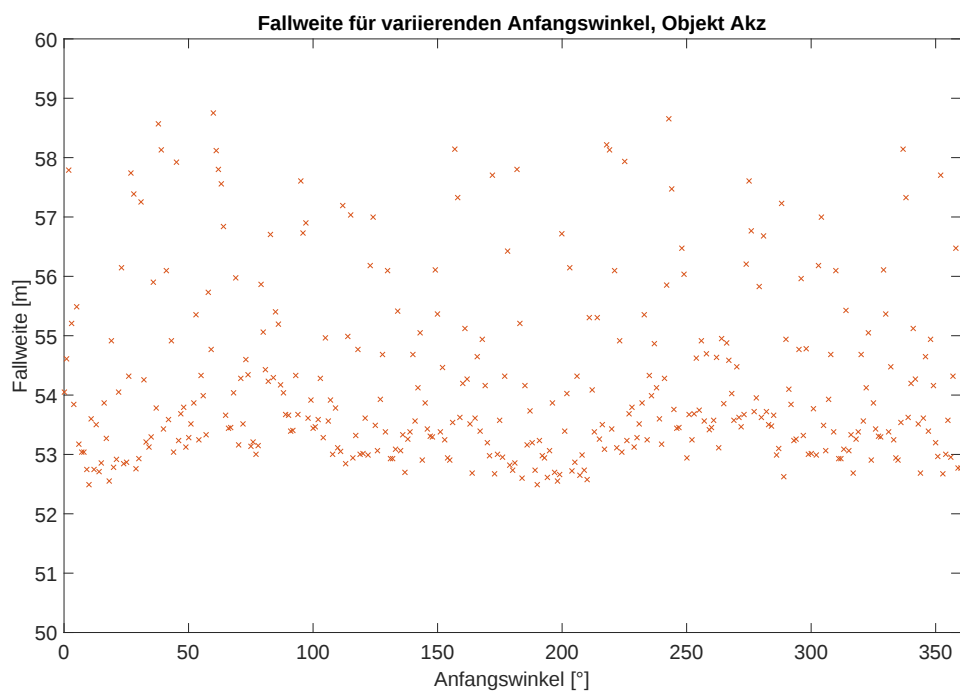


Abbildung 3.55: Variation der Fallweite mit dem initialen Winkel der fallenden Platte im Baker-Modell

Daher ist die Wahl eines Werts zwischen dem ersten und zweiten Hauptträgheitsmoment naheliegend und führt auch zu einer geringfügigen Verbesserung der Ergebnisse im Vergleich zu den experimentell ermittelten Werten. (Drapalik, 2017)

Für die Verwendung in der Simulation von Eiswurf bzw. zum Einsatz in Simulationen mit turbulenten Windfeldern (die also auch eine Komponente normal zur Hauptwindrichtung aufweisen), ist es möglich das Modell auf drei Dimensionen zu erweitern. Hierzu wird die Annahme getroffen, dass die Rotationsachse des betrachteten Körpers mit der Flugbahn in der Ebene mitdreht und somit stets normal zur Bewegungsrichtung bleibt. Dadurch können die Terme durch Funktionen des Winkels zwischen scheinbarer Geschwindigkeit in x und y-Richtung modifiziert werden, während die empirischen Gleichungen für die Widerstandskoeffizienten unverändert bleiben:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{A}{2m} \rho_L (c_D v_{x,rel} - (c_L + c_{LA}) v_z \sin \alpha) v_{rel} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{A}{2m} \rho_L (c_D v_{y,rel} - (c_L + c_{LA}) v_z \cos \alpha) v_{rel} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{A \rho_L}{2m} \left(c_D v_z + (c_L + c_{LA}) v_{y,rel} \sec \left(\alpha + \frac{\pi}{4} \right) \right) v_{rel} - g \\ \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= \frac{A l \rho_L}{2I} (c_M + c_{MA}) v_{rel}^2\end{aligned}\tag{3.26}$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{v_{x,rel}}{\sqrt{v_{x,rel}^2 + v_{y,rel}^2}} \right)\tag{3.27}$$

$$\beta = \theta + \arccos \left(\frac{\sqrt{v_{x,rel}^2 + v_{y,rel}^2}}{v_{rel}} \right)\tag{3.28}$$

$$v_{x,rel} = v_x - v_{w,x}\tag{3.29}$$

$$v_{y,rel} = v_y - v_{w,y}\tag{3.30}$$

$$v_{rel} = \sqrt{v_{x,rel}^2 + v_{y,rel}^2 + v_z^2}\tag{3.31}$$

3.8 Vergleich von Modell und Experimenten

Im Folgenden wird der Vergleich zwischen den experimentell gefundenen Fallweiten bei Großwindenergieanlagen mit dem Biswas und dem Baker Modell durchgeführt. Die Simulationen wurden für jeweils 25 Werte für die Windgeschwindigkeit entsprechend der Windgeschwindigkeitsverteilung am betreffenden Versuchstag durchgeführt. Im Biswas Modell führt das zu jeweils 25 Fallweiten. Im Baker Modell wurde die Abhängigkeit von der anfänglichen Orientierung des Probekörpers berücksichtigt, indem die Anfangsorientierung in 5° Schritten variiert wurde. Daraus ergeben sich pro Probekörper 1775 Fallweiten. Für beide Modelle wird zusätzlich der Vergleich für beide in Abschnitt 3.7 beschriebenen Möglichkeiten zur Wahl der effektiven Fläche durchgeführt.

Für den ersten Versuchstag konnte der Vergleich für 10 Probekörpertypen geführt werden. Von diesen fallen sechs Typen in die Kategorie kompakter Probekörper, zwei davon Reproduktionen natürlicher Strukturen, die übrigen vier vereinfachte Formen. Aus der Kategorie plattenähnlicher Probekörper stehen Daten für zwei gänzlich flache Probekörper, sowie für zwei dem Rotorblattprofil angeformte zur Verfügung. Abbildung 3.56 zeigt Boxplots der errechneten und gemessenen Fallweiten.

Eine genauere Betrachtung der Werte für die kompakten Probekörpertypen zeigt, dass das Baker-Modell auf Basis der maximalen Fläche die Fallweiten immer deutlich überschätzt. Das Baker-Modell auf Basis der mittleren projizierten Fläche gibt die Weiten für die Probekörper des Typs A2 und A2 Loft relativ gut wieder, im Fall der Typen M08 und M24, denen stark vereinfachte, extrudierte Raueisprofile zu Grunde liegen, werden die Fallweiten ebenfalls stark überschätzt. Das Biswas-Modell auf Basis der mittleren projizierten Fläche unterschätzt in allen Fällen die Fallweiten, jedoch nur im Fall der A2 und A2 Loft deutlich, bei den anderen kompakten Typen überlappt das obere Quartil der Simulation mit dem unteren Quartil der Messung stark. Am besten werden die kompakten Probekörpertypen durch Modellierung mit dem Biswas-Modell auf Basis der maximalen Fläche wiedergegeben. Mit Ausnahme des Typs M08 liegen die Mediane der simulierten und der gemessenen Werte immer nahe beieinander, in den meisten Fällen werden die Fallweiten leicht überschätzt.

Deutlich anders verhält es sich bei den plattenförmigen Probekörpern. Dünne Platten ohne Krümmung, Akz und Amz, werden im Modell mit maximaler Fläche sehr gut abgebildet, wie es vom Design des Modells auch zu erwarten ist. Die gekrümmten Platten hingegen werden von keinem Modell befriedigend abgebildet, was vermutlich auf das stark turbulente Verhalten der Platten zurückzuführen ist. Auch die vergleichsweise dicke Platte vom Typ Mmx kann von keinem Modell gut beschrieben werden und die Fallweite wird von allen Modellen unterschätzt.

Dem Modelldesign nach sollte das Baker-Modell mit der maximalen Fläche benutzt werden, da die zugrundeliegende Annahme von einer rotierenden Platte vernachlässigbarer Dicke ausgeht, während das Biswas Modell einen würfelförmigen Körper annimmt. Das Mitteln über die projizierte Fläche im Biswas-Modell ist insofern sinnvoll, als die Orientierung des betrachteten Körpers im Modell ignoriert wird und somit hier von einem Mittelwert ausgegangen werden kann. Im Baker-Modell hingegen variiert der Strömungswiderstandskoeffizient explizit mit der Rotation. Insofern überrascht es nicht, dass die mittlere projizierte Fläche im Baker-Modell keine brauchbaren Ergebnisse liefert, obwohl eine erstaunlich gute Übereinstimmung für die Probekörper A2, A2 Loft und C erreicht wird. Auffällig ist weiter, dass das Biswas-Modell bei den kompakten Körpern eine deutlich bessere Übereinstimmung bei Verwendung der maximalen Fläche zeigt. Diese Situation ändert sich, wenn statt $c_D = 1$ als Wert für den Strömungswiderstandskoeffizienten $c_D = 1.2$ angenommen wird. In diesem Fall werden die Ergebnissen für das Biswas Modell leicht in Richtung größerer Fallweiten verschoben, womit das Biswas Modell mit mittlerer projizierter Fläche die Fälle C2 und C2 Loft besser beschreibt (Drapalik und Bredesen, 2017).

Eine weitere Besonderheit des Baker-Modells fällt in Abbildung 3.56 auf. Bedingt durch die Abhängigkeit von der initialen Ausrichtung entsteht eine sehr große Streuung der Ergebnisse sowie eine ausgeprägte Linksschiefe der Verteilungen, der Schwerpunkt der Verteilung ist also stark in Richtung höherer Fallweiten verschoben.

Am Versuchstag 2 wurden wesentlich mehr Probekörpertypen abgeworfen. Abbildung 3.57 zeigt die abgeworfenen kompakten und plattenförmigen Probekörper, Abbildung 3.58 die zylindrischen Probekörper. Die Ergebnisse sind sehr ähnlich denen des ersten Versuchstags; die kom-

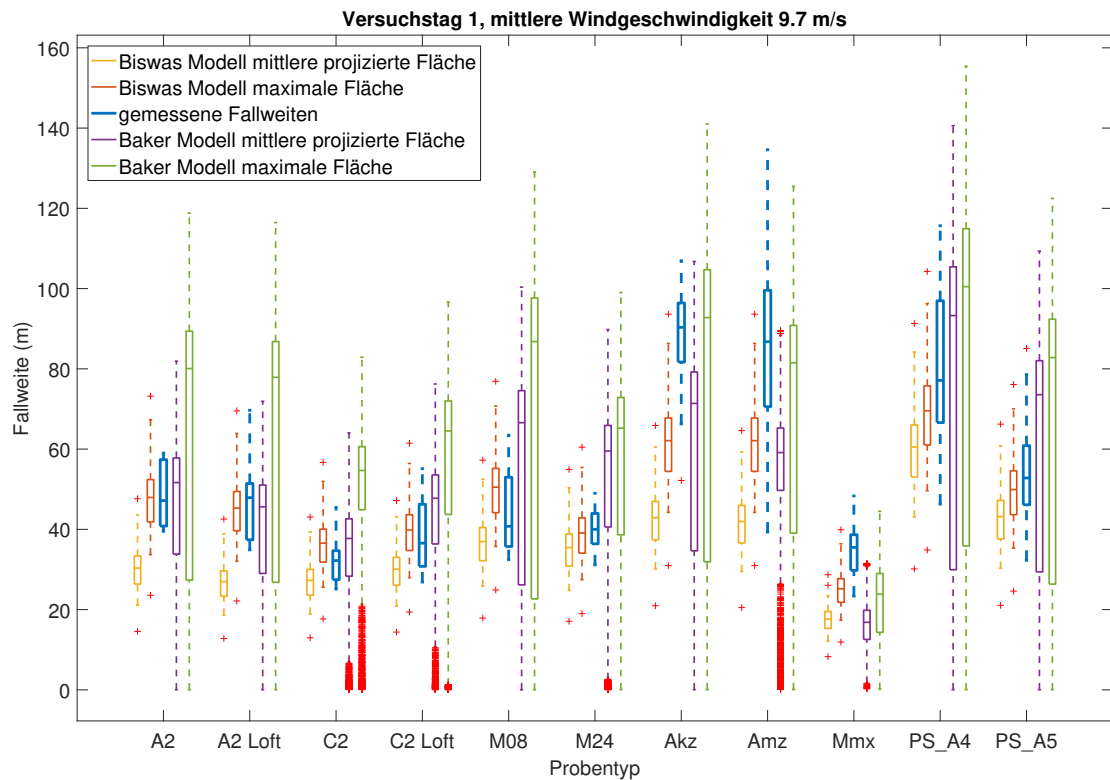


Abbildung 3.56: Vergleich zwischen Modellen und Experiment für Versuchstag 1 in Boxplots, + markieren Ausreißer.

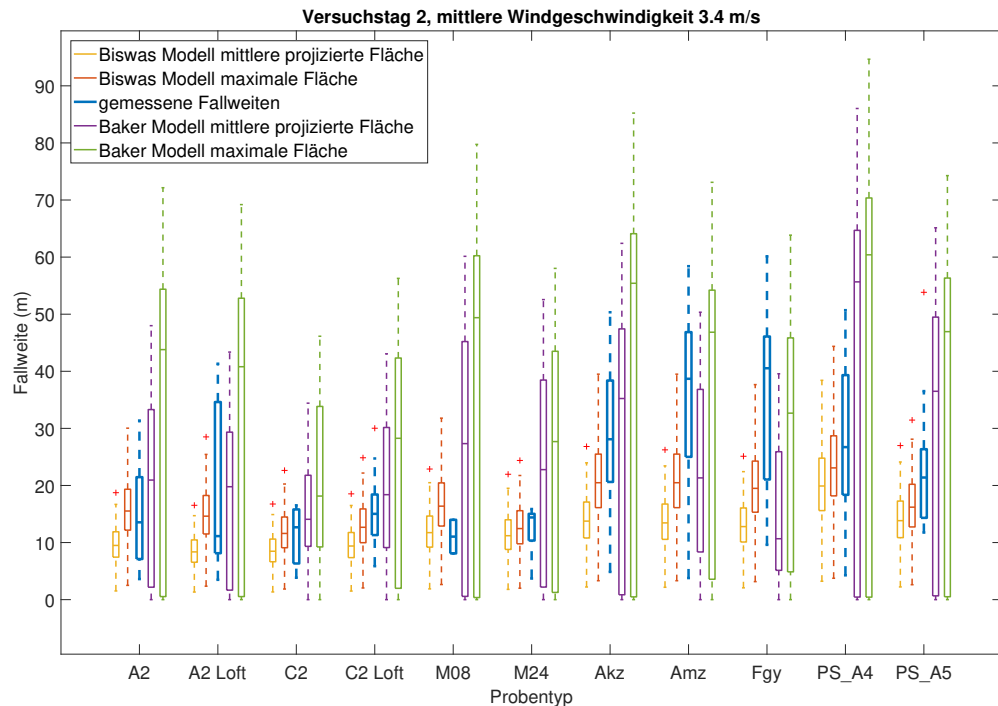


Abbildung 3.57: Vergleich zwischen Modellen und Experiment für Versuchstag 2 in Boxplots, + markieren Ausreißer.

pakten Probekörper werden vom Biswas-Modell mit maximaler Fläche am besten beschrieben, flache plattenförmige, die nun auch eine sehr große Platte mit der Bezeichnung Fgy umfassen, vom Baker-Modell mit maximaler Fläche. Die gekrümmten Platten werden wiederum durch kein Modell ausreichend beschrieben, auch die kleinen flachen Platten Akz können im Modell nicht gut reproduziert werden.

Bei den zylindrischen Probekörpern, die der sehr häufigen langen stabförmigen Vereisung an der Blattvorderkante nachempfunden sind, fällt auf, dass keines der Modelle eine gute Beschreibung der Fallweiten erlaubt. Aufgrund der generell höheren Fallweiten im Baker-Modell deckt es den Bereich der Fallweiten öfter besser ab, allerdings ist aufgrund der niedrigen Windgeschwindigkeit und der hohen Masse der Probekörper eine Auswirkung von Autorotation praktisch auszuschließen. Insbesondere bei den Probekörpern mit größerem Durchmesser und geringer Länge (Z8VK, Z8HK) wäre aufgrund der Ähnlichkeit zu kompakten Objekten eine stärkere Übereinstimmung mit dem Biswas-Modell zu erwarten. Die große Fallweite der Z8HK entzieht sich, wie schon in Abschnitt 3.4.4.3 beschrieben, einer Begründung.

Eine Auswertung der Endgeschwindigkeiten konnte nur für den Versuchstag 1 erfolgreich durchgeführt werden. Hier zeigt sich, dass nur die Probekörper des Typs Amz mit dem Baker-Modell maximaler Fläche beschrieben werden können, sowie der Typ PS A4 bei mittlerer projizierter Fläche, wobei hierbei die Fallweiten nicht übereinstimmen. Dies ist insofern problematisch, als die Endgeschwindigkeit notwendig ist für die Bestimmung der kinetischen Energie, die wiederum als Kriterium für die Risikorelevanz von Eisfragmenten eingesetzt wird. Es ist auch kein Trend zu systematischer Über- oder Unterschätzung der Geschwindigkeit zu erkennen. Zu berücksichtigen ist, dass die Messung der Endgeschwindigkeit deutlich stärker fehlerbehaftet ist

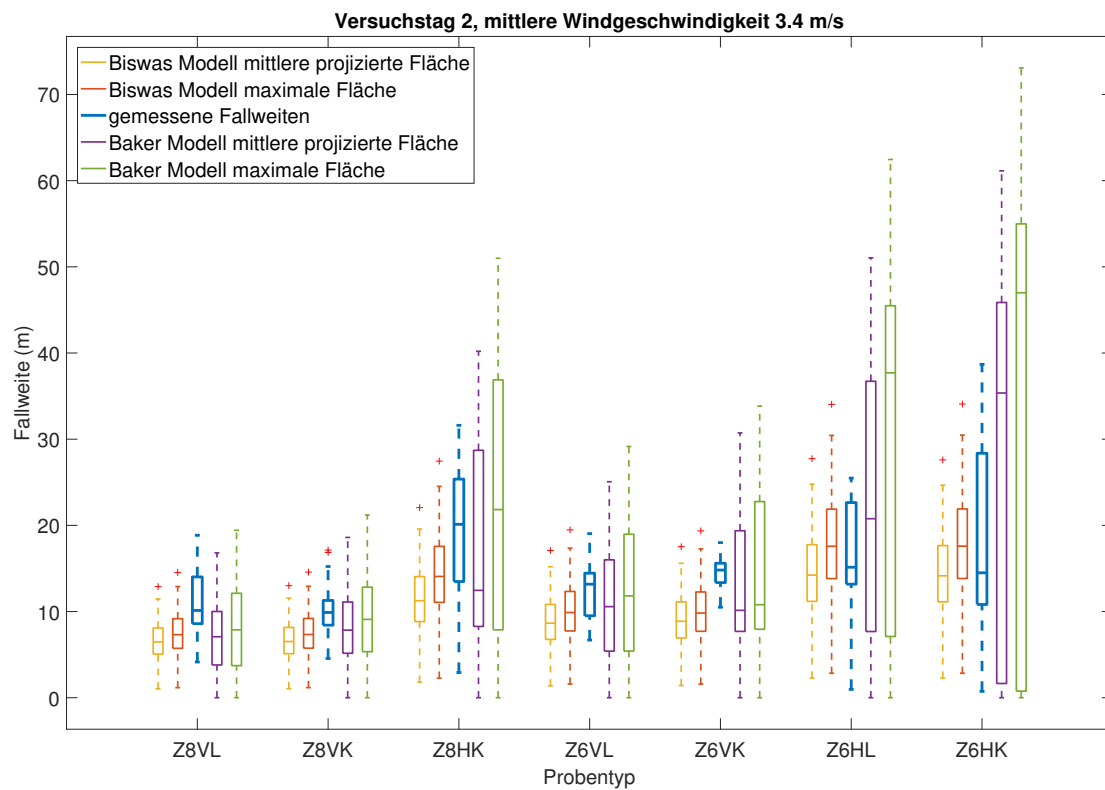


Abbildung 3.58: Vergleich zwischen Modellen und Experiment für Versuchstag 2 für zylindrische Probenkörper als Boxplots, + markieren Ausreißer.

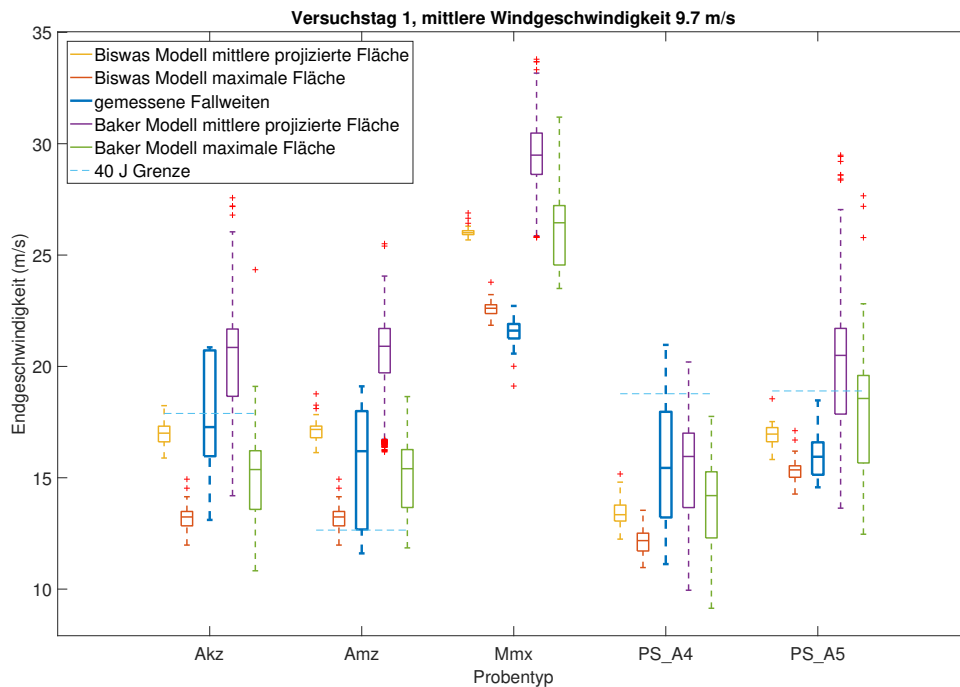


Abbildung 3.59: Vergleich zwischen Modellen und Experiment für die Endgeschwindigkeiten am Versuchstag 1. Die hellblauen Linien zeigen die 40 J Grenze für Risikorelevanz. Für den Probekörper Mmx liegt die Grenze bei ca. 7 m s^{-1} und daher nicht mehr auf der Abbildung.

als die Messung der Fallweiten, jedoch nicht in einem Ausmaß, das die Abweichung von den Modellergebnissen erklären könnte. Praktisch relevant für die Risikobewertung sind vor allem die Ergebnisse für die Typen Akz und PS A5, da hier modellabhängig relevante oder irrelevante Geschwindigkeiten gefunden werden. In den verbleibenden drei Fällen liegen die gefundenen Endgeschwindigkeiten aller Modelle sowie die gemessenen Werte überwiegend über oder unter der kritischen Geschwindigkeit. Dennoch ist die physikalische Gültigkeit der benutzten Modelle aufgrund dieser Ergebnisse fragwürdig.

3.8.1 Wurftrajektorien bei KWEA

Bei den Experimenten zum Eiswurf von KWEA konnten detaillierte Aufzeichnungen der Flugbahnen der geworfenen Probekörper gemacht werden (siehe Abschnitt 3.6.5). Da zu diesen auch die Abwurf- und Windbedingungen gut bekannt sind, wurde hierfür ein Vergleich von modellierter Flugbahn und Experiment durchgeführt.

Bei der Betrachtung der Wurfweite zeigt sich, dass die Modellrechnungen zumindest 10% höhere Wurfweiten liefern als das Experiment (siehe Abbildung 3.60). Aus Sicht von Sicherheitsbetrachtungen wäre dies eine akzeptable Überschätzung, jedoch kommt es in einigen Fällen auch zu wesentlich höheren Werten.

Weiters zeigt sich bei Betrachtung der Trajektorien aus der Vogelperspektive, dass der Einfluss des Windes vom Modell in einigen Fällen deutlich unterschätzt wird (siehe Abbildung 3.61).

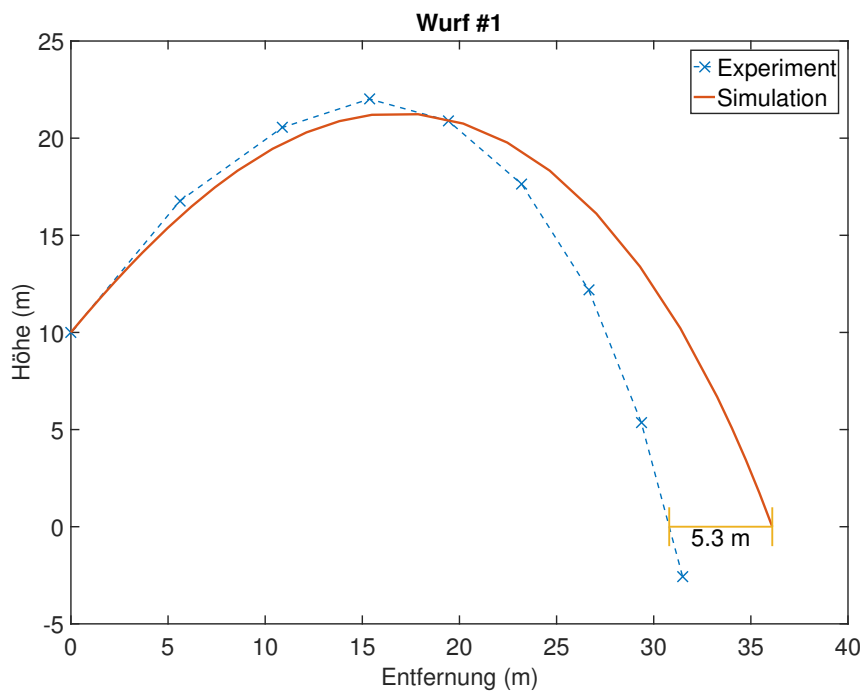


Abbildung 3.60: Vergleich zwischen *Experiment* und *Simulation* für die Wurfweite zur Höhe. Die *Simulation* überschätzt die Wurfweite um ca. 17%.

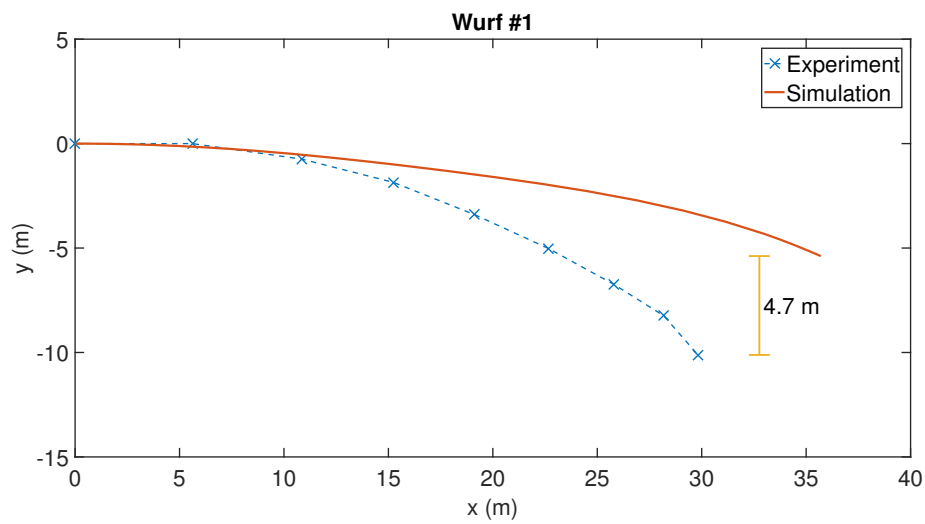


Abbildung 3.61: Vergleich zwischen *Experiment* und *Simulation* für Bewegung längs (in Richtung negativer y-Achse) und quer zum Wind. Die *Simulation* unterschätzt den Einfluss des Windes deutlich.

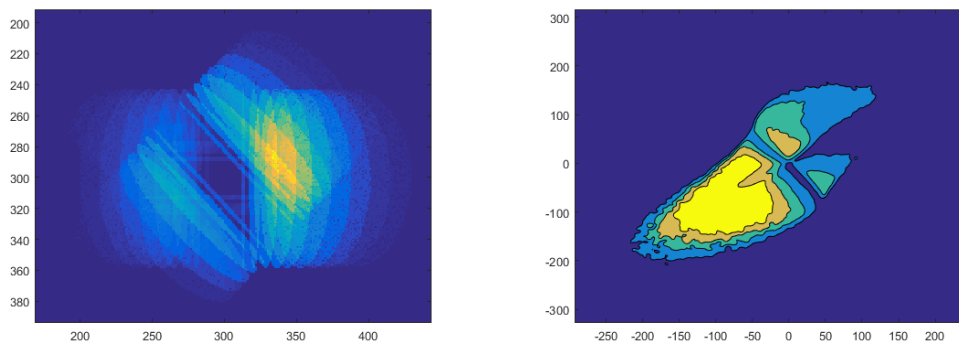
3.9 Vergleich mit bestehenden Studien zu Eiswurf

Gegenwärtig sind zwei größere Studien zum Thema Eiswurf von WEA verfügbar. Meteotest hat über mehrere Jahre an zwei Standorten ca. 1.000 Eisfragmente gesammelt und Gewicht und Wurfweite aufgenommen (Cattin u. a., 2016). Pöyry hat in einer unabhängigen Kampagne 532 Fragmente auf ähnliche Weise aufgenommen (Lunden, 2017). Der Vergleich der beobachteten Wurfweiten bei Pöyry und meteotest zeigt, dass diese qualitativ große Ähnlichkeit aufweisen. Von diesen zwei Studien wurden nur von Pöyry detaillierte Daten publiziert. Insbesondere wird in diesem Fall der Vergleich mit Berechnungen aus einem Eiswurfmodell gezeigt. Das eingesetzte Modell entspricht dem von Morgan u. a. (1997) und überschätzt die Wurfweite der weitesten 1% der Eisfragmente um 25% im Vergleich mit den gefundenen Fragmenten. Auch die Verteilung der Wurfweiten entspricht den empirischen Daten nur sehr eingeschränkt, da das Maximum der Wurfweiten in der Simulation doppelt so hoch ist, wie jenes aus dem Monitoring. Im Sinne einer Sicherheitsabschätzung sind die eingesetzten Modelle für Eiswurf aufgrund der durchgeführten Beobachtungen als konservativ anzusehen. Einschränkend wirkt jedoch, dass keine Angaben über die Dichte der Eisfragmente gemacht wurden, also nicht bekannt ist, wie hoch der Anteil an Klareis ist, das potenziell größere Wurfweiten erwarten lässt. Im Gespräch mit den Ausführenden der Studie ergab sich, dass die maximalen Wurfweiten bei Klar- und Raueis ähnlich waren, bei Klareis aber ein größerer Anteil im Bereich zwischen ein und zwei Rotorradien zu liegen kam.

3.10 Simulation

Zur Simulation der Fallweiten und damit der Berechnung einer Risikometrik in der Umgebung von WEA sind mehrere Schritte erforderlich.

Zu Beginn wird ein Satz von Punkten, von denen Eis abfällt, generiert. Hierzu werden Rotorblattlänge R und Turmhöhe H benutzt, ggf. auch die Rotorneigung und der Abstand des Rotors vom Turmmittelpunkt. Zusätzlich wird die Eismengenverteilung auf dem Rotorblatt festgelegt. Hierzu kann ein statisches Modell, wie z.B. Gleichverteilung oder lineare Zunahme nach außen, benutzt werden, oder Werte aus meteorologischen Modellen. Bei der Verteilung der Abwurfpunkte in der Rotorebene ist es sinnvoll, diese entlang des Rotorblattes zu verteilen und dann eine Gleichverteilung für die möglichen Rotorblattwinkel zu benutzen, da üblicherweise die Rotorstellung zufällig ist. Bei der Wahl der Dichte der Punkte ist zu beachten, dass aufgrund der Genauigkeit der Modelle eine höhere minimale Dichte als ein Punkt pro Quadratmeter nicht sinnvoll ist. Daraus ergibt sich, dass die minimale sinnvolle Winkelauflösung $\alpha = \arcsin \frac{1}{R}$ beträgt. Dies ist wichtig für die Überlegung der Gesamtzahl an Punkten. Eine praktisch sinnvolle Annahme für die Verteilung von Eis am Rotorblatt ist eine gleichmäßige Verteilung auf den äußeren zwei Dritteln des Blattes. Dies spiegelt die Annahme einer linearen Zunahme der Eismenge pro Einheit Kantenfläche mit der Länge wider, sowie die Abnahme der Fläche nach außen hin. Unterschiede in der Eisgröße werden in diesem Fall ignoriert und erst durch die Verwendung von Berechnungen für verschiedene Eistypen berücksichtigt. Bei diesem Ansatz ergeben sich pro Windgeschwindigkeit und Richtung $\frac{4\pi R}{3 \arcsin 1/R}$ Punkte zur Simulation, bei einer Rotorblattlänge von 70 m entspricht dies ca. 2000 Punkten. Selbstverständlich ist es sinnvoll anstatt regelmäßiger Punktabstände zufällige mit der passenden Verteilung zu verwenden.



(a) Beispiel für zu niedrig gewählte Auflösung für Windgeschwindigkeit und Windrichtung in der Simulation. (b) Beispiel für sinnvoll gewählte Auflösungen.

Abbildung 3.62: Beispiele für Risiko-Flächen bei unterschiedlichen Auflösungen. Die Grafiken dienen der qualitativen Darstellung, Achsen daher in beliebigen Einheiten.

Da angenommen werden darf, dass der Rotor immer in Richtung des Windes ausgerichtet ist, sind Rotorebene und Windrichtung direkt voneinander abhängig. Daher ist es sinnvoll auch die Windrichtungen und damit die Rotorebene zufällig zu wählen. Somit wird jeder Simulationspunkt über seine radiale Position am Rotor, die Rotordrehung und die Drehung der Rotorebene festgelegt.

Weiters muss eine Verteilung von Windgeschwindigkeiten und Richtungen festgelegt werden. Dazu werden idealerweise ein für den Standort bekanntes Windrichtungsprofil (Satz gemessener Werte oder Parameter einer Weibull-Verteilung) sowie eine Windrichtungsverteilung für Tage nach erfolgtem Eisansatz herangezogen. Bei unbekannter oder wenig ausgeprägter Windrichtungsverteilung kann auch nur eine Windrichtung benutzt und das Ergebnis entsprechend richtungsunabhängig angenommen werden. Zur Verwendung mit den zuvor generierten Punkten ist es sinnvoll die Parameter der jeweiligen Verteilungen so zu interpolieren, dass für eine beliebige Windrichtung eine Geschwindigkeit und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens gefunden werden. Alternativ kann auch bei der Rotorebenen-Winkelgenerierung die Windrichtungsverteilung berücksichtigt werden. Eine ausreichend hohe Auflösung bei der Wahl der Richtungen und Geschwindigkeiten ist wichtig, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Ein Beispiel für eine zu niedrige Auflösung ist in Abbildung 3.62a zu sehen.

Zusätzlich ist zwischen verschiedenen möglichen Datensätzen abzuwägen. Meist stehen Windmessungen nur für ein Jahr detailliert zur Verfügung, wenn diese im Zuge der Standortbewertung durchgeführt wurden. Dadurch kann insbesondere die Häufigkeit von Vereisung schlecht eingeschätzt werden, da starke Unterschiede zwischen einzelnen Jahren bestehen. Seltene Ereignisse können gar nicht erfasst werden. Alternativ kann auf die langjährigen Messserien des Messnetzes der ZAMG zurückgegriffen werden, die jedoch nur eine geringe räumliche und zeitliche Auflösung bieten. Die Verwendung beider Datensätze ist meist wirtschaftlich unattraktiv, würde aber zu optimalen Ergebnissen führen.

Die Auswirkung der Windrichtungsverteilung nach Eisansatz ist für Sicherheitsüberlegungen von großer Bedeutung. Wie in Abbildung 3.65 zu sehen ist, führen ausgeprägte Richtungsverteilungen zu stark eingeschränkten Risikobereichen.

Da davon ausgegangen werden kann, dass viele der generierten Punkte zu keinen risikorelevanten Eisfragmenten führen, d.h. Trajektorien deren Endgeschwindigkeit zu niedrig ist, ist ein Minimum von 1 Mio. Simulationen sinnvoll. Für jeden Punkt ist die Fallweite entsprechend des gewählten Modells zu generieren und auf Risikorelevanz zu prüfen. Die so generierten relevanten Punkte können dann aufgetragen werden. Zur weiteren Verwendung ist dann ein Rastern der Daten sinnvoll, wobei die Wahrscheinlichkeitswerte der zugehörigen Punkte aufsummiert werden. Sind alle Punkte risikorelevant, so ergibt die Summe der Wahrscheinlichkeiten über alle Punkte 1, ansonsten den Anteil der risikorelevanten Trajektorien in der Simulation. Das Raster kann ggf. geglättet werden, wobei auf die Erhaltung der Gesamtsumme der Wahrscheinlichkeiten geachtet werden muss. Ein Beispiel für ein solches Ergebnis ist in Abbildung 3.62b zu sehen.

Ein alternativer Ansatz ist die Verwendung der experimentell ermittelten Verteilungen und lineare Anpassung entsprechend Windgeschwindigkeit und Höhe. Vorteile sind hier hohe Geschwindigkeit, da ganze Verteilungen statt einzelner Punkte aufgetragen werden, sowie unmittelbarer Bezug zu real gemessenen Daten. Nachteilig ist die eingeschränkte Gültigkeit der Skalierung, sowie die vergleichsweise geringe Anzahl von Messungen, auf die zurückgegriffen werden kann.

Da sich, wie in Abschnitt 3.8 beschrieben, keines der verfügbaren Modelle eignet, um eine verlässliche Risikoabschätzung für eine WEA durchzuführen, wurde auf die Berechnung eines konkreten Beispiels verzichtet. Dennoch ist das gezeigte Vorgehen prinzipiell anwendbar, sobald ein valides Modell vorliegt. Es ist weiters festzuhalten, dass bisherige Simulationen meist auf eine ebene Fläche oder eine Fläche mit konstanter Neigung in den Umgebung der WEA beschränkt sind. Dies ist auch für die meisten betrachteten Standorte ausreichend, da die bisher verbauten günstigen Lagen meist auch eine einfache Topographie aufweisen. Bei künftigen Projekten in komplexerer Umgebung, wie z.B. alpinen Lagen werden Simulationen notwendig, die umfangreichere Fähigkeiten besitzen. So wird eine detailliertere Simulation der Windbedingungen notwendig, um Turbulenzen, die Eisfragmente deutlich abbremesen können, abzubilden. Weiters muss die gesamte Trajektorie eines Eisfragmentes verfolgt und der Zusammenstoß mit vorhandenen Strukturen überwacht werden. Insbesondere bei Rechnungen für Kleinwindkraft im urbanen Raum wird diese komplexere Simulation notwendig.

3.10.1 Simulation von Eiswurf

Das Vorgehen zur Simulation von Eiswurf ist analog zu jenem für Eisfall. Es ist jedoch zusätzlich zur Rotorblattposition noch die Geschwindigkeit des Rotors zu berücksichtigen. Hierzu kann aus den technischen Spezifikationen einer Anlage die Winkelgeschwindigkeit des Rotors abhängig von der Windgeschwindigkeit $\omega(v_w)$ abgeleitet werden. Bei Wind aus positiver Richtung der x-Achse ergibt sich die Initialgeschwindigkeit v_i eines Eisfragmentes mit Abstand R von der Rotornabe und dem Winkel φ des Rotorblattes damit zu:

$$v_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \varphi \\ -\cos \varphi \end{pmatrix} \omega(v_w) R$$

Die Rotorneigung muss ggf. zusätzlich berücksichtigt werden. Im Unterschied zu Eisfall erfolgt bei Eiswurf die Bewegung der Fragmente überwiegend normal zur Windrichtung, was sich in den deutlich anderen Verteilungsmustern widerspiegelt.

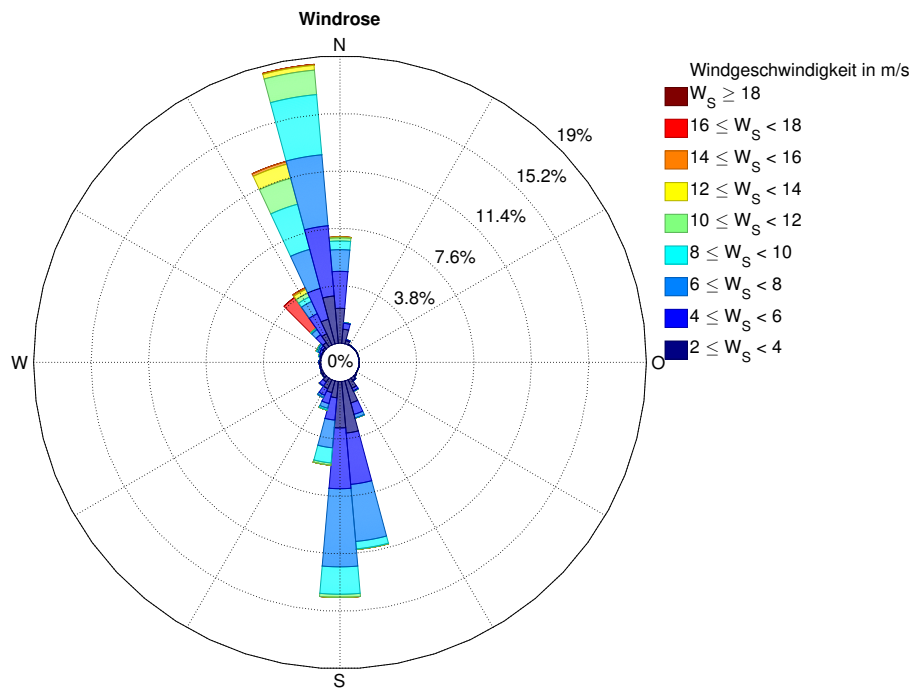


Abbildung 3.63: Windrose für Windverhältnisse während und bis zu eine Stunde nach möglicher Vereisung in Lichtenegg für den Winter 2016/17. Während der relevanten Zeit treten überwiegend Winde aus Norden oder Süden auf, eine Häufung hoher Geschwindigkeiten findet sich aus Nordwesten.

Obwohl auch bei Eiswurf die benutzten Modelle unzureichend sind, wurden Simulationsrechnungen für Eiswurf von KWEA am Beispiel des Standorts Lichtenegg durchgeführt. Dazu wurden Perioden, in denen Vereisung möglich ist, bestimmt, indem für den Winter 2016/17 jene Zeiten gewählt wurden, in denen die Temperatur unter 0°C und die relative Luftfeuchtigkeit über 90% lag. Hierbei wurden Vereisungszeiten mit einem Abstand von unter einer Stunde zu einem einzelnen Ereignis zusammengezogen und Ereignisse mit einer Dauer von unter 20 min ignoriert. Weiters wurde für die Windverteilung angenommen, dass Eiswurf noch bis zu einer Stunde nach einem Vereisungsereignis möglich ist. Abbildung 3.63 und Abbildung 3.64 illustrieren die Windverhältnisse während der so bestimmten 62 Vereisungsereignisse. Bei diesen ist auffällig, dass während und nach der Vereisung überwiegend Wind aus Nord oder Süd vorherrscht, Wind aus West oder Ost kommt kaum vor. Außerdem fällt starker Wind aus Nordwest auf, der sich auch deutlich im Windhistogramm durch eine Spitze bei 16 m s^{-1} auswirkt.

Zur Berechnung der Fallweiten wurde nur ein Probekörpertyp herangezogen, der vereinfachte Raueis-Probekörper mit der Bezeichnung ICL. Auf eine Berechnung der erwarteten Eismenge wurde verzichtet, jedoch ist dies durch eine Abschätzung des möglichen Ansatzes, z.B. durch Annahme einer Vereisung von zwei Dritteln jedes Rotorblattes bei jedem Vereisungsereignis, und entsprechender Umrechnung der sich ergebenden Frequenzen leicht nachträglich möglich. Zur Simulation wurde das Biswasmodell in einer Monte-Carlo-Simulation mit 1,000,000 simulierten Eiswürfen benutzt. Von allen Würfeln erreichen 10.2% die notwendigen 40 J Aufprallenergie, um als risikorelevant eingestuft und damit weiter berücksichtigt zu werden. Die einzelnen errechneten Wurfpositionen wurden in ein Raster mit einer Weite von 0.5 m sortiert und aus dieser Dichteverteilung eine Trefferfrequenz abgeleitet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.65 dargestellt.

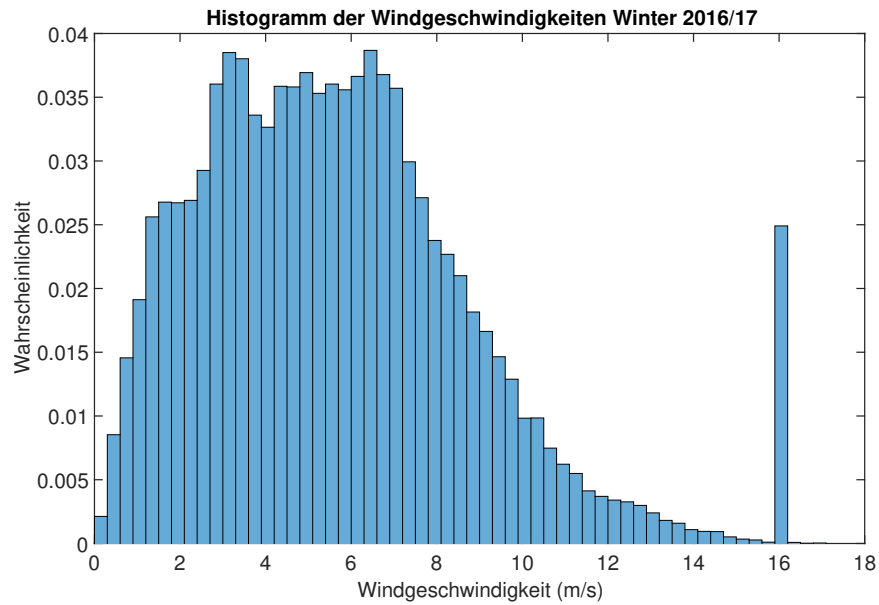


Abbildung 3.64: Histogramm der Windgeschwindigkeiten während und bis zu eine Stunde nach möglicher Vereisung in Lichtenegg für den Winter 2016/17. Während der Großteil der gemessenen Werte einer Weibullverteilung folgt, findet sich eine Häufung von Messwerten bei 16 m s^{-1} .

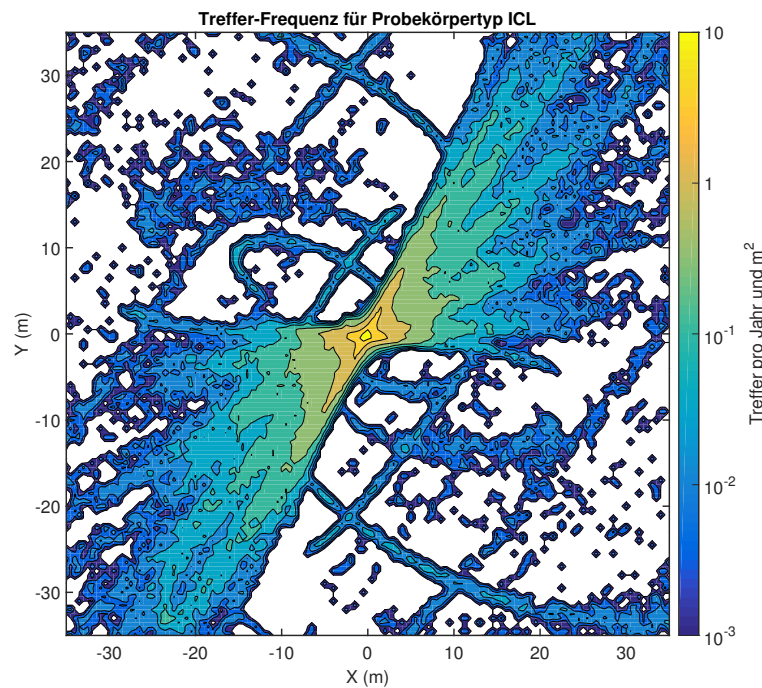


Abbildung 3.65: Beispiel für Risikoflächen bei Eiswurf von einer KWEA in 16 m Höhe für einen Typ von Eisfragment. Die Anlage befindet sich im Ursprung der Darstellung, der Einfluss der ausgeprägten Windrichtungsverteilung ist deutlich erkennbar.

Hier ist nochmals hervorzuheben, dass die Darstellung nur zur Illustration dient und nicht das tatsächliche Risiko darstellt. Dazu müssten die Verteilungen für verschiedene Probekörpertypen kombiniert und die Gesamtzahl der Eiswürfe entsprechend der Vereisungshäufigkeit angepasst werden.

4 Techniken zur Vereisungsprävention und zur Enteisung

Schließlich ist die Frage zu stellen, ob Probleme durch Vereisung vermieden oder reduziert werden können. Hier bieten sich neben anderen Verfahren, wie z.B. Beheizung, eisabweisende Oberflächenbeschichtungen an. Der größte Vorteil von Beschichtungen liegt, darin, dass sie als passive Maßnahme keiner Strategie für den Einsatz und keiner Eisdetektion bedürfen. Beim Funktionsprinzip von Beschichtungen können, wie in Abschnitt 2.4.4 und Abschnitt 2.5 beschrieben, verschiedene Ansätze verfolgt werden. Da alle aber auf der spezifischen Gestaltung der Oberfläche (z.B. Superhydrophobie) basieren, führen Beschädigungen derselben zu einer Abnahme der Schutzwirkung der Beschichtungen. Daher ist es von Interesse, Verfahren zur Überprüfung des Zustandes derartiger Beschichtungen zu entwickeln.

4.1 Vergleich

Eine Übersicht über die existierenden Verfahren mit ihren grundsätzlichen Vor- und Nachteilen wurde bereits im Abschnitt 2.4 gegeben. Es sollen jetzt verbreitete Verfahren herausgegriffen und miteinander verglichen werden.

Die höchste Verbreitung haben zwei aktive Verfahren zur Beheizung, das elektrothermische und jenes mit Heißluft. Beide können sowohl zur Vereisungsprävention bzw. -reduktion, als auch zum Enteisen eingesetzt werden. Zum Enteisen wird die WEA angehalten und die Rotorblätter werden erwärmt, bis das akkumulierte Eis abfällt. Wenn es die Rechtslage zulässt, ist ein Anfahren der Anlage bei unvollständiger Enteisung möglich und führt oft zum Abfallen oder -werfen des verbliebenen Eises. Aufgrund des Stillstandes während des Enteisens kommt es zu Ertragsverlusten, zusätzlich zum Energieverbrauch des Heizsystems. Dennoch ist es zum Enteisen sinnvoll, die Anlage außer Betrieb zu nehmen, da die zusätzliche Abkühlung durch die Rotation das Abtauen verzögert oder gänzlich unmöglich macht. Unabhängig davon würde Enteisen bei drehendem Rotor zu ausgeprägtem Eiswurf führen.

Zur Vereisungsprävention können Heizsysteme noch vor Beginn des Vereisens der Rotorblätter in Betrieb genommen werden. Im Idealfall wird dadurch die Blatttemperatur auf über 0 °C gehoben und es kommt nicht zur Vereisung. Bei starkem Wind und/oder sehr niedrigen Temperaturen ist jedoch das Heizsystem nicht ausreichend leistungsfähig, um das Anfrieren zu verhindern. In diesen Fällen bildet sich vergleichsweise langsam eine Eisschicht, meist mit signifikantem Klareisanteil. Dies liegt an der Strategie, die Vorderkante stärker zu beheizen, als den Rest des Rotorblattes. Dadurch kann Wasser Richtung Hinterkante fließen und bei entsprechenden Temperaturen dort frieren, was die Aerodynamik des Rotorblattes stark negativ beeinflusst. Da kein anerkanntes Detektionsverfahren derzeit die Eisbildung während des Betriebs eines Heizsystems detektieren kann (wobei vielversprechende Systeme in der Testphase sind), wird dies in Österreich wegen der Gefahr von Eiswurf derzeit als Hindernis für

eine Genehmigung gesehen. Die Effizienz und Effektivität von Vereisungsprävention ist sehr stark von zuverlässigen Vorhersagen für Vereisungsbedingungen abhängig. Verglichen mit De-Icing ist mit einem ca. um den Faktor 3 erhöhten Leistungsbedarf für Eispräventionssysteme zu rechnen. Elektrothermische Systeme benötigen eine tendenziell niedrigere Leistung, da diese gezielter eingesetzt wird; der Leistungsbedarf für Vereisungsprävention liegt hier bei etwa 100 kW pro Anlage (WicetecLtd., 2016). Heißluftsysteme werden in mit tendenziell etwas höheren Leistungen installiert, wobei der Hersteller Enercon im Leistungsbedarf nicht zwischen Prävention und Enteisen unterscheidet. (Albers, 2011)

Elektrothermische Systeme wurden erstmals 1992 von VTT Finland entwickelt und nutzen Heizdrähte und Kohlefasern. 1996 wurde erstmals mit organischen Heizelementen gearbeitet. Derzeit ist eine Vielzahl von Systemen, sowohl von WEA-Herstellern als auch von Drittanbietern verfügbar. Der Einbau erfolgt teilweise durch Einlaminieren während der Herstellung, teilweise werden die Heizelemente im Inneren des Rotorblattes aufgeklebt. Die Dauer des Enteisens variiert sehr stark zwischen etwa 20 min und mehreren Stunden, je nach Leistung, Umweltbedingungen und Steuerverfahren. (Battisti, 2015)

Heißluftsysteme werden seit 1996 von Enercon angeboten. Aufgrund der Patentbeschränkungen bietet bis jetzt kein anderer Hersteller dieses Verfahren an. Neben dem offensichtlichen Vorteil der Blitzschlagsicherheit, ist dieses Verfahren wesentlich aufwändiger und weniger effektiv als elektrothermische. Dies liegt daran, dass die notwendige Leistung in Form heißer Luft konzentriert an der Blattwurzel erzeugt und mit Hilfe von geeigneten Rohrleitungssystemen zur Vorderkante und nach außen transportiert werden muss. Der hohe thermische Widerstand der vorwiegend aus glas- oder kohlefaserverstärktem Kunststoff bestehenden Rotorblätter ist ein weiteres Hindernis für dieses System. Die minimale Einsatztemperatur wird unterschiedlich eingeschätzt, liegt aber vermutlich nicht unter 6 °C. (Battisti, 2015) Neuere Konzepte sehen eine Kombination aus Heizmatten für den aus Stahl gefertigten Teil zweiteiliger Rotorblätter vor, während der aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigte Teil weiterhin mit Heißluft erwärmt wird (Jonsson, 2012).

Studien zur Evaluierung der Effizienz des Enteisens und der Vereisungsprävention liefern variierende Ergebnisse. Albers (2011) findet einen Netto-Gewinn an produzierter Energie während des Winters von 22-45%, während Kolar (2015) feststellt, dass unter ungünstigen Bedingungen gar kein Gewinn durch das System zu erwarten ist. Dies ist vor allem an Standorten mit wenigen Vereisungstagen der Fall, da das Präventionssystem oft betrieben wird, wenn keine oder nur sehr geringe Vereisung stattfindet.

Beschichtungen zur Reduktion des Eisansatzes bzw. zum gänzlichen Verhindern desselben werden von vielen verschiedenen Herstellern in verschiedenen Formen angeboten. Derzeit ist zu keinem dieser Systeme ein Testbericht, der die Effizienz und Beständigkeit der Beschichtungen zeigen würde, verfügbar. Die Herstellung eisabweisender Beschichtungen ist grundsätzlich möglich und die entsprechenden Oberflächen erreichen im Labor sehr gute Ergebnisse. Eine wesentliche Schwierigkeit besteht darin, dass durch die hohe Blattspitzengeschwindigkeit der WEA starke Erosion vor allem an der Blattvorderkante auftritt, an der auch Vereisung am häufigsten auftritt (Siegmann u. a., 2006). Das bedeutet, dass Beschichtungen entweder eine sehr hohe Beständigkeit aufweisen oder einfach zu reparieren bzw. auszutauschen sein müssen. Hierbei kommt hinzu, dass die Zeiträume für Servicearbeiten an vielen vereisungsstarken Standorten, wie z.B. alpinen Standorten, sehr kurz sind. Beschichtungen mit exzellenten eisabweisenden Eigenschaften basieren derzeit meist auf Mikro- oder Nanostrukturierung der Oberfläche um superhydrophobe Eigenschaften zu erreichen. Das hat zur Konsequenz, dass die

Leistungsfähigkeit dieser Beschichtungen von der Unversehrtheit der Oberfläche abhängig ist und dass aufgrund der komplexen Strukturen schnelle Reparaturen praktisch unmöglich sind. Gleichzeitig steht die Abnahme der superhydrophoben Eigenschaften nicht notwendigerweise in linearem Zusammenhang mit der Erosion der Oberfläche. Es ist eher davon auszugehen, dass eine kritische Schwelle erreicht werden muss, ab der Wassertropfen in signifikanter Menge anhaften können. Dies ist zusätzlich abhängig von den Bedingungen, wie Geschwindigkeit und Temperatur, unter denen die Wassertropfen auftreffen.

Eine Kombination von Beschichtungen mit anderen Verfahren wie Beheizung ist ebenfalls möglich, wurde aber bisher kaum untersucht.

4.2 Testverfahren für Oberflächenbeschichtungen

Aufgrund der schwer einschätzbaren Beständigkeit von Beschichtungen ist es sinnvoll, ein Verfahren zu entwickeln, das die kontinuierliche Überprüfung der Eigenschaften in-situ erlaubt. Bei dem Design des Verfahrens ist zu berücksichtigen, ob direkte oder indirekte Messverfahren verfolgt werden.

4.2.1 Oberflächenspannung

Die Benetzungsfähigkeit bzw. der Kontaktwinkel der Oberfläche ist durch die Messung der Oberflächenspannung direkt zugänglich. Dazu sind wiederum zwei Prinzipien geeignet. Eines ist die optische Messung des Kontaktwinkels einer Flüssigkeit mit bekannter Oberflächenspannung auf der zu untersuchenden Oberfläche. Dazu wird gezielt ein einzelner Tropfen auf eine eben montierte Fläche aufgebracht und durch Vermessung eines Bildes des Tropfens der Kontaktwinkel direkt bestimmt. Zur Bestimmung des Rückzugskontaktwinkels kann ein Teil des Tropfens durch eine Nadel wieder zurückgezogen werden.

Ein weiteres Verfahren, das bei geringen Genauigkeitsansprüchen einsetzbar ist, ist das Aufbringen von Flüssigkeiten mit unterschiedlicher, bekannter Oberflächenspannung auf die zu untersuchende Fläche. Liegt die Oberflächenspannung der Flüssigkeit über jener der Oberfläche, kommt es zur Ausbildung von Tropfen. Sind die Spannungen ca. gleich groß oder die Spannung des Tropfens niedriger, so wird die Oberfläche benetzt. Durch sukzessives Verwendung von Flüssigkeiten mit abnehmender Oberflächenspannung kann so die Oberflächenspannung des zu untersuchenden Körpers bestimmt, und daraus der Kontaktwinkel zu Wasser bestimmt werden. (Korhonen u. a., 2013)

Diese Verfahren sind in den meisten Fällen für die Bestimmung der Oberflächenspannung und damit des Kontaktwinkels und der Benetzbarkeit ausreichend. Jedoch zeigt sich bei genauerer Betrachtung, dass der Unterschied zwischen polarem und dispersivem Anteil der Oberflächenspannung ebenfalls berücksichtigt werden muss. Der polare Anteil entsteht aus der Interaktion dipolarer Moleküle an den Oberflächen, sowie von Wasserstoffbrückenbindungen. Der disperse Part entsteht durch die London-Kraft, auch bekannt als Van der Waals-Kraft im engeren Sinne, durch die spontane Polarisierung unpolarer Teilchen und die dadurch induzierten Dipole. Differieren die Anteile von polarer und dispersiver Oberflächenspannung, so kommt es zu keiner Benetzung, auch wenn die Summe der Kräfte dafür ausreichen würde. (Wu, 1973; Owens und Wendt, 1969)

Bei der Messung der Oberflächenspannung zur Überprüfung von eisabweisenden Oberflächen ist zu bedenken, dass dieses Testverfahren nur geeignet ist für Oberflächen, die das Anhaften des Wassers noch vor dem Frieren verhindern sollen. Nach dem Anfrieren ist die Voraussetzung für die weitere Gültigkeit des Verfahrens, dass einerseits kein Eindringen von Eis in Oberflächenstrukturen erfolgt ist, und andererseits, dass die Oberflächenspannung zwischen Oberfläche und Eis dieselbe ist, wie jene zwischen Oberfläche und Wasser. (Makkonen, 2012)

4.2.2 Oberflächenrauigkeit

Viele Beschichtungsverfahren beruhen auf der Strukturierung der Oberfläche um Superhydrophobie zu erreichen. Daher ist eine Veränderung der Oberflächenrauigkeit ein Hinweis auf eine Degradation der Oberfläche. Die Messung der Oberflächenrauigkeit ist mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand möglich und kann mithilfe von Profilometern erfolgen. Diese verwenden entweder mechanische Verfahren wie das Abtasten mit einer Diamantnadel, oder optische, wie z.B. die Messung der De-Fokussierung eines Laserstrahls, der normal auf die Oberfläche gerichtet wird. Weitere Möglichkeiten beruhen auf Interferometrie, wie z.B. holographische Mikroskopie, oder auf der Verzerrung projizierter Muster. Bei allen Verfahren abseits von Rastertunnelmikroskopie sind Auflösungen im Nanometerbereich schwer erreichbar. Da die meisten derzeit verfügbaren Strukturierungen im Mikrometerbereich liegen, stellt dies nur für wenige Verfahren ein Hindernis dar.

Eine Schwierigkeit in der Verwendung der Oberflächenrauigkeit als Charakterisierungsmerkmal liegt darin, dass viele verschiedene Messgrößen in diesem Zusammenhang benutzt werden können, und der Einfluss veränderter Rauigkeit nicht genau bekannt ist. Einige mögliche Maße sind arithmetisches oder quadratisches Mittel der Oberflächenhöhe, größte Vertiefung, stärkste Erhöhung oder Differenz derselben sowie der Abstand zwischen den beiden.

Momen u. a. (2015) konnten zeigen, dass Schäden an der Nanostrukturierung einer Oberfläche zur Abnahme des Kontaktwinkels führen. Weiters konnte gezeigt werden, dass die Wirkung der Strukturierung stark von den Vereisungsbedingungen abhängt. Im untersuchten Beispiel nahm die Reduktion der Adhäsionskraft mit der Zunahme des mittleren Volumen-Durchmessers (MVD) und des Flüssigwassergehalts (LWC) der Luft vom Faktor 3.5 auf 1 ab. Außerdem ist zu bemerken, dass bei den in dieser Arbeit getesteten Oberflächen kein Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Adhäsionskraft bestand.

Die Messung der Oberflächenrauigkeit als Verfahren zur Qualitäts- und Beständigkeitskontrolle von Beschichtungen ist daher grundsätzlich denkbar, verlangt aber nach umfangreichen Messungen zur Auswahl einer geeigneten Charakterisierung und um den Zusammenhang zwischen den gewählten Größen und der Adhäsionskraft des Eises festzulegen.

4.2.3 Adhäsionskraft

Direkte Messung der Adhäsionskraft von Eis bietet den Vorteil, dass Fehler durch falsche Rückschlüsse von indirekten Parametern ausgeschlossen werden können. Weiters sind keine vorangehenden Messungen, außer zur Ermittlung des Unterschieds zwischen dem üblichen benutzten Lack und dem eisabweisenden Lack, notwendig. Erste Messungen dieser Art für WEA wurden vom Technischen Forschungszentrum Finnland VTT durchgeführt (Makkonen, 2012). Hierbei wurden Beschichtungen auf Aluminiumplatten aufgebracht. Testzylinder mit 30 mm Durchmesser wurden an den Wänden thermisch isoliert und auf den beschichteten Platten

platziert. Diese wurden mit Wasser gefüllt und der gesamte Aufbau bei -10°C aufbewahrt. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumplatten ist ein Anfrieren von der Beschichtung weg und ohne die Bildung von Lufttaschen im Eis gewährleistet. Die Testkörper wurden von den Platten abgeschert und die notwendige Kraft gemessen. Es ergaben sich hierbei, unabhängig von der Geschwindigkeit des Abscherens, Kräfte im Bereich von 400 N bis 450 N. Hier ist zu beachten, dass ein klassischer Scherversuch ungleichmäßige Spannungen in der Oberfläche erzeugt. Idealerweise würde die Adhäsionskraft durch einen Zentrifugentest untersucht, jedoch ist dies für praktische Anwendungen meist ungeeignet. Auch Zugversuche sollten eine gleichmäßigere Verteilung der Spannungen erzeugen. Eine weitere Überlegung in diesem Zusammenhang ist, inwiefern für die praktische Ablösung von Eis von einem Rotorblatt der Scherversuch dennoch am besten geeignet ist, da er den realen Mechanismen der Ablösung am nächsten kommt. Aus den Arbeiten von Siegmann u. a. (2011) lässt sich ableiten, dass die Ergebnisse von Adhäsionskraftmessungen stark vom eingesetzten Messverfahren abhängen.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Messung der Adhäsionskraft zur Bestimmung des Zustandes einer Beschichtung besteht darin, dass die Temperaturabhängigkeit der Adhäsionskraft bei Eis, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, sehr groß ist und daher sehr präzise Bedingungen bei der Messung notwendig sind. Außerdem wurde in den Versuchen des Technischen Forschungszentrum Finland VTT (Makkonen, 2012) gefunden, dass eine zuverlässige Messung mit zunehmender Größe der vereisten Fläche schwieriger wird, die Messergebnisse also stärker schwanken. Gleichzeitig nimmt mit abnehmender Oberfläche der Einfluss des Randes zu. Gegebenenfalls könnten auch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten unterschiedlicher Rotorblattabschnitte bzw. Bauformen einen Einfluss haben, wie z.B. Rotorblätter aus Stahl gegenüber solchen aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

Im Rahmen eines experimentellen Versuchsprogramm in Zusammenarbeit mit Vestas Wind Systems wird zur Zeit ein Messverfahren für die anhaltende Funktionalität einer eisabweisenden Beschichtung untersucht. Die bislang aufgetretenen Herausforderungen liegen in zahlreichen Details, die insbesondere einer Umsetzung vor Ort im Wege stehen und deren Bewältigung noch in Arbeit ist.

5 Risikobewertung

Zur Durchführung von Risikobewertungen ist es notwendig, sowohl geeignete Metriken zur Quantifizierung des Risikos als auch sinnvolle Akzeptanzkriterien zu wählen. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Möglichkeiten vorgestellt und die Auswahl der eingesetzten begründet. Weiters werden die Verwendung im Detail beschrieben sowie Sonderfälle erklärt.

5.1 Risiko-Metriken

Zur Bewertung von Risiken ist die Auswahl der Metrik entscheidend. Verschiedene Verfahren zur Risikobewertung existieren und sind unterschiedlichen Fragestellungen entsprechend anzuwenden. Insbesondere die Unterscheidung in individuelles und kumulatives/gesellschaftliches Risiko ist von wesentlicher Bedeutung. Im Folgenden findet sich eine Liste häufig genutzter Metriken, zusammengestellt aus Rausand (2013), CCPS (2009) und Paltrinieri und Khan (2016)

IRPA - INDIVIDUAL RISK PER ANNUM

beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte oder hypothetische Person innerhalb eines Jahres durch eine bestimmte Gefährdung/Aktivität umkommt. Dieses Maß ist stark von der Abgrenzung und detaillierten Kenntnis der verbundenen Aktivität abhängig.

LIRA - LOCALIZED INDIVIDUAL RISK PER ANNUM

ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine durchschnittliche, ungeschützte Person, die sich permanent an einer Stelle aufhält im Laufe eines Jahres getötet wird. LIRA ist eine Eigenschaft einer bestimmten Position, daher lassen sich Isolinien für bestimmte Risikoniveaus (Risikokonturen) definieren. Hervorzuheben ist, dass sich LIRA im Gegensatz zu anderen Maßen nicht auf den Aufenthalt im professionellen Kontext oder zur Durchführung einer bestimmten Tätigkeit beschränkt (Arbeitsplatz, Transport).

RLE - REDUCTION IN LIFE EXPECTANCY

beschreibt eine Reduktion der Lebenserwartung durch Exposition zu einem Risiko, z.B. karzinogenen Substanzen. RLE ermöglicht damit die Erfassung von Langzeitwirkungen, ist aber weniger zur Beschreibung von Unfällen mit unmittelbaren Auswirkungen geeignet.

PLL - POTENTIAL LOSS OF LIFE

ist die erwartete Anzahl Todesfälle innerhalb einer Population oder eines Gebiets pro Jahr. Bezogen auf ein Gebiet errechnet sich PLL durch Einbeziehen von Aufenthaltszeit und Populationsdichte aus LIRA.

FAR - FATAL ACCIDENT RATE

ist die erwartete Anzahl Todesfälle pro Stunde Exposition mal dem Faktor 10^8 und dient primär zum Vergleich verschiedener Tätigkeiten, da die Festlegung der Expositionszeit auf verschiedene Arten möglich ist. Auch alternative Maße statt einer Zeit sind möglich, z.B. Personenkilometer oder die Anzahl Flugzeugstarts. FAR* beschreibt im Vergleich die beobachteten anstatt der erwarteten Todesfälle.

FN KURVE

Für eine bestimmte Anlage wird für alle denkbaren Ereignisse mit Todesfolge die Frequenz des Auftretens zur Anzahl betroffener in aufsteigender Reihenfolge grafisch dargestellt. Ein Akzeptanzkriterium wird ebenfalls als Kurve eingetragen und ermöglicht somit die Bestimmung inakzeptabler Ereignisse.

PEF - POTENTIAL EQUIVALENT FATALITY

Um auch nicht-tödliche Verletzungen quantitativ zu berücksichtigen werden diese mit Faktoren von 0.1 für schwere und 0.01 für leichte Verletzungen zum PLL addiert.

5.1.1 Anwendbarkeit

Aus den oben beschriebenen möglichen Metriken bieten sich zwei zur Verwendung für die Risikobewertung bei Eisfall oder Eiswurf an. Naheliegender ist die Verwendung des LIRA, da damit die Gefährdung für einen räumlichen Abstand zur Anlage berechnet werden kann. Besonders nützlich ist hierbei die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Anlagen, Parks oder auch anderen, ähnlichen Anwendungen an anderen Orten. So ließe sich z.B. der Vergleich mit einer chemischen Anlage am gleichen Ort durchführen. Allerdings beinhaltet dieser Vergleich nur die unmittelbare Gefahr einer Person umzukommen, andere Faktoren wie Umweltschäden etc. werden darin nicht berücksichtigt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist es wesentlich, nur klar ausgewiesene, wohlbegründete Faktoren einzubeziehen, die quantifizierbar sind und deren Unsicherheit bekannt ist. Für die praktische Verwendung bei Eisfall bedeutet dies, dass ballistische Modelle zusätzlich zur Wahrscheinlichkeit eines Todesfalles für jeden Punkt in der Umgebung der WEA einen Wert für die Unsicherheit dieser Wahrscheinlichkeit liefern sollten. Wenn ein Wert unter der Bezeichnung LIRA benutzt wird, so ist weiters zu beachten, dass keine Verhaltensmuster o.ä. von potenziell betroffenen Personen darin zum Einsatz kommen dürfen. Viele Gutachten verwenden z.B. Werte für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen oder die Wirkung von Warnhinweisen. Während dies für die Gesamtbewertung sinnvoll ist, ist es im Zusammenhang mit der Bezeichnung LIRA irreführend, da sich die Person ja definitionsgemäß permanent an einem Ort aufhält. Ähnliches gilt für Schutzbekleidung o.ä. Weiters ist auch der betrachtete Zeitraum ein volles Jahr; Werte bezogen auf den Zeitraum möglicher Vereisung sind daher nicht sinnvoll.

Die Verwendung des LIRA-Wertes ist dann besonders sinnvoll, wenn gesetzlich festgeschriebene oder in anderen Anwendungsfällen akzeptierte Grenzwerte dafür vorliegen - häufig ist dies bei chemischen oder nuklearen Anlagen der Fall. Hier ist zu beachten, dass LIRA Werte im Vergleich zu anderen, ähnlichen Grenzwerten meist einige Größenordnungen höher liegen, da ja keine Aufenthaltswahrscheinlichkeit berücksichtigt wird. Weiters ist zu beachten, ob Wahrscheinlichkeiten oder Frequenzen beachtet werden. Für hinreichend kleine Werte sind diese austauschbar, da aber bei Eisfall und Eiswurf Frequenzen nahe oder über 1 häufig auftreten (z.B. Vereisungsereignisse pro Jahr) ist die Unterscheidung hier von besonderer Bedeutung.

Das Verwenden von Häufigkeiten als Wahrscheinlichkeiten des Auftretens ist insofern akzeptabel, als diese für niedrige Häufigkeiten tatsächlich sehr ähnlich werden. Dies lässt sich aus der Zuverlässigkeitsfunktion P_Z ersehen, die beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein System nach der Zeit t noch ohne Auftreten eines Fehlers, der statistisch mit der Häufigkeit f auftritt, funktioniert:

$$P_Z(t) = e^{-f \cdot t} \quad (5.1)$$

Hierbei geht die Annahme ein, dass die Wahrscheinlichkeitsdichte für einen Ausfall mit der Zeit einer Exponentialfunktion entspricht.

Davon ausgehend lässt sich die Gegenwahrscheinlichkeit als Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers P_F definieren.

$$P_F(t) = 1 - P_Z(t) \quad (5.2)$$

Durch Einsetzen und Taylor-Reihentwicklung der Exponentialfunktion, sowie Streichen aller Terme nach dem ersten ergibt sich:

$$\begin{aligned} P_F(t) &= 1 - e^{-f \cdot t} \\ &= 1 - \left(1 - ft + \frac{(ft)^2}{2} - \frac{(ft)^3}{3} + \dots \right) \\ &\approx ft \end{aligned} \quad (5.3)$$

Der Vergleich zeigt, dass bei einer Häufigkeit von 0.1 pro Jahr der Fehler bei 5% liegt, bei 0.001 pro Jahr nur noch bei 0.05%.

Ein weiterer Vorteil mit LIRA-Werten zu arbeiten liegt darin, dass mit diesen lokale PLL-Werte bei bekannten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten leicht berechnet werden können. Dies ist bezogen auf Eisfall besonders relevant bei Verkehrs- und Wanderwegen, aber ggf. auch bei anderer lokaler Infrastruktur wie Lagern und Abstellplätzen. Hier muss beachtet werden, ob die Aufenthaltswahrscheinlichkeit homogen ist oder jahreszeitlich schwankt. Problematisch bei der praktischen Durchführung solcher Bewertungen ist, dass verlässliche Werte für Aufenthaltswahrscheinlichkeiten meist nicht vorliegen und geschätzt werden müssen. Hier spielt die Frage nach konservativen Annahmen eine große Rolle.

Im Allgemeinen wird akzeptiert, dass bei einem Spektrum denkbarer, in etwa gleich wahrscheinlicher Werte für eine Wahrscheinlichkeit in Risikobetrachtungen jene zur Berechnung des Gesamtrisikos gewählt wird, die zum höchsten Wert führt. Dies folgt der Idee, dass auch im ungünstigsten Fall ein gewisses Risiko nicht überschritten wird. Bei der Anwendung z.B. auf Warntafeln würde dies bedeuten, dass die Irrtumswahrscheinlichkeit durch eine Warntafel in der Risikoberechnung um 50% reduziert würde, der Annahme folgend, dass Betroffene im schlechtesten Fall zufällig entscheiden der Tafel Beachtung zu schenken. Praktisch kann eine wesentlich höhere Reduktion des Risikos erwartet werden. Aven (2016) argumentiert hier mit der Verwendung einer Einschätzung durch Experten, die mit einer Beschreibung und Einordnung der Stärke des Wissens über die in Frage stehende Problematik verbunden sein soll. Der Vorteil dieser Vorgangsweise liegt unter anderem darin, dass Ressourcen zur Risikoreduktion effizienter eingesetzt werden können, da die Expertenschätzung in den meisten Fällen näher am wahren Wert liegen wird als der konservative Wert. Eine Stärkung der Aussagekraft kann durch Sensitivitätsanalysen erreicht werden. Dies ist von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit dem ALARA-Prinzip (siehe Abschnitt 5.2.1).

Es erscheint sinnvoll hier zwischen den verschiedenen Anwendungsfeldern für Sicherheitsanalysen zu unterscheiden. Generell gibt es zwei Anwendungszwecke für solche Betrachtungen: Systemoptimierung um das Risiko zu reduzieren und Darlegen, dass minimale Sicherheitsanforderungen erfüllt sind. Im ersten Fall sind Expertenbewertungen jedenfalls sinnvoll und tragen auch dazu bei, Forschungsbedarf zu identifizieren, durch den Unsicherheiten reduziert bzw. erst

eingeschätzt werden können. Im zweiten Fall ist es in Anlehnung an das Vorsorgeprinzip sinnvoll, bei mangelndem Wissen vom schlechtesten vernünftig denkbaren Fall auszugehen.

Ausgehend von diesen Betrachtungen für die allgemeine Bevölkerung sind auch Einschätzungen der Gefährdung des betroffenen Personals notwendig. Vorteilhaft ist hier, dass Aufenthaltshäufigkeiten und (zumindest vorgesehene) Verhaltensmuster bekannt sind und damit ein IRPA-Wert berechnet werden kann. Wesentlich bei der Risikobewertung von Eisfall ist hier neben der bekannten Aufenthaltszeit im Risikobereich, der Umstand, dass bedingt durch die Arbeiten der Aufenthalt in Bereichen sehr hohen Risikos, meist direkt beim Turmfuß, notwendig ist. Gleichzeitig können risikomindernde Maßnahmen getroffen werden, die sich meist gut quantifizieren lassen, wie z.B. Verkürzung der Aufenthaltszeit außerhalb des Turmes, Einsatz von physischen Schutzeinrichtungen wie verstärkten Fahrzeugen oder überdachten Bereichen etc.

Im Fall des Personals wären noch andere Metriken einsetzbar, wie z.B. erwartete Ausfälle durch Verletzungen etc., allerdings sind diese eher für die strategische Planung relevant als für die Risikoanalyse.

Alle bisher beschriebenen Berechnungsmöglichkeiten sind auf den Tod der betrachteten Personen bezogen. Im Sinne der PEF könnten auch Verletzungen als Bruchteile von Todesfällen einbezogen werden, der praktische Nutzen ist durch das eingeschränkte Wissen über die Wahrscheinlichkeit von Verletzungen in Abhängigkeit von den bekannten Parametern von Eisfall als gering zu betrachten. Alternativ wäre es beim gegenwärtigen Wissensstand sinnvoll, Rechnungen mit niedrigerer Mindestenergie für risikorelevante Eisfragmente durchzuführen. Während dies keine direkte Einschätzung der Verletzungsgefahr erlaubt, wird zumindest eine Einschätzung für die Auswertung des Gefahrenbereichs gegeben.

5.2 Akzeptanzkriterien

Zur Festlegung der Akzeptanzkriterien, also jener Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit, die noch als akzeptable erscheint, gibt es verschiedene Ansätze, die sich in Anwendbarkeit und Voraussetzungen unterscheiden.

5.2.1 ALARA - As Low as Reasonably Achievable

Auch bekannt als ALARP – As Low as Reasonably Practicable Prinzip, beschreibt ALARA nicht nur Akzeptanzkriterien sondern gibt eine generelle Herangehensweise zum Umgang mit Risiko vor. Das Ziel unter dem ALARA-Prinzip ist eine möglichst starke Reduktion des Gesamtrisikos unter Beachtung ökonomischer und sozialer Aspekte. Neben der Erhebung des Risikos ist also auch eine Evaluation der Möglichkeiten zur Risikoreduktion und der damit verbundenen Kosten sowie der Einschränkungen durch soziale Akzeptanz durchzuführen, sowie eine Optimierung unter diesen Gesichtspunkten durchzuführen. Dabei wird in drei Risikobereiche unterschieden: Erstens vernachlässigbare Risiken, die aufgrund ihrer geringen Konsequenzen oder ihrer geringen Frequenz nicht weiter betrachtet werden müssen. Zweitens Risiken, die inakzeptabel hoch sind und jedenfalls reduziert werden müssen. Schließlich gibt es den Bereich der Risiken, die in den Bereich zwischen vernachlässigbar und intolerabel fallen. Diese sind mit Hilfe geeigneter Maßnahmen kosteneffizient zu senken. Sinkt dabei das Risiko unter die Schwelle der Vernachlässigbarkeit, sind keine weiteren Maßnahmen notwendig. Die verbleibenden Risiken werden so

lange weiter reduziert, bis die Kosten unproportional hoch sind gegenüber der gewonnenen Risikoreduktion oder nicht weiter reduziert werden können und daher in Kauf genommen werden müssen.

Die anzuwendenden Akzeptanzwerte sind spezifisch für die betroffene Personengruppe (z.B. Personal und Anwohner) bzw. den betroffenen Sektor und nur teilweise festgelegt. Als Beispiel seien Grenzwerte für Tote pro beförderter/eingesetzter Person und Jahr im Bahnverkehr gegeben: die untere Grenze für Angestellte beträgt 10^{-3} , die obere 10^{-5} , für Anwohner und Pendler liegen die Werte eine Größenordnung niedriger. (Schnieder und Schnieder, 2013, S179) Weiters besteht die generelle Forderung, dass das Risiko neuer Systeme höchstens gleich hoch wie das bestehender vergleichbarer Systeme ist.

5.2.2 MEM - Minimal Endogenous Mortality

Das MEM-Prinzip betrachtet einzelne Personen und ist auf die endogene Mortalität, also die natürliche Sterberate der zugehörigen Altersgruppe ohne Einfluss technischer Systeme bezogen. Die zentrale Forderung besteht darin, dass die exogene Mortalität, also die Sterberate aufgrund aller auf ein Individuum wirkenden technischer Systeme, die endogene nicht übersteigen darf. Hierbei ist der Begriff des technischen Systems recht breit gefasst (ein Beispiel ist das gesamte Eisenbahnsystem als einzelnes System) und es wird unterstellt, dass eine Bestimmung der endogenen Mortalität sinnvoll möglich ist. Weiters wird angenommen, dass maximal 20 Systeme gleichzeitig auf einen Menschen einwirken. Unabhängig von allen Informationen über ein System und deren Nutzer kann 5% der minimalen endogenen Mortalität als Grenzwert benutzt werden. Als Referenzwerte für die endogene Mortalität wird vielfach $2 \cdot 10^{-4}$ vorgegeben, womit sich eine maximale exogene Mortalität von 10^{-5} für ein einzelnes System ergibt. (DIN EN 50126, 2016)

Ein großer Vorteil des MEM-Prinzips liegt in der Unabhängigkeit von Vorwissen zur Festlegung des Grenzwertes. Nachteilig ist, dass z.B. gesellschaftliche Akzeptanz keine Rolle spielt und die akzeptierte Festlegung der endogenen Mortalität auf $2 \cdot 10^{-4}$ recht willkürlich ist.

5.2.3 GAMAB – Globalement Au Moins Aussi Bon

Das GAMAB-Prinzip verlangt, wie der Name impliziert, dass ein System im Ganzen zumindest gleich gut wie ein vergleichbares ist. Konkret ist dadurch ein geeignetes Referenzsystem mit akzeptiertem Restrisiko Voraussetzung. Das Risiko, das von einem neuen System ausgeht, darf nun jenes des Referenzsystems nicht übersteigen. Weiters ist von Bedeutung, dass dezidiert das Gesamtrisiko betrachtet wird, ein steigender Anteil eines Teilrisikos kann also durch Verbesserungen in einem anderen Bereich kompensiert werden. (DIN EN 50126, 2016)

Nachteilig ist die Notwendigkeit eines Referenzsystems; die Anwendung des GAMAB-Prinzips ist also bei neuartigen Konzepten nicht sinnvoll möglich. Weiters arbeitet das Prinzip mit harten zu erreichenden Grenzen, was wenig Anreiz zu Verbesserungen über den Status quo hinaus bietet.

5.2.4 Anwendbarkeit

Trotz der Möglichkeiten des Missbrauchs, die durch die explizite Forderung nach ökonomischer Optimierung gegeben ist, erscheint die Anwendung des ALARA-Prinzips für die Bewertung

von Eisfall am nützlichsten. Insbesondere hinsichtlich der Verwendung von Warneinrichtungen, deren Wirkung schwer quantifizierbar ist, die aber intuitiv sinnvoll erscheinen, ist die generelle Forderung nach Risikominimierung sinnvoll. Es bleibt jedoch die Schwierigkeit, dass Grenzwerte für den vernachlässigbaren und den inakzeptablen Risikobereich festgelegt werden müssen und die Vergleichbarkeit mit bestehenden Anwendungsfeldern, für die Werte vorliegen, nur sehr begrenzt gegeben ist. Diese Festlegung ist im Wesentlichen eine gesellschaftliche Entscheidung, die von individuellen Prioritäten abhängig ist und auch nur in Form einer Kompromissfindung getroffen werden kann.

Im Vergleich stellt sich beim GAMAB-Prinzip das Problem, dass kaum vergleichbare Systeme mit akzeptierten Grenzwerten bekannt sind. Hier ist vor allem der Umstand eine Herausforderung, dass WEA gegenüber anderen industriellen Gebäuden meist auf frei betretbarem Gelände stehen, das höchste Risiko nicht zwingend am nächsten bei der Anlage liegt und die relevanten Ereignisse relativ häufig aber mit geringen Konsequenzen auftreten.

Schließlich hätte das MEM-Prinzip zwar den Vorteil eines fixen Grenzwertes, jedoch liegt dieser höher als einige akzeptierte Grenzwerte, wie jene für Bahnsysteme, die im Abschnitt über das ALARA-Prinzip beschrieben sind. Auch aus der Sicht der Risikokommunikation sind die willkürlichen Annahmen des MEM-Prinzips problematisch.

5.3 Risikobewertung von Eisfall

Bei der Bewertung des Risikos bei Eisfall sind mehrere Einflussgrößen zu berücksichtigen. Aus praktischen Gründen ist es vorteilhaft in einem ersten Schritt zu ermitteln, welche Anlagen überhaupt einer detaillierten Untersuchung bedürfen. In Einklang mit den Empfehlungen zu Eiswauf aus (Bredesen u. a., 2017) können alle Anlagen ausgeschlossen werden, bei denen sich im Umkreis der doppelten Blattspitzenhöhe keine relevante Infrastruktur wie Straßen oder Wege befindet, da außerhalb dieser Distanz weder bei Beobachtungen noch bei Experimenten Eisfragmente gefunden wurden. Für die verbleibenden Anlagen ist als erstes eine meteorologische Standort-Analyse durchzuführen.

Ein wesentlicher Faktor ist die Vereisungshäufigkeit am betrachteten Standort. Diese lässt sich mit geeigneten Modellen und der Betrachtung der Wetterdaten der letzten Jahrzehnte sinnvoll abschätzen. Korrekturen durch lokale Messungen, wie sie vor dem Bau eines Windparks üblicherweise durchgeführt werden, können die Genauigkeit noch wesentlich steigern. Bei der Analyse der einzelnen Vereisungsereignisse ist zu beachten, ob die Vereisungsbedingungen kurzfristig sind oder über einen längeren Zeitraum anhalten. Weiters ist zu untersuchen, wann nach der Vereisung natürliches Abtauen eintritt, da nach dem Ende der Vereisungsbedingungen nicht zwingend Bedingungen für das Abtauen gegeben sind. Diese Werte sind wesentlich für den Vergleich zwischen Anlagen mit und ohne Abtauanlage. Bei Vorliegen einer Abtauanlage kann das Risiko kontrolliert werden, indem bei günstigen Bedingungen abgetaut wird, sofern natürliches Tauen nicht vorher einsetzt. In Summe kann es dadurch auch zu einer anderen Anzahl von Vereisungsereignissen kommen, als bei Anlagen ohne Abtauanlage, da diese unter Umständen über eine längere Kaltperiode mit immer wieder auftretenden Vereisungsbedingungen nach dem erstmaligen Vereisen im Stillstand bleiben müssen, während durch das Abtauen immer wieder Betrieb und neuerliches Vereisen möglich ist. In beiden Fällen ist zu betrachten, wann der wahrscheinlichste Zeitpunkt des Abtauens ist, und welche Windbedingungen bei diesem vorherrschen. Vor allem im österreichischen Flachland sind hohe Windgeschwin-

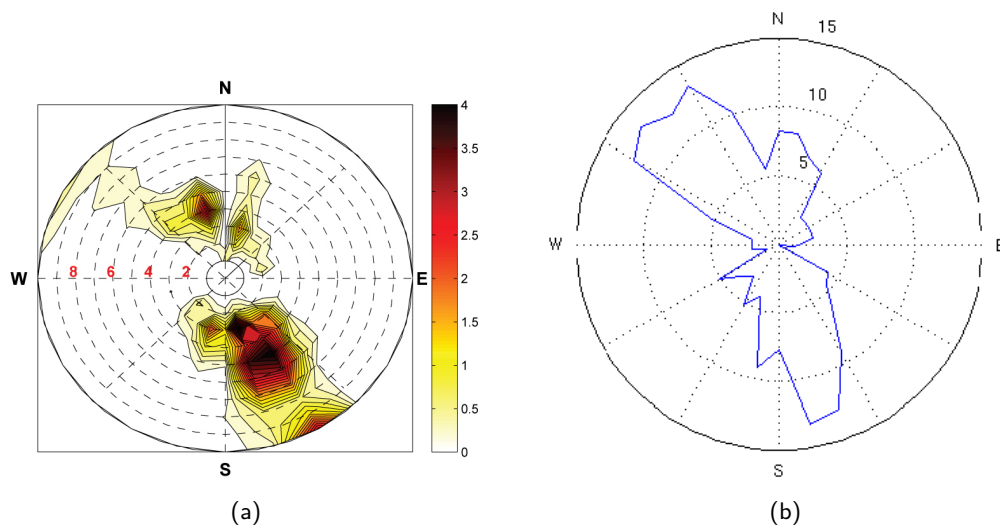


Abbildung 5.1: Windrichtungsverteilung (links) und maximaler Mittelwind (rechts) nach Vereisungsereignissen im ostösterreichischen Flachland basierend auf 30 Jahren meteorologischer Daten (aus Pospichal und Formayer 2011).

digkeiten nach Vereisungsbedingungen selten. Ergebnis dieser Untersuchungen ist zumindest eine Statistik über die Häufigkeit von Vereisung pro Jahr und die Windbedingungen beim Abtauen (siehe Abbildung 5.1). Bessere Modelle liefern auch Informationen über den Grad der Vereisung und können so ggf. irrelevante Vereisungsereignisse, bei denen nur geringe Mengen Raureif auftreten, ausschließen. Weiters kann der Vereisungsgrad für die betrachtete Eismenge in den folgenden ballistischen Modellen genutzt werden.

Mithilfe der Häufigkeitsverteilungen aus den meteorologischen Modellen kann in einem ballistischen Modell die Häufigkeitsverteilung von Fragmententreffern pro Flächeneinheit in der Umgebung der betrachteten WEA berechnet werden. Dazu werden entsprechend der erwarteten Verteilung von Eis am Rotor Punkte generiert, von denen Flugbahnen für fallendes Eis generiert werden. Hierbei können verschiedene Ansätze je nach Detailanspruch gewählt werden. Eine Methode mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand besteht darin in einer Richtung für jede Windgeschwindigkeit eine Fragmentverteilung am Boden zu berechnen. Diese werden dann entsprechend der Windgeschwindigkeits- und Richtungsverteilung vervielfältigt und auf die Umgebung der WEA projiziert. Danach erfolgt ein Normierungsschritt, der die Anzahl der Fragmente auf die Anzahl Fragmente bei einem durchschnittlichen Ereignis reduziert. Dieses Ergebnis mit der Anzahl an Vereisungsereignissen pro Jahr ergibt die LIRA-Werte für die betrachtete WEA. Gegebenenfalls kann diese Berechnung nicht nur für die Annahme tödlicher Verletzungen durch Eisfall sondern auch für einen anderen Grenzwert, durchgeführt werden, wodurch z.B. schwere Brüche ausgeschlossen werden können. Dieses einfache Verfahren ist allerdings nur bei simplem Terrain anwendbar. Bei Lagen mit starkem Gefälle und Terrain-Überhängen ist eine wesentlich detailliertere Simulation notwendig.

Wenn es für den Auftraggeber ausreichend ist, kann hier bereits mit einem Grenzwert für die LIRA-Konturen gearbeitet und der Risikobereich ausgewiesen werden. Die Kontur des Risikobereichs trennt in einen Bereich, der keine Maßnahmen notwendig macht, und einen, dessen Betreten bei Eisfall möglichst verhindert werden sollte. Befindet sich wiederum keine relevante

Infrastruktur im Risikobereich, kann die Analyse evtl. hier bereits beendet werden.

Zum Vergleich mit anderen Systemen, bei denen das Restrisiko durch entsprechende Maßnahmen bereits reduziert wurde, ist die Berücksichtigung von risikomindernden Maßnahmen und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten auch bei WEA notwendig. Generell kann davon ausgegangen werden, dass bei den Bedingungen, unter denen Eisfall möglich ist, sich an den meisten Standorten keine Personen aufhalten. Bei der Verwendung von Abtauanlagen fällt der Zeitpunkt des Abtauens meist kurz nach dem Vereisungszeitraum, wodurch hohe Luftfeuchtigkeit bei Temperaturen um 0 °C herrscht. Natürliches Abtauen wiederum findet meist in den frühen Morgenstunden statt, wenn die Rotorblätter durch die Sonne erwärmt werden.

Eine in Österreich effektive Maßnahme ist präventives Abschalten der Anlagen, da Raueisbildung an drehenden Strukturen wesentlich stärker ist als an stehenden. Ausreichend präzise Vorhersagen von Vereisungsbedingungen sind Voraussetzung und können in der Erhebung der meteorologischen Daten berücksichtigt werden, um die Vereisungshäufigkeit und Eismenge entsprechend anzupassen.

Die Verwendung einer Abtauanlage ist bereits in der meteorologischen Analyse enthalten und reduziert im Idealfall das Auftreten von Eisfall bei hohen Windgeschwindigkeiten, wodurch der Gefährdungsbereich kleiner die Frequenz innerhalb des Bereichs aber höher wird, da die Gesamtmenge an Eisfragmenten ja unverändert bleibt. Das manuelle Aktivieren der Abtauanlage vor Ort ermöglicht es dem durchführenden Personal den Gefährdungsbereich zu überwachen und Personen vor dem Betreten gezielt zu warnen. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten ist es meist nicht möglich den gesamten Bereich permanent zu überwachen, wodurch das Risiko durch diese Maßnahme nicht gänzlich eliminiert wird, aber zusammen mit Warnschildern eine Reduktion um eine Größenordnung angenommen werden kann.

Die Wirkung von Warnschildern ist sehr schwer zu quantifizieren. Praktisch kann angenommen werden, dass Schilder ohne weitere Warneinrichtungen nur geringe Wirkung haben, da gerade bei den verstärkt gefährdeten Anwohnern ein Gewöhnungseffekt eintritt. Warntafeln, bei denen bei akuter Gefahr eine zusätzliche Alarmierung z.B. durch Blinklichter stattfindet können als deutlich effektiver angenommen werden. Insbesondere schützen sie vor dem Betreten in jenen Phasen, in denen natürliches Abtauen bereits möglich ist. Bei Anlagen, die über keine Abtaueinrichtungen verfügen und die Perioden, in denen Eis auf den Anlagen ist, über mehrere Tage gehen können, ist ein zweistufiges Warnverfahren anzudenken, da ansonsten auch Blinklichter keine wesentliche Wirkung mehr haben.

Weitere Maßnahmen wie z.B. Information der Anwohner durch SMS können die Risikowahrnehmung verbessern und damit ein risikoaverses Verhalten begünstigen. Auch hier fehlen Erfahrungswerte die eine Quantifizierung ermöglichen würden. Im Sinne des ALARA-Prinzips sind sie dennoch jedenfalls empfehlenswert.

Je nach Strukturen in der Nähe von Anlagen sind zusätzliche Betrachtungen notwendig, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

5.4 Sonderfälle

Während das oben beschriebene Vorgehen meist anwendbar ist, gibt es einige spezielle Situationen für die Sicherheitsanalyse, die hier gesondert betrachtet werden sollen.

5.4.1 Gebäude

Generell finden sich selten Gebäude die häufiger aufgesucht werden, im relevanten Umkreis von WEA. Wahrscheinlichere Varianten sind Material- oder Maschinenlager bzw. auch die Zufahrten zu diesen. Je nach Anwendungsfall kann die Aufenthaltswahrscheinlichkeit hier gänzlich unabhängig von den meteorologischen Bedingungen bzw. der Jahreszeit sein. Zur Quantifizierung des Risikos ist es hier meist möglich eine explizite Aufenthaltswahrscheinlichkeit zu berechnen und mit dieser den lokalen LIRA-Wert zu modifizieren. Sollte dabei die akzeptable Risiko-Grenze überschritten werden, ist es durch den eingeschränkten Personenkreis, der diese Infrastruktur nutzt, oft möglich Maßnahmen z.B. in Form von automatischer Information zu ergreifen, die das Betreten während Vereisung verhindern.

5.4.2 Wanderwege, Langlaufloipen

Wanderwege, Langlaufloipen u.ä. sind vergleichsweise häufig im Umfeld von WEA zu finden, unter anderem da sie auch bewusst an diesen vorbeigeführt werden, um auf die Anlagen aufmerksam zu machen. Während die meisten Wanderwege bei Abtaubedingungen kaum genutzt werden, ist die Nutzung von Loipen relativ wahrscheinlich. Ähnlich wie bei Gebäuden kann hier mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten gearbeitet werden, jedoch sind diese meist wesentlich schwerer zu erheben. In jedem Fall ist hier der Einsatz aktiver Warnmaßnahmen anzuraten, sowie die Schaffung von Alternativrouten, die während Eisfall-Bedingungen genutzt werden können. Sind nur kurze Streckenabschnitte betroffen sind auch temporäre Abschirmmaßnahmen wie Netze mit ausreichend kleiner Maschengröße und hinreichender Höhe während des Winters eine Möglichkeit.

5.4.3 Autobahnen

WEA werden häufig entlang von Autobahnen und Autostraßen errichtet, da oft günstige Infrastruktur und Windbedingungen vorliegen. Die Annahme einer einzelnen betroffenen Person bei einem Treffer durch ein Eisfragment ist hier nicht anwendbar, da zumeist mehrere Personen in einem Fahrzeug unterwegs sind und sekundäre Unfälle bei einem getroffenen Fahrzeuge möglich sind. Zwar sind wesentlich höhere Energien zum Durchschlagen einer Windschutzscheibe notwendig als um Menschen zu verletzen, jedoch ist anzunehmen, dass auch, wenn ein Eisstück nur auf der Scheibe aufprallt, Fehlreaktionen des Fahrers wahrscheinlich sind. Aus diesen Überlegungen heraus und wegen der hohen Bedeutung dieser Verkehrswege ist es generell sinnvoll das Schutzziel hier vom Verhindern von Todesfällen auf das Verhindern von Unfällen zu ändern. Da die Unfallohäufigkeiten für Autobahnabschnitte meist gut bekannt sind, kann diese Bezugsgröße für Risikobetrachtungen benutzt werden. Als einfacher Orientierungswert kann der Durchschnittswert für deutsche Autobahnen mit ca. 1.5 Unfällen pro Kilometer und Jahr herangezogen werden. Pro Unfall ist mit 1.6 Verletzten zu rechnen, von diesen wiederum versterben 1.6%. Zum Vergleich mit LIRA-Werten entspricht dies bei einem schmalen Autobahnstück ca. $2 \cdot 10^{-6}$ Todesfällen pro Quadratmeter und Jahr.

Eine Berechnung der Unfallwahrscheinlichkeit durch den Treffer eines Eisfragmentes ist nur unter sehr vielen Annahmen und Abschätzungen möglich, eine Eingrenzung der Größenordnung wird dadurch aber gegeben. Eine extrem stark befahrene Autobahn hat eine Verkehrsstärke von 90,000 Fahrzeugen in 24 Stunden, das entspricht ca. 1 Fahrzeug pro Sekunde. Bei einer

angenommenen Durchschnittsgeschwindigkeit von 30 m s^{-1} und 3 Spuren je Richtung ergeben sich 200 m freie Fahrspur pro Fahrzeug. Unter der Annahme, dass ein Treffer auf dem Fahrzeug (ca. 5 m) und bis zu 15 m davor einen Unfall auslösen kann, ergibt sich dass 10% der Treffer von Eisfragmenten auf einer Autobahn potenziell einen Unfall auslösen können. Eine weitere Reduktion ergibt sich, wenn angenommen wird, dass zumindest die Hälfte der betroffenen Fahrer adäquat reagiert und keinen Unfall verursacht, eine Erhöhung ergibt sich, wenn Unfälle mit Beteiligung von Bussen oder LKW höher bewertet werden.

In der Risikobewertung ist weiters zu berücksichtigen, dass der Aufenthalt ungeschützter Personen auf der Fläche von Autobahnen so selten ist, dass dies praktisch ignoriert werden kann. Weiters ist davon auszugehen, dass keine risikomindernden Maßnahmen umgesetzt werden können, da Autobahnsperrungen oder selbst Geschwindigkeitsbegrenzungen nur in Sonderfällen umgesetzt werden, Eisfall aber als normaler Betriebszustand gilt.

Zusammenfassend ist dieser Überlegung folgend ein um eine Größenordnung über der Akzeptanzschwelle liegender LIRA-Wert für Autobahnen akzeptabel.

5.4.4 Waldstandorte

Da eine zunehmende Anzahl Anlagen auch im Wald gebaut wird, ist die Auseinandersetzung mit den Konsequenzen dieser Standortwahl für Eisfall notwendig. Im Sinne minimaler ökologischer Schäden werden die für die Anlagen gerodeten Flächen möglichst klein gehalten und auch eine geringe Menge an Zufahrtswegen errichtet, die möglichst direkt zu den Anlagen führen. Weiters ist zu berücksichtigen, dass laut §33 des österreichischen Forstgesetzes 1975 Wegfreiheit im Wald gilt, im Allgemeinen also Waldflächen frei betreten werden dürfen. Dies stellt insofern einen wesentlichen Unterschied dar, als die Absicherung der Gefährdungszone durch Warnmaßnahmen drastisch erschwert wird, verglichen mit landwirtschaftlich genutzten Flächen, bei denen nur auf Straßen und Wegen mit Personen zu rechnen ist. Zusätzlich ist die Sichtweite in Waldgebieten stark reduziert, wodurch die Nähe zu WEA oft erst spät zu erkennen ist.

Risikoreduzierend wirken sich zwei Faktoren aus: bei Eisfall ist davon auszugehen, dass ein Großteil der fallenden Eisfragmente durch Bäume abgebremst wird, bevor die Eisstücke den Boden erreichen. Bei ausreichendem Abstand von der Anlage ist auch nicht anzunehmen, dass die kinetische Energie der Fragmente ausreicht um größere Äste abzubrechen. Dies führt dazu, dass das Risiko auf radial von der Anlage führenden Wegen deutlich erhöht ist gegenüber dem Aufenthalt im Wald.

Der zweite reduzierende Faktor besteht darin, dass bei Vereisungsbedingungen für WEA auch Vereisung an Bäumen zu erwarten ist und Personen sich aus Sicherheitsgründen nicht direkt im Wald aufhalten sollten. Auf Straßen und Wegen ist es wie auch sonst dringend anzuraten, aktive Warnsysteme zu installieren. Aufgrund der vergleichsweise schlechten Sichtbarkeit sind zusätzliche Warnsysteme wie Blinklichter an den Anlagen selbst ebenfalls sinnvoll.

5.4.5 Kleinwindkraft

Die bisherigen Überlegungen waren im Wesentlichen auf Großwindenergieanlagen bezogen. Es lassen sich die Prinzipien der Risikoeinschätzung in gleicher Form bei Kleinwindkraft anwenden, jedoch ist die meist deutlich andere Umgebung der Anlagen zu berücksichtigen, sowie der Umstand, dass meist mit Eiswurf zu rechnen ist.

Es befinden sich wesentlich häufiger Gebäude in der Nähe der Anlagen, zumeist aber auf Privatgrund auf dem sich überwiegend die Besitzer der Anlage aufhalten und entsprechend bei Gefährdung das Gebiet meiden können. Bei Nutzung im urbanen Raum ist Eiswurf jedenfalls zu vermeiden, da akzeptable Risikowerte hier kaum zu erreichen sind. Dies ist entweder durch das Anlagendesign umsetzbar oder durch entsprechende Sensorik für die automatische Abschaltung. Auch manuelle präventive Abschaltung ist denkbar, insbesondere in Städten in denen nur sehr wenige Vereisungstage auftreten.

Weiters ist bei der Montage auf isoliert stehenden Türmen die Vereisung der Türme selbst zu berücksichtigen, die ebenfalls zu signifikanten Eismengen führen kann.

Ein zusätzliches Risiko besteht in strukturellen Schäden durch Vereisung an den Anlagen selbst, durch die sich Anlagenteile lösen und fortgeschleudert werden können.

5.4.6 Kumulative Effekte

Zusätzlich zur lokalen Gefährdung kann auch das kumulative Risiko eingeschätzt werden, das durch Eisfall von WEA entsteht. Dies wurde in der Literatur bisher nicht behandelt und wird auch bei Genehmigungsverfahren üblicherweise nicht verlangt, da in allen relevanten Verfahren der jeweilige Windpark isoliert betrachtet wird.

Da die Berechnung konkreter Werte extrem aufwändig wäre, wird eine Abschätzung der im Rahmen der akzeptierten Grenzwerte maximal erreichbaren zusätzlichen Todesfälle bzw. Unfälle durchgeführt.

Im Fall von Autobahnen sei hier beispielhaft ein 100 km langer Abschnitt betrachtet. Der Argumentation des MEM-Prinzips folgend würde hier eine Erhöhung des Risikos durch ein äußeres technisches System, in diesem Fall WEA entlang der Strecke, in der Höhe von 5% akzeptiert. Auf Basis der oben beschriebenen Berechnungsgrundlage ergeben sich hier 7.5 zusätzliche Unfälle pro Jahr auf diesem Streckenabschnitt als akzeptables Maximum. Wird diese Berechnung weiter geführt, ergibt sich daraus ein zusätzlicher akzeptierter Todesfall alle 5 Jahre.

5.5 Ökonomische Konsequenzen

Wie in Abschnitt 3.8 dargestellt sind die verwendeten Modelle nur sehr begrenzt in der Lage tatsächliche Fallweiten zu reproduzieren. Daher ist es naheliegend mit konservativen Annahmen in der Risikoabschätzung zu arbeiten, die Überschätzen durch ein Modell akzeptieren und möglicherweise unterschätzte Distanzen durch höhere ersetzen. Es ergeben sich dadurch Sicherheitsabstände, die Unfälle sehr unwahrscheinlich machen, gleichzeitig aber auch den Ausbau von Windparks durch höhere Abstände von Strukturen begrenzen. Die tatsächlichen Auswirkungen dieses Umstandes sind schwer einzuschätzen, weil sich bei veränderten Abständen meist der gesamte Aufbau eines Windparks ändert, da ja die Abstände zwischen den Anlagen den Windbedingungen entsprechend optimiert werden müssen.

Da Abtauanlagen zu niedrigeren Sicherheitsabständen führen, ist der Einbau derselben für die meisten Betreiber attraktiv. Allerdings ist sowohl der automatische Betrieb als auch der Betrieb als Eispräventionssystem bei der gegenwärtigen österreichischen Genehmigungspraxis so gut wie unmöglich. Üblicherweise werden zwei unabhängige Eisdetektionssysteme verlangt, sowie eine optische Kontrolle der Eisfreiheit der Rotorblätter vor Wieder-Anfahren der Anlage. Insgesamt

führt dies sowohl zu höheren Anschaffungskosten im Bereich von 5% der Anlagenkosten, sowie höhere Betriebskosten durch die manuelle Inbetriebnahme der Abtaueinrichtungen. Gleichzeitig sind die Verkürzungen der Stillstandszeiten je nach Standort oft gering, da die Anlagen durch Vereisung nachts Abschalten und das Eis während des Abtauens morgens teilweise bereits durch die Sonneneinstrahlung abfällt. Dennoch bleibt der Einbau attraktiv, da eben die Flächen besser genutzt werden können. Weiters könnten zuverlässige Systeme zur Detektion der Eisfreiheit der Rotorblätter, wie sie in Abschnitt 2.3 beschrieben sind, künftig das automatische Abtauen erlauben und somit die Rentabilität solcher Systeme in Österreich wesentlich steigern.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Problematik der Vereisung von Windenergieanlagen, insbesondere hinsichtlich damit verbundener Sicherheitsaspekte, untersucht. Die meisten Untersuchungen zu dieser Thematik wurden von Institutionen durchgeführt, die ihre Ergebnisse hauptsächlich für die interne Verwendung benötigten, und daher kein Interesse an der Veröffentlichung detaillierter Daten hatten. Erst seit September 2017 existiert eine öffentlich zugängliche Datenbank von im Rahmen eines Monitoring-Programms gefundenen Eisfragmenten (Pöyry, 2017).

Daher wurden für diese Dissertation Beobachtungen realen Eisabfalls durchgeführt, wobei sich zeigte, dass aufgrund der sehr schlechten Beobachtungsbedingungen und der verhältnismäßig geringen Vereisungshäufigkeit an den zugänglichen Standorten, die Anzahl der Beobachtungen nicht ausreichen würde, um statistisch robuste Aussagen treffen zu können. Durch die während des Monitorings durchgeführten Messungen und gesammelten Eisfragmente war es jedoch möglich naturnahe Probekörper für Experimente herzustellen. Diese wiederum wurden genutzt, um verschiedene Grade der Idealisierung von Probekörpern und die Auswirkung auf die Ergebnisse der Experimente zu untersuchen. Die Ergebnisse der Experimente wurden in Simulationssoftware für die Berechnung von Fallweiten in der Umgebung von WEA integriert. Unabhängig davon wurden die Möglichkeiten eisabweisender Beschichtungen betrachtet und ein Verfahren zum Monitoring der Degradation bestimmter Beschichtungen entwickelt. Schließlich wurden die verschiedenen Möglichkeiten von Metriken für Risiko hinsichtlich ihrer Eignung für die Beschreibung von Eisfall diskutiert und der Einsatz der vielversprechendsten beschrieben.

MONITORING

Eine wesentliche Erkenntnis des Monitorings stellt dar, dass simple Faustformeln Eisabfall unzureichend beschreiben und die Fallweiten auch unterschätzen. Weiters zeigt sich, dass abhängig von den meteorologischen Gegebenheiten verschiedenste Arten von Vereisung, sowohl in Form langer Stangen an der Vorderkante, als auch großer Platten auf der Rotorblattfläche sowie kleiner dünner Klareisplatten auftreten können. Ebenfalls abhängig von den Bedingungen ist der Zusammenhang zwischen Fallweite und Größe der Fragmente. Qualitativ konnte bei den Beobachtungen festgestellt werden, dass viele der größeren Eisstücke während des Falls weiter zerbrechen, wobei die einzelnen Bruchstücke nach wie vor risikorelevant sind.

Bei der Beobachtung von Eiswurf bei KWEA konnte ein Zusammenhang zwischen Wurfweite und Masse der Eisfragmente gefunden werden. Weiters wurde eine breite Massenverteilung bis zu über 1 kg festgestellt, der Schwerpunkt der Verteilung liegt im Bereich von 200 g bis 400 g. Es fällt vor allem auf, dass auch bei Kleinwindenergieanlagen eine signifikante Menge an risikorelevanten Eisstücken gefunden wird.

EXPERIMENTE

Erste Experimente wurden mit Abwürfen von Hubschrauben durchgeführt, die vor allem zeigen, dass bei gleichen Bedingungen sehr unterschiedliche Fallweiten von Probekörpern erreicht werden. Dies ist vor allem auf den Einfluss von Autorotation zurückzuführen, welche das Fallverhalten wesentlich beeinflusst. Im Rahmen weiterer Experimente wurden 480 Probekörper

von WEA abgeworfen. Hierdurch wurde die Grundlage für eine Datenbasis geschaffen, an der sich Modelle für Eisfall und Einwurf validieren lassen. Wesentlich bei diesen Experimenten ist, dass der Grad der Idealisierung der Probekörper deutlichen Einfluss auf die Fallweiten derselben hat. Weiters zeigt sich wie schon bei den Hubschrauberabwürfen, dass auch bei sehr ähnlichen Abwurfbedingungen eine große Streuung möglich ist. Die Analyse der Flugbahnen bestätigt die Beobachtungen von Eisfall dahingehend, dass bei fast allen Probekörpertypen das Fallverhalten wesentlich komplexer ist, als aus Simulationen zu erwarten wäre. Weiters zeigt sich, dass häufig verhältnismäßig regelmäßig gekrümmte Flugbahnen entstehen. Die gemessenen Endgeschwindigkeiten variieren zwischen den unterschiedlichen Probekörpertypen stark. Es ist eine Tendenz zu erkennen, dass stärker idealisierte Probekörpertypen höhere Endgeschwindigkeiten erreichen und daher die Risikorelevanz ihrer natürlichen Gegenstücke überschätzt wird. Jedoch liegen nur für fünf Probekörpertypen ausreichend Messungen für eine statistische Auswertung vor, womit die Gültigkeit dieser Aussage stark eingeschränkt ist.

SIMULATIONEN UND MODELLE

Es wurden das sehr verbreitete Biswas-Modell (Biswas u. a., 2012) in mehreren Varianten, sowie das wenig verbreitete, aber für gewisse Formen von Eisfragmenten vielversprechende Baker-Modell (Baker, 2007) beschrieben und die Ergebnisse der Modellrechnungen mit den Ergebnissen der Experimente verglichen. Das Biswas-Modell verwendet als Grundannahme, dass alle betrachteten Eisfragmente würfelförmig sind und sich somit nur der Luftwiderstand, repräsentiert durch einen konstanten Strömungswiderstandskoeffizienten, auf die Flugbahn eines Fragments auswirkt. Demgegenüber geht das Baker-Modell von Platten aus, die um eine konstante Achse normal zur Windrichtung und Schwerkraft rotieren. Diese werden neben Masse, charakteristischer Fläche und Strömungswiderstandskoeffizient auch durch eine charakteristische Länge und ihr Trägheitsmoment beschrieben. Der Vergleich der Modellergebnisse mit Experimenten zeigt, dass jedes Modell in einer passenden Variante einige Ergebnisse beschreiben kann, jedoch keines alle. Weiters beschreiben die Modelle nicht notwendigerweise die Anwendungsfälle korrekt, für die sie entwickelt wurden - also das Biswas-Modell kompakte Körper und das Baker-Modell plattenförmige. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass keines der Modelle ausreicht, um die Dynamik von Eisfall zu beschreiben.

Weiters wurde gezeigt, wie Simulationen auf der Basis der genannten Modelle durchgeführt werden können. Hierbei wurde der Ansatz von Monte-Carlo-Simulationen für eine Vielzahl von Flugbahnen verfolgt, wobei die Eingabeparameter der ballistischen Gleichungen entsprechend der meteorologischen Bedingungen bzw. der Art der Vereisung gewählt wurden. Aufgrund der Unzulänglichkeiten der Modelle wurden daraus jedoch keine konkreten Ergebnisse abgeleitet.

BESCHICHTUNGEN

Verschiedene Techniken zur Vereisungsprävention bzw. Enteisung wurden ebenfalls diskutiert, wobei besonders elektrothermische Enteisung und Heißluftenteisung beschrieben wurden. Diese beiden Verfahren haben die höchste Verbreitung und haben sich als technisch robust erwiesen. Beide sind allerdings zur Vereisungsprävention in Österreich nicht genehmigungsfähig, sofern keine zuverlässige Überprüfung der anhaltenden Eisfreiheit der Rotorblätter gegeben ist, da ansonsten die Gefahr des Eiswurfs besteht. Eine Alternative stellen hier eisabweisende Beschichtungen dar. Diese basieren überwiegend auf superhydrophoben Oberflächeneigenschaften, welche die Anhaftung von Eis erschweren sollen. Zentral ist hierbei die Annahme, dass die Adhäsionskraft von Eis ähnlich beeinflusst wird, wie die von Wasser. Mehrere Studien zeigen, dass dies nur eingeschränkt zutrifft, insbesondere im Fall der Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen. Bei diesen ist ein Eindringen des Wassers in die Strukturzwischenräume unter

geeigneten Bedingungen möglich, was sogar zu einer Erhöhung der Anhaftung des Eises führt. Möglichkeiten der Überprüfung solcher Oberflächen wurden ebenfalls vorgestellt, insbesondere eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Überprüfung der Adhäsionskraft von Eis am montierten Rotorblatt, die zum Monitoring der Beschichtungsqualität dienen soll. Hierbei wird ein wassergefüllter Probekörper lokal so gekühlt, dass sich vom Rotorblatt weg eine Eisschicht darin bildet. Dieser somit angefrorene Probekörper kann abgezogen und die dafür notwendige Kraft gemessen werden. Aufgrund des Aufbaus ist die gemessene Kraft zwar nicht direkt die Adhäsionskraft des Eises, jedoch proportional dazu.

RISIKO

Es wurden verschiedene Metriken zur Quantifizierung von Risiko sowie Verfahren zur Festlegung von Akzeptanz-Schwellen vorgestellt. Unter den Metriken scheint die LIRA-Metrik (localized individual risk per annum) am besten geeignet, um vergleichbare Risiko-Werte für die generelle Bevölkerung zu generieren. Für die Betrachtung der Arbeitsplatzsicherheit ist die IRPA-Metrik besser geeignet, da umfassendes Wissen bzw. Vorschriften zum Verhalten der Mitarbeiter vorliegen. Das sinnvollste Akzeptanzkriterium stellt das ALARA-Prinzip dar. Hierbei wird sowohl die Einhaltung fester Grenzwerte verlangt, als auch die Forderung nach größtmöglicher Minimierung des Risikos unter Berücksichtigung ökonomischer Einschränkungen gestellt. Die exakte Festlegung dieser Grenzwerte kann nur auf der Basis impliziter oder expliziter gesellschaftlicher Beschlüsse erfolgen, übliche akzeptierte Werte für ein ignorierbares Risiko liegen jedoch im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-7} Todesfälle pro Jahr durch eine einzelne Anlage. Bei ca. 350,000 installierten WEA Ende 2016 (GWEC, 2016) weltweit entspricht das wiederum einem akzeptierten Todesfall durch den Betrieb von WEA alle 4 Monate bis 30 Jahre. Verschiedene Spezialfälle, wie die Berücksichtigung stark befahrener Verkehrswege oder von Waldstandorten, wurden behandelt und Vorschläge zum Umgang damit gemacht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass seit ca. 20 Jahren Bemühungen betrieben werden, das Risiko von Eisfall und -wurf zu quantifizieren. Während große Fortschritte sowohl bei der meteorologischen Modellierung als auch bei der Beobachtung von Ereignissen gemacht wurden, ist ein zuverlässiges physikalisches Modell noch nicht verfügbar. Aufgrund der geringen Leistungsfähigkeit der Modelle bleibt auch die Aussagekraft von durchgeführten Simulationen beschränkt. Der Vergleich mit Beobachtungskampagnen zeigt jedoch, dass Modelle die auf Basis von Beobachtungsdaten entwickelt wurden für die beobachteten Standorte zumindest abseits von Extremwerten konservative Einschätzungen liefern. Es ist daher davon auszugehen, dass dies auch für Orte mit ähnlichen meteorologischen Gegebenheiten zutrifft. Somit bleiben zwei größere Nachteile: einerseits ergeben sich übermäßige Sicherheitsabstände aufgrund der stark konservativen Modelle, deren Unsicherheiten nicht bekannt sind, und andererseits bleiben selten auftretende Extremfälle unberücksichtigt, da sie von den Modellen nicht reproduziert werden können.

6.1 Empfehlungen für zukünftige Monitoring-Projekte

Es stehen zunehmend Daten aus Beobachtungskampagnen zu Eiswurf zur Verfügung (siehe Abschnitt 2.1, sowie Pöyry, 2017). Die genauere Betrachtung dieser Kampagnen zeigt, dass sie wesentliches Verbesserungspotenzial besitzen. So wird zur Windmessung meist das Anlagenanemometer herangezogen. Zum einen ist hierbei die Kenntnis des Windprofils nur sehr eingeschränkt, zum anderen kann der Einfluss der Turbulenz nicht betrachtet werden, da die

Messintervalle meist zu grob sind. Diesen Problemen kann begegnet werden, indem dezidierte Messmasten genutzt werden, die ausreichend hoch aufgelöste Daten liefern.

Auch ist der exakte Zeitpunkt der Ablösung des Eises nicht bekannt, weshalb die zu diesem Zeitpunkt herrschende Windgeschwindigkeit nicht ermittelt werden kann. Weiters ist es im Fall von Eiswurf nicht nachvollziehbar, von welcher Stelle des Rotors und bei welcher Rotororientierung ein Eisstück geworfen wurde. Die gegenwärtig beobachteten Anlagen geben auch keinen Aufschluss darüber, wie viel Eis sich auf den Rotorblättern befand. Teilweise wird versucht diesen Problemen durch den Einsatz von Kameras zu begegnen, welche die optische Überprüfung der Rotorblätter erlauben. Dies ist mit zwei Schwierigkeiten verbunden. Zum einen werden die Kameras aus praktischen Gründen nicht mitdrehend, sondern statisch installiert, weshalb das Rotorblatt immer nur für einen sehr kurzen Zeitpunkt im Blickfeld der Kamera ist. Zum anderen sind die Licht- bzw. Wetterverhältnisse bei Vereisung oft nicht ausreichend, um ausreichend Details erkennen zu können. Teilweise könnten hier Verbesserungen erreicht werden, indem Kameras auf den Rotorblättern montiert und mit Scheinwerfern ausgestattet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von Infrarot- oder UV-Sensoren und -scheinwerfern in einem Wellenlängenbereich, in dem sich Lack und Eis stark im Absorptionsverhalten unterscheiden. Das Monitoring der Eismengen auf dem Rotorblatt sollte durch rotorblattmontierte Eisdetektionssysteme, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, möglich sein.

Eine weiteren Einschränkung der Nutzbarkeit bestehender Studien besteht in der eingeschränkten Dokumentation der Eisfragmentgeometrie und -dichte. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, haben sich 3D-Scans sowohl zur Dokumentation der Fragmentgeometrie als auch in Kombination mit Messung der Masse zur Bestimmung der Dichte sehr gut bewährt. Die Verfahren dazu sind im Prinzip auch vor Ort einsetzbar, jedoch mit signifikanten Aufwand verbunden. Dennoch scheint das Einscannen einer begrenzten Anzahl Fragmente pro Ereignis durchaus realistisch machbar zu sein. Weiters ist zu berücksichtigen, dass die meisten Eisstücke beim Aufprall stark fragmentieren, die ursprüngliche Länge also oft nicht rekonstruierbar ist. Daher ist die Bestimmung der Länge beim Vermessen auch als nachrangig anzusehen. Von größerer Bedeutung ist eine gute Beschreibung des Fragmentquerschnittes, da sich daraus die ungefähre Position am Rotorblatt aufgrund der innenseitigen Krümmung rekonstruieren lässt und die aufgebaute Eismenge eingeschätzt werden kann.

Die genauere Untersuchung der Trajektorien real abfallender Stücke hätte großen Wert für die Beurteilung der Fähigkeiten aktueller Modelle. Insbesondere die initiale Länge, sowie das Zerschneiden der Stücke in Abhängigkeit von der Fallgeschwindigkeit bzw. Rotation sind hier von Interesse. Diese Art von Beobachtungen ist mit besonderem Aufwand verbunden, da dreidimensionale Aufnahmen notwendig sind.

6.2 Empfehlungen für künftige Experimente

Wie sich bei den bisherigen Experimenten zeigte, liefern diese wesentlich aussagekräftigere Resultate als die bloße Beobachtung natürlichen Eisfalls. Dies ist hauptsächlich auf die stark reduzierte Parameterzahl zurückzuführen. Dennoch bleibt eine große Streuung der Fallweiten bei gleichen Probekörpern und es ist daher z.B. innerhalb eines schmalen Windgeschwindigkeitsbereichs nicht möglich eine Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Fallweite zu finden. Eine naheliegende Möglichkeit ist es daher, eine Vielzahl von Experimenten unter unterschiedlichen Bedingungen durchzuführen, da bei großen Unterschieden die erwarteten Korrela-

tionen auftreten. Alternativ wäre eine exaktere Messung der Windgeschwindigkeit ein Ansatz, um bessere Ergebnisse zu erhalten. Hierfür wären aber zumindest zwei Anemometer in unterschiedlicher Höhe in Windrichtung vor dem Abwurfpunkt an einer ungestörten Stelle des Windfeldes notwendig. Da die Windrichtung während der Versuchsdurchführung meist dreht, erscheint es schwierig, diese Bedingungen herbeizuführen. Windmessung direkt auf der Gondel ist keine sinnvolle Option, da es zu einer starken Störung des Windfeldes durch die Rotorblätter an diesem Punkt kommt.

Eine weitere sinnvolle Ergänzung von Experimenten stellt eine direkte Messung der Kräfte auf einen Probekörper dar. Dazu müsste dieser mit Beschleunigungssensoren und evtl. Lage-sensoren ausgestattet werden, wobei diese vergleichsweise hohe zeitliche Auflösung erlauben sollten, da der gesamte Fall eines Fragmentes innerhalb weniger Sekunden stattfindet, aber Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 4 Umdrehungen pro Sekunde erreicht werden.

Schließlich muss auch erwähnt werden, dass sich alle bisherigen Experimente auf Eisfall konzentrierten. Es ist zwar davon auszugehen, dass Modelle für Eisfall auch bei Eiswurf anwendbar sein sollten, jedoch wären Experimente zur Validierung etwaiger neuer Modelle in jedem Fall notwendig. Diese stellen eine noch wesentlich größere Herausforderung als Fall-Experimente dar, da einerseits sehr hohe Startgeschwindigkeiten (in Bereich von 70 m s^{-1}) für Probekörper erreicht werden müssen und andererseits ein großer Bereich für die Landung der Probekörper betrachtet werden muss.

6.3 Erweiterung der Betrachtungen

Die bisherigen Betrachtungen beschäftigten sich mit den Möglichkeiten, das Risiko durch Eisfall in einer probabilistischen Formulierung darzustellen. Jedoch ist mit der Nutzung der Windenergie nicht allein das Risiko von Eisfall verbunden. Eine Methodik zur umfassenderen Betrachtung der technischen Risiken, die von der Anwendung dieser Technologie ausgehen, stellt die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) dar. Dieser methodische Ansatz, der seine Ursprünge in der Risikoanalyse für kerntechnische Anlagen hat, nutzt Fehler- und Ereignisbäume, um die möglichen unerwünschten Ereignisse einer Anlage und ihre Sicherheitseinrichtungen zu untersuchen. Hierbei wird im ersten Schritt ein Risikoziel definiert, also jenes Ereignis, dass vermieden werden soll - im Fall der Windenergie am ehesten Schaden an Leib und Leben von Personen. Ausgehend davon werden jene auslösenden Ereignisse identifiziert, die zum Risikoziel führen können. Naturgemäß stellt dieser Schritt eine sehr große Herausforderung dar, da hier kaum systematische Möglichkeiten zur Suche zur Verfügung stehen. Für jedes Ereignis können nun Ereignisbäume erstellt werden, in denen für jedes Sicherheitssystem die Wahrscheinlichkeit von Erfolg oder Scheitern eingetragen wird, bis schließlich für jeden Pfad ein Endereignis erreicht wird, dem eine Wahrscheinlichkeit oder Frequenz zugewiesen werden kann. Die Detailanalyse der einzelnen Sicherheitssysteme erfolgt mittels Fehlerbäumen, in denen das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten eines Sicherheitssystems betrachtet wird.

So entsteht eine Quantifizierung der verschiedenen Pfade, die zu schädlichen Ereignissen führen können. Der größte Vorteil der PSA besteht darin, dass durch die Analyse dieser verschiedenen Pfade jene ausfindig gemacht werden können, bei denen - ganz im Sinne des ALARA-Prinzips - mit dem geringsten Aufwand der größte Sicherheitsgewinn erzielt werden kann. Wichtig ist hier, dass die einzelnen Wahrscheinlichkeiten oder Frequenzen oft sehr viele Annahmen enthalten und als absolute Zahlen nur bedingte Gültigkeit haben. In Relation zueinander betrachtet sind

sie aber jedenfalls nutzbar.

Es existieren mehrere Beispiele, in denen PSA von der Kernenergie erfolgreich auf andere, technologisch davon sehr verschiedene, Systeme übertragen werden konnte. So zeigten PSA an Kleinwindenergieanlagen (Zajcek und Drapalik, 2017) zum Beispiel, dass eine wesentliche Gefährdung nicht nur von Eiswurf, sondern auch von fallenden Anlagenteilen ausgeht. Die Analyse der Ereignisbäume führte zum Schluss, dass die Zuverlässigkeit der Schutzsysteme gegen zu hohe Drehzahlen den Schlüsselparameter für das Verhindern von fallenden Teilen darstellt. Ähnlich konnte gezeigt werden, dass ein redundantes Bremssystem die Wahrscheinlichkeit von Bränden drastisch reduziert (Zajcek, 2017). Mehrere Arbeiten zu PSA an Großwindenergieanlagen wurden ebenso durchgeführt, jedoch bisher nur als konzeptioneller Beweis und ohne konkrete Aussagen zu Verbesserungsmöglichkeiten (Rademakers u. a., 1993; Braam und van Dam, 1998; Michos u. a., 2002; Ribrant und Bertling, 2007; Sørensen und Toft, 2010; Lin u. a., 2016; Márquez u. a., 2016).

Eine umfassende Einführung der PSA in das Design von WEA könnte zu einer effizienten Verbesserung der Sicherheit von Windenergieanlagen im Allgemeinen führen. Hierzu ist die Fortführung der immer wieder begonnen Bemühungen um ein solches Konzept notwendig.

Literaturverzeichnis

- [Alansatan und Papadakis 1999] ALANSATAN, Sait; PAPADAKIS, Michael: Experimental Investigation of Ice Adhesion. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 04 1999. – URL <http://dx.doi.org/10.4271/1999-01-1584>
- [Albers 2011] ALBERS, A.: Summary of a Technical Validation of ENERCON's Rotor Blade De-Icing System / Deutsche WindGuard Consulting GmbH. Varel, September 2011 (PP 11035). – Forschungsbericht
- [Arstila 2017] ARSTILA, Timo: *ICEMET-project solves the LWC measurement*. presentation at Winterwind 2017. Februar 2017
- [Aven 2016] AVEN, Terje: On the use of conservatism in risk assessments. In: *Reliability Engineering & System Safety* 146 (2016), S. 33 – 38. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832015002938>. – ISSN 0951-8320
- [Baker 2007] BAKER, C.J.: The debris flight equations. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95 (2007), Mai, Nr. 5, S. 329–353
- [Baring-Gould u. a. 2012] BARING-GOULD, Ian; CATTIN, René; DURSTEWITZ, Michael; HULKKONEN, Mira; KRENN, Andreas; LAAKSO, Timo; LACROIX, Antoine; PELTOLA, Esa; RONSTEN, Göran; TALLHAUG, Lars; WALLENIUS, Tomas: IEA Wind Recommended Practice 13: Wind Energy in Cold Climates / IEA Wind. May 2012. – Forschungsbericht
- [Baring-Gould u. a. 2009] BARING-GOULD, Ian; TALLHAUG, Lars; RONSTEN, Göran; HORBATY, Robert; CATTIN, René; LAAKSO, Timo; DURSTEWITZ, Michael; LACROIX, Antoine; PELTOLA, Esa; WALLENIUS, Tomas: Expert Group Study on Recommendations for wind energy projects in cold climates / IEA Wind Task 19. URL http://ieawind.org/task_FinalReports/Task_19_Exp%20Group_Study_090807wcover.pdf, October 2009. – Forschungsbericht
- [Battisti 2015] BATTISTI, Lorenzo: *Wind Turbines in Cold Climates: Icing Impacts and Mitigation Systems*. Springer International Publishing, 2015 (Green Energy and Technology). – URL <https://books.google.at/books?id=GTi2BgAAQBAJ>. – ISBN 9783319051918
- [Biswas u. a. 2012] BISWAS, Sumita; TAYLOR, Peter; SALMON, Jim: A model of ice throw trajectories from wind turbines. In: *Wind Energy* 15 (2012), 10, Nr. 7, S. 889–901. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/we.519>. – ISSN 1099-1824
- [van den Bosch u. a. 1992] BOSCH, C.J.H. van den; TWILT, L.; MERX, W.P.M.; JANSEN, C.M.A.; WEGER, D. de; P.G., J. R.; LEEUWEN, D. v.; BLOM-BRUGGEMAN, J.M. u. a. ; APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH, TNO The Netherlands O. of (Hrsg.): *Methods for the detennination of possible damageto people and objects resulting from releases of hazardous materials (CPR 16E)*. Director-General of Labour, 1992. – ISBN 90-5307-052-4
- [Bourgeois 2017] BOURGEOIS, Saskia: *IEA Wind Task 19 - Workshop on Ice throw*. presentation at Winterwind 2017. Februar 2017
- [Braam und van Dam 1998] BRAAM, H.; DAM, J.J.D. van: *Methods for Probabilistic Design*

- of Wind Turbines / Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark. Dezember 1998 (R-1082). – Forschungsbericht
- [Bredesen 2014] BREDESEN, Rolv E.: *IceRisk: Assessment of risks associated with ice throw and ice fall*. Presentation at Winterwind 2014. Februar 2014
- [Bredesen u. a. 2017] BREDESEN, Rolv E.; CATTIN, René; CLAUSEN, Niels-Erik; DAVIS, Neil; JORDAENS, Pieter J.; KHADIRI-YAZAMI, Zouhair; KLINTSTRÖM, Rebecka; KRENN, Andreas; LEHTOMÄKI, Ville; RONSTEN, Göran; WADHAM-GAGNON, Matthew; WICKMAN, Helena: Expert Group Study on Recommended Practices 13 2nd Edition: Wind Energy Projects in Cold Climates / IEA Wind TCP. Februar 2017 (13). – Forschungsbericht
- [Bredesen und Refsum 2015] BREDESEN, Rolv E.; REFSUM, Helge A.: Methods for evaluating risk caused by ice throw and ice fall from wind turbines and other tall structures. In: *IWAIS 2015 - 16th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Uppsala, Sweden, June 28 to July 3, 2015* Kjeller Vindteknikk and Lloyds Register Consulting (Veranst.), Juli 2015
- [Øyvind Byrkjedal 2017] BYRKJEDAL Øyvind: *10 Years of experiences with calculation of production losses caused by icing*. presentation at winterwind 2017. Februar 2017
- [Cattin 2012] CATTIN, René: Icing of Wind Turbines, Elforsk report 12:13 / Vindforsk projects. Januar 2012 (12:13). – Forschungsbericht
- [Cattin und Heikkilä 2016] CATTIN, René; HEIKKILÄ, Ulla: Evaluation of ice detection systems for wind turbines / Genossenschaft meteotest. Fabrikstrasse 14 CH-3012 Bern, Februar 2016 (392). – Forschungsbericht
- [Cattin u. a. 2016] CATTIN, René; KOLLER, Sara; HEIKKILÄ, Ulla: Vereisung St. Brais und MontSummary - Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen Executive Summary / Genossenschaft Meteotest Fabrikstrasse 14 CH-3012 Bern www.meteotest.ch. URL http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000011339.pdf&name=000000291098_de, April 2016. – Forschungsbericht
- [Cattin u. a. 2007] CATTIN, René; KUNZ, Stefan; HEIMO, Alain; RUSSI, Gabriela; RUSSI, Markus; TIEFGRABER, Michael: Wind turbine ice throw studies in the Swiss Alps. In: *Proceedings of the European Wind Energy Conference, May 7-10*, URL http://meteotest.meteotest.ch/fileadmin/user_upload/Windenergie/pdfs/paper_ewec2007_cattin_final.pdf. – Zugriffsdatum: 2013-04-08, 2007
- [Cattin u. a. 2009] CATTIN, René; RUSSI, Markus; RUSSI, Gabriela: Four years of monitoring a wind turbine under icing conditions. In: *IWAIS XIII*, 2009
- [CCPS 2009] CCPS, (Center for Chemical Process Safety): *Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria*. Wiley-Blackwell, aug 2009. – URL <https://www.amazon.com/Guidelines-Developing-Quantitative-Safety-Criteria/dp/0470261404%3FSubscriptionId%3D0JYN1NVW651KCA56C102%26tag%3Dtechkie-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0470261404>. – ISBN 978-0-470-26140-8
- [Commission 2004] COMMISSION, Otsego County P.: White Paper: Land Use Issues of Wind Turbine Generator Sites / Otsego County Planning Commission. URL <http://web1.msue.msu.edu/cdnr/otsegowindicethrow.pdf>. – Zugriffsdatum: 2011-05-20, Januar 2004. – White Paper

- [COST-727 2007] COST-727: COST 727: Atmospheric Icing on Structures - Measurements and data collection on icing: State of the Art / MeteoSwiss. URL http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/meetings/Surface/ET-STMT-2/COST-727-report_MCH-V75.pdf. – Zugriffsdatum: 2013-04-08, 2007 (75). – Forschungsbericht. – 110 pp. S
- [DIN EN 50126 2016] DIN EN 50126: DIN EN 50126-1:2016-03; VDE 0115-103-1:2016-03 - Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS Prozess; Deutsche Fassung prEN 50126-1:2015 / Deutsches Institut für Normung e. V. März 2016 (DIN EN ISO 216:2007-12DIN EN 50126-1:2016-03). – Norm
- [DIN EN 61400-2 2015] DIN EN 61400-2: DIN EN 61400-2 VDE 0127-2:2015-05 Windenergieanlagen / Deutsches Institut für Normung e.V. Mai 2015 (EN 61400-2). – Norm
- [DIN EN ISO 216 2007] DIN EN ISO 216: DIN EN ISO 216:2007-12 - Schreibpapier und bestimmte Gruppen von Drucksachen - Endformate - A und B Reihen und Kennzeichnung der Maschinenaufrichtung (ISO 216:2007); Deutsche Fassung EN ISO 216:2007 / Deutsches Institut für Normung e. V. Dezember 2007 (DIN EN ISO 216:2007-12). – Norm
- [Drapalik 2017] DRAPALIK, Markus: *Experimental Investigation of Risk from Ice Shed and Ice Throw*. presentation at winterwind 2017. Februar 2017
- [Drapalik und Bredeesen 2017] DRAPALIK, Markus; BREDESEN, Rolv E.: Experimental validation of models for ice shed risk analysis. In: *World Wind Energy Conference, WWEC2017, Malmö, Sweden, 12-14 June 2017*, URL <https://wwec2017.com/wp-content/uploads/2017/06/Drapalik-Bredeesen-Experimental-validation-of-models-for-ice-shed-risk-analysis.pdf>, Juni 2017
- [Drapalik u. a. 2011] DRAPALIK, Markus; FORMAYER, Herbert; KROMP, Wolfgang; POSPICHAL, Bernhard: Risk of ice shed from wind turbines. In: BUDELMANN, H. (Hrsg.); HOLST, A. (Hrsg.); PROSKE, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Probabilistic Workshop*, November 2011
- [GWEC 2016] GWEC: GLOBAL WIND REPORT, ANNUAL MARKET UPDATE 2016 / Global Wind Energy Council. 2016. – techreport
- [Haraguchi 2009] HARAGUCHI, Y.: *A method for de-icing a blade of a wind turbine, a wind turbine and use thereof*. April 9 2009. – URL <https://www.google.com/patents/WO2009043352A2?c1=en>. – WO Patent App. PCT/DK2008/000,343
- [Homola 2005] HOMOLA, Matthew C.: Impacts and Causes of Icing on Wind Turbines / Narvik University College. November 2005. – Forschungsbericht
- [Hudecz u. a. 2014] HUDECZ, Adriána; HANSEN, Martin Otto L.; BATTISTI, Lorenzo; VILLUMSEN, Arne: *Icing Problems of Wind Turbine Blades in Cold Climates*, Technical University of Denmark, Dissertation, 2014. – URL http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:136829/datastreams/file_6a27a345-33a1-4774-a627-9e7bae99c525/content. – Zugriffsdatum: 2016-02-04
- [Hutton 2014] HUTTON, Gail: *Validating an Ice Throw Model: A Collaborative Approach*. Presentation at Winterwind 2014. Februar 2014
- [ISO12494 2001] ISO12494: ISO 12494:2001-08, Atmospheric Icing on Structures / International Organization for Standardization. 2001 (ISO 12494:2001-08). – Standard

- [Iversen 1979] IVERSEN, J.D.: Autorotating flat-plate wings: the effect of the moment of inertia, geometry and Reynolds number. In: *J. Fluid Mech.* (1979), vol. 92, part 2, pp. 327-348 92 (1979), Nr. part 2
- [Jokela u. a. 2017] JOKELA, Tuomas; KARLSSON, Timo; LEHTOMÄKI, Ville: *Standardizing ice detector tests in icing wind tunnel*. presentation at Winterwind 2017. Februar 2017
- [Jonsson 2012] JONSSON, Christoffer: *Further development of ENERCON's de-icing system*. presentation at Winterwind 2012. Februar 2012
- [Kakimpa u. a. 2012] KAKIMPA, B.; HARGREAVES, D.M.; OWEN, J.S.: An investigation of plate-type windborne debris flight using coupled CFD-RBD models. Part I: Model development and validation. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 111 (2012), dec, S. 95-103
- [Kim und Kedward 2000] KIM, Hyonny; KEDWARD, Keith T.: Modeling Hail Ice Impacts and Predicting Impact Damage Initiation in Composite Structures. In: *AIAA Journal* 38 (2000), Juli, Nr. 7, S. 1278-1288. – URL <https://doi.org/10.2514/2.1099>. – Zugriffsdatum: 2017-07-20. – ISSN 0001-1452
- [Kolar 2015] KOLAR, Sandra: A Comparison of Three Different Anti- and De-Icing Techniques Based on SCADA-Data. In: *IWAIS 2015 - 16th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Uppsala, Sweden, June 28 to July 3, 2015*, Juni 2015
- [Kordi und Kopp 2009] KORDI, B.; KOPP, Gregory A.: "The debris flight equations" by C.J. Baker. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97 (2009), mar, Nr. 3-4, S. 151-154
- [Korhonen u. a. 2013] KORHONEN, Juuso T.; HUHTAMÄKI, Tommi; IKKALA, Olli; RAS, Robin H. A.: Reliable Measurement of the Receding Contact Angle. In: *Langmuir* 29 (2013), Nr. 12, S. 3858-3863. – URL <http://dx.doi.org/10.1021/la400009m>. – PMID: 23451825
- [Kreder u. a. 2016] KREDER, Michael J.; ALVARENGA, Jack; KIM, Philseok; AIZENBERG, Joanna: Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? In: *Nature Reviews Materials* 1 (2016), Januar, S. 15003. – URL <http://dx.doi.org/10.1038/natrevmats.2015.3>
- [Krenn 2016] KRENN, Andreas: *Standardised Methodology for Ice Throw Risk Assessments (presentation)*. 2016. – URL http://www.nachhaltigwirtschaften.at/iea_pdf/reports/iea_wind_task19_standardised_methodology_for_ice_throw_risk_assessments.pdf. – Zugriffsdatum: 2016-06-25
- [Laakso u. a. 2009] LAAKSO, Timo; BARING-GOULD, I.; DURSTEWITZ, M.; HORBATY, R.; LACROIX, A.; PELTOLA, E.; RONSTEN, G.; L.TALLHAUG; WALLENIUS, T.: State of the art of wind energy in cold climates / IEA. August 2009. – Forschungsbericht
- [LeBlanc 2007] LEBLANC, M P.: Recommendations for risk assessment of ice throw and blade failure in Ontario / GARRAD HASSAN. 2007. – Forschungsbericht
- [Lehtomäki u. a. 2016] LEHTOMÄKI, Ville; KRENN, Andreas; JORDAENS, Pieter J.; WADHAM-GAGNON, Matthew; DAVIS, Neil; CLAUSEN, Niels-Erik; JOKELA, Tuomas; KAIJA, Saara; KHADIRI-YAZAMI, Zouhair; RONSTEN, Göran; WICKMAN, Helena; KLINTSTRÖM, Rebecka; CATTIN, René: Wind Energy in Cold Climates Available Technologies / IEA Task 19. July 2016. – Forschungsbericht
- [Li u. a. 2014] LI, Yan; TAGAWA, Kotaro; FENG, Fang; LI, Qiang; HE, Qingbin: A wind tunnel experimental study of icing on wind turbine blade airfoil. In: *Energy Conversion and*

- Management* 85 (2014), September, S. 591–595. – URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890414004373>. – Zugriffsdatum: 2016-02-04. – ISSN 01968904
- [Lin u.a. 2016] LIN, Yonggang; TU, Le; LIU, Hongwei; LI, Wei: Fault analysis of wind turbines in China. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016), März, S. 482–490. – URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115012289>. – Zugriffsdatum: 2016-02-04. – ISSN 13640321
- [Lunden 2017] LUNDEN, Jenny: *ICETHROWER - Mapping and tool for risk analysis*. presentation at Winterwind 2017. Februar 2017
- [Makkonen und Stallabrass 1984] MAKKONEN, L.; STALLABRASS, J.R.: Ice accretion on cylinders and wires / National Research Council of Canada, NRC. 1984 (TR-LT-005, NRCC0023649). – techreport. nictl verfügbar...
- [Makkonen 1998] MAKKONEN, Lasse: Modeling power line icing in freezing precipitation. In: *Atmospheric research* 46 (1998), Nr. 1, S. 131–142. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809597000562>. – Zugriffsdatum: 2013-04-08
- [Makkonen 2000] MAKKONEN, Lasse: Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 358 (2000), Nr. 1776, S. 2913–2939. – URL <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/358/1776/2913>. – ISSN 1364-503X
- [Makkonen 2012] MAKKONEN, Lasse: Ice adhesion - theory, measurements and countermeasures. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 26 (2012), Nr. 4-5, S. 413–445. – URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1163/016942411X574583>. – Zugriffsdatum: 2016-10-30
- [Meuler u.a. 2010] MEULER, Adam J.; SMITH, J. D.; VARANASI, Kripa K.; MARBY, Joseph M.; MCKINLEY, Gareth H.; COHEN, Robert E.: Relationships between Water Wettability and Ice Adhesion. In: *ACS Applied Materials & Interfaces* 2 (2010), Oktober, Nr. 11, S. 3100 – 3110. – URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/am1006035?prevSearch=Relationships%2Bbetween%2BWater%2BWettability%2Band%2BIce%2BAdhesion&searchHistoryKey=>. – PMID: 20949900
- [Michos u.a. 2002] MICHOS, D.; DIALYNAS, E.; VIONIS, P.: Reliability and Safety Assessment of Wind Turbines Control and Protection Systems. In: *Wind Engineering* 26 (2002), Nr. 6, S. 359–369. – URL <http://dx.doi.org/10.1260/030952402765173358>
- [Momen u.a. 2015] MOMEN, G.; JAFARI, R.; FARZANEH, M.: Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness. In: *Applied Surface Science* 349 (2015), September, S. 211–218. – URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433215010466>. – Zugriffsdatum: 2016-06-25. – ISSN 01694332
- [Morgan und Bossanyi 1996] MORGAN, Colin; BOSSANYI, Ervin: Wind turbine icing and public safety - a quantifiable risk? In: *Wind Energy Production in Cold Climates* (1996)
- [Morgan u.a. 1997] MORGAN, Colin; BOSSANYI, Ervin; SEIFERT, Henry: Assessment of safety risks arising from wind turbine icing. In: *EWEC-CONFERENCE*, 1997, S. 141–144
- [Moser 2017] MOSER, Michael: *So where exactly is the ice - how many sensors does a turbine need?* presentation at Winterwind 2017. Februar 2017
- [Márquez u.a. 2016] MÁRQUEZ, Fausto Pedro G.; PÉREZ, Jesús María P.; MARUGÁN, Alberto P.; PAPAELIAS, Mayorkinos: Identification of critical components of wind turbines

- using FTA over the time. In: *Renewable Energy* 87 (2016), März, S. 869–883. – URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115303177>. – Zugriffsdatum: 2016-02-04. – ISSN 09601481
- [Nahum 1975] NAHUM, Alan M.: The biomechanics of facial bone fracture. In: *The Laryngoscope* 85 (1975), Nr. 1, S. 140–156. – URL <http://dx.doi.org/10.1288/00005537-197501000-00011>. – ISSN 1531-4995
- [Nilsson 2017] NILSSON, Greger: *Hotspot resistant blade heat system*. presentation at Winterwind 2017. Februar 2017
- [Noda und Nagao 2010] NODA, Minoru; NAGAO, Fumiaki: Simulation of 6DOF motion of 3D flying debris. In: *Proceedings of the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) Chapel Hill, North Carolina, USA, May 23-27, 2010*, 2010
- [Owens und Wendt 1969] OWENS, D. K.; WENDT, R. C.: Estimation of the surface free energy of polymers. In: *Journal of Applied Polymer Science* 13 (1969), Nr. 8, S. 1741–1747. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/app.1969.070130815>. – ISSN 1097-4628
- [Paltrinieri und Khan 2016] PALTRINIERI, Nicola (Hrsg.); KHAN, Faisal (Hrsg.): *Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry: Evolution and Interaction with Parallel Disciplines in the Perspective of Industrial Application*. Butterworth-Heinemann, 2016. – URL http://www.ebook.de/de/product/26185676/dynamic_risk_analysis_in_the_chemical_and_petroleum_industry.html. – ISBN 978-0-12-803765-2
- [Parent und Ilinca 2011] PARENT, Olivier; ILINCA, Adrian: Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review. In: *Cold Regions Science and Technology* 65 (2011), jan, Nr. 1, S. 88–96. – URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.005>
- [Petrenko und Peng 2003] PETRENKO, V F.; PENG, S: Reduction of ice adhesion to metal by using self-assembling monolayers (SAMs). In: *Canadian Journal of Physics* 81 (2003), Nr. 1-2, S. 387–393. – URL <https://doi.org/10.1139/p03-014>
- [Pospichal und Formayer 2011] POSPICHAL, Bernhard; FORMAYER, Herbert: Bedingungen für Eisansatz an Windkraftanlagen in Nordostösterreich - Meteorologische Bedingungen und klimatologische Betrachtungen / Universität für Bodenkultur - Institut für Meteorologie. Mai 2011 (Erweiterte Fassung). – Forschungsbericht
- [Proctor 1982] PROCTOR, Thomas D.: A review of research relating to industrial helmet design. In: *Journal of Occupational Accidents* 3 (1982), Nr. 4, S. 259 – 272. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0376634982900037>. – ISSN 0376-6349
- [Pöyry 2017] PÖYRY: *ICETHROWER Database and Software*. online Database. 2017. – Available online <https://onepoyry.sharepoint.com/sites/8H50156.100/Project>
- [Rademakers u.a. 1993] RADEMAKERS, L.W.M.M.; SEEBREGTS, A.J.; HORN, B.A. van den; JEHEE, J.N.T.; BLOK, B.M.: Methodology for Probabilistic Safety Assessment of Wind Turbines / Netherlands Energy Research Foundation. März 1993 (ECN-C-93-010). – resreport
- [Rausand 2013] RAUSAND, Marvin: *Risk assessment: theory, methods, and applications*. Bd. 115. John Wiley & Sons, 2013
- [Ribrant und Bertling 2007] RIBRANT, Johan; BERTLING, Lina M.: *Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997 - 2005*. März 2007. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/4106014/>

- [Richards u. a. 2008] RICHARDS, Peter J.; WILLIAMS, Nathan; LAING, Brent; MCCARTY, Matthew; POND, Michael: Numerical calculation of the three-dimensional motion of wind-borne debris. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008), Oktober, Nr. 10, S. 2188–2202
- [Schnieder und Schnieder 2013] SCHNIEDER, Eckehard; SCHNIEDER, Lars: *Verkehrssicherheit*. Springer-Verlag GmbH, 2013. – URL http://www.ebook.de/de/product/10052242/eckehard_schnieder_lars_schnieder_verkehrssicherheit.html. – ISBN 3540710329
- [Seifert 1996] SEIFERT, Henry: Boreas III: Hot Discussions on Cold Climate Operation of Wind Turbines. In: *DEWI Magazin* 9 (1996), S. 87–89
- [Seifert 2003] SEIFERT, Henry: Technical requirements for rotor blades operating in cold climate. In: *BOREAS VI* Bd. 9, 2003
- [Seifert 2007a] SEIFERT, Henry: *Eisansatz an Rotorblättern - Betrieb von Windenergieanlagen in kaltem Klima*. Juni 2007. – URL http://www.meteotest.ch/cost727/eisundfels/pdf/seifert_EundF_07_part1.pdf. – Zugriffsdatum: 2013-04-08
- [Seifert 2007b] SEIFERT, Henry: *Risikoabschätzung des Eisabwurfs von Windenergieanlagen*. Juni 2007. – URL http://www.meteotest.ch/cost727/eisundfels/pdf/seifert_EundF_07_part2.pdf. – Zugriffsdatum: 2013-04-08
- [Seifert und Richert 1997] SEIFERT, Henry; RICHERT, Frank: Aerodynamics of iced airfoils and their influence on loads and power production. In: *EWEC-CONFERENCE*, 1997, S. 458–463
- [Seifert u. a. 2003] SEIFERT, Henry; WESTERHELLWEG, A.; KRÖNING, J.: Risk analysis of ice throw from wind turbines. In: *BOREAS* 6 (2003), Nr. 9
- [Siegmann u. a. 2006] SIEGMANN, Konstantin; KAUFMANN, André; HIRAYAMA, Martina: Anti-freeze Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen / Zürcher Hochschule Winterthur. Winterthur, Dezember 2006. – Schlussbericht. – URL <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009108.pdf&name=000000260051.pdf>. – Zugriffsdatum: 2013-04-08
- [Siegmann u. a. 2011] SIEGMANN, Konstantin; SUSOFF, Markus; HIRAYAMA, Martina: Nichtvereisende Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen. In: *Schweizerische Eidgenossenschaft* (2011)
- [Sørensen und Toft 2010] SØRENSEN, John D.; TOFT, Henrik S.: Probabilistic Design of Wind Turbines. In: *Energies* 3 (2010), Nr. 2, S. 241–257. – URL <http://www.mdpi.com/1996-1073/3/2/241>. – ISSN 1996-1073
- [Tachikawa 1983] TACHIKAWA, M.: Trajectories of flat plates in uniform flow with application to wind-generated missiles. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 14 (1983), S. 443–453
- [Tammelin u. a. 1998] TAMMELIN, B.; CAVALIERE, M.; HOLTINEN, H.; MORGAN, C.; SEIFERT, H.; SÄNTTI, K.: Wind Energy Production in Cold Climates (WECO) / Finnish Meteorological Institute. URL <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/47698271EN6.pdf>. – Zugriffsdatum: 2015-09-22, 1998. – Forschungsbericht
- [Tetrattech EC 2007] TETRATTECH EC, Inc: Exhibit 14: Ice Shedding / Blade Throw Analysis / Tetrattech EC, Inc. URL http://www.horizonwindfarms.com/northeast-region/documents/under-dev/arkwright/Exhibit14_

- IceSheddingandBladeThrowAnalysis.pdf. – Zugriffsdatum: 2011-05-20, Dezember 2007. – Forschungsbericht
- [Virk u. a. 2012] VIRK, Muhammad S.; HOMOLA, Matthew C.; NICKLASSON, Per J.; OTHERS: Atmospheric icing on large wind turbine blades. In: *Int. J. Energy Environ* 3 (2012), S. 1–8. – URL <http://core.ac.uk/download/pdf/25731174.pdf>. – Zugriffsdatum: 2016-02-05
- [Wahl und Giguere 2006] WAHL, D.; GIGUERE, P.: Ice Shedding and Ice Throw Risk and Mitigation. In: *Wind Application Engineering. GE Energy, Greenville, SC* (2006)
- [WicetecLtd. 2016] WICETEC LTD.: *Wicetec Ice Prevention System*. Infosheet. 2016
- [World Meteorological Organization 2008] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. Geneva : World Meteorological Organization, 2008. – OCLC: 928941505. – ISBN 978-92-63-10008-5
- [Wu 1973] WU, Souheng: Polar and Nonpolar Interactions in Adhesion. In: *The Journal of Adhesion* 5 (1973), Nr. 1, S. 39–55. – URL <http://dx.doi.org/10.1080/00218467308078437>
- [Young 1805] YOUNG, Thomas: An essay on the cohesion of fluids. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 95 (1805), Nr. 0, S. 65–87
- [Zajcek 2017] ZAJCEK, Larissa J.: *Probabilistic Safety Analysis for Small Wind Turbines*, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna Department of Water - Atmosphere - Environment Institute of Safety and Risk Sciences, Masterarbeit, April 2017
- [Zajcek und Drapalik 2017] ZAJCEK, Larissa; DRAPALIK, Markus: Risikoanalyse der Nutzung von Kleinwindkraftanlagen in urbanen Gebieten. In: *Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe an der TU Wien (ESEA), IEWT 2017: Klimaziele 2050: Chancen für einen Paradigmenwechsel?* Bd. 9, Februar 2017

7 Tabellenverzeichnis

2.1	Eistypen und deren Eigenschaften nach ISO12494 (2001)	20
2.2	Meteorologische Parameter für atmosphärische Vereisung nach ISO12494 (2001)	20
3.1	Übersicht über die für Abwurf-Experimente eingesetzten Holz-Probekörper . . .	31
3.2	Übersicht über die durchgeführten Abwurfversuche mit Holzprobekörpern . . .	31
3.3	Übersicht über die eingesetzten Probekörper nach durchgeführten Abwürfen . .	32
3.4	Übersicht über die durchgeführten Eisfall-Beobachtungen	40
3.5	Überblick über relevante Windkraftanlagen für Eiswurfuntersuchungen	51
3.6	Mögliche Vorlagen für Probekörper und ihre charakterisierenden Parameter Maße (X , Y und Z), Dichte (ρ), Volumen V und Original-Masse (m). Weiters die sich ergebende Masse m' bei einer standardisierten Dichte von 600 kg m^{-3} und die korrespondierende Aufprallenergie bei 20 m s^{-1} Endgeschwindigkeit für Originalmasse (E) und Masse bei standardisierter Dichte (E').	54
3.7	Übersicht über die benutzten flachen, plattenförmigen Probekörper	59
3.8	Übersicht über die benutzten gebogenen, plattenförmigen Probekörper	59
3.9	Übersicht über die benutzten 3D gedruckten Probekörper	59
3.10	Übersicht über die benutzten zylindrischen Probekörper	59
3.11	Übersicht über effektive Flächen (A_1 ist der Mittelwert der projizierten Oberfläche, A_2 die maximale Fläche) und Formfaktoren	60
3.12	Übersicht über die Korrelation zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit für an beiden Tagen abgeworfene Probekörpertypen mit $N > 5$. Negative Korrelationskoeffizienten werden kursiv dargestellt, positive > 0.3 fett gedruckt N_m . . . Anzahl Probekörperpositionen an Tag m , ρ_{tot} . . . Korrelation für alle Tage, ρ_m . . . Korrelation für Tag m , $\rho_{m,n}$. . . Korrelation für Tag m Durchgang n	66
3.13	Maximaldrehzahl, Rotorradius und resultierende Blattspitzengeschwindigkeit einiger ausgewählter KWEA	75
3.14	Übersicht über die für Versuche zum Eiswurf bei KWEA eingesetzten Probekörper	79
3.15	Übersicht über die Anzahl abgeworfener Probekörper und die sich ergebenden Wurfweiten	81
8.1	Übersicht über die untersuchten Fragmente	141
8.2	Signifikanzwert p und Korrelationskoeffizient R für polare (θ, ρ) und kartesische (x, y) Darstellung der räumlichen Verteilung der Probekörper. Für viele Probekörpertypen sind signifikante Korrelationen ($p < 0.05$) feststellbar (kursiv hervorgehoben), d.h. die Breite der Verteilung hängt linear von der Fallweite ab.	142

8.3	Signifikanzwerte für vier verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Beschreibung der räumlichen Verteilung der Probekörper in Polarkoordinaten jeweils an beiden Versuchstagen. Werte unter 0.05 unterschreiten das Signifikanzniveau und zeigen, dass die Verteilung zur Beschreibung der Verteilung der jeweiligen Probekörper nicht geeignet ist.	143
-----	---	-----

8 Abbildungsverzeichnis

2.1	Arten der Eisbildung in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur aus ISO12494 (2001, S7). „Glaze“ entspricht Klareis, „Hard rime“ Raueis und „Soft rime“ Raureif.	20
2.2	Kontaktwinkel und Oberflächenenergien	26
3.1	Fallweiten (links) und Richtungsverteilung (rechts) der Probekörper Fmz im Vergleich bei Abwurfhöhe 60 m und 200 m mit überlagerter angepasster Normalverteilung. Wie zu erwarten ist, nimmt die Breite der Fallweitenverteilung mit der Fallweite zu.	32
3.2	Erreichte Falldistanzen lattenförmiger Probekörper (200x15x4 cm) mit einer Dichte von 0.47 g cm^{-3} von einer Höhe von 200 m abgeworfen mit angepassten Normaverteilungen (unter Ausschluss von Ausreißern). Die Streuung ist sehr breit, die Ergebnisse bei gleicher Abwurfhöhe zwar ähnlich aber deutlich verschoben.	33
3.3	Erreichte Falldistanzen lattenförmiger Probekörper (200x15x4 cm) mit einer Dichte von 0.47 g cm^{-3} von einer Höhe von 100 m abgeworfen. Wie zu erwarten erreichen die Probekörper bei geringfügig höherer Windgeschwindigkeit auch geringfügig höhere Fallweiten.	34
3.4	Zweidimensionale Verteilung der Probekörper Fmz im Vergleich bei Abwurfhöhe 60 m und 200 m mit überlagerten Isolinien der angepassten zweidimensionalen Normalverteilung.	34
3.5	Vergleich der Abhängigkeit der Fallweite verschiedener Probekörper von der Windgeschwindigkeit. Die Fallweiten wurden auf eine angenommene Abwurfhöhe von 200 m umgerechnet. Eine Zunahme der Fallweite mit der Windgeschwindigkeit ist nur für den Probekörpertyp Mmz klar zu erkennen.	35
3.6	Schemata für Kamera-Aufbau und Fragmentvermessung bei Eisfall-Beobachtungen	36
3.7	Dicke des Eisansatzes auf zwei Rotorblättern im Fall von Vereisung an der führenden Kante des Rotorblattes	40
3.8	Beispiel für flächige Vereisung, erkennbar an der windabgewandten Seite des Rotorblattes	41
3.9	Raueisbildung verstärkt an der Vorderkante, aber auch an der Leeseite des Rotorblattes	41
3.10	Vergleich der Fallweiten bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 4 m s^{-1} bei einer Anlagengesamthöhe von 100 m (links) und 12 m s^{-1} und einer Anlagengesamthöhe von 179 m (rechts). Bei niedriger Geschwindigkeit liegen die meisten Eisfragmente innerhalb des Rotorradius, bei hohen liegt etwa die Hälfte außerhalb der Grenze aus der Seifert-Formel.	42

3.11	Vergleich der Fallweiten bei linearer Anpassung abhängig von Windgeschwindigkeit und Nabenhöhe der jeweiligen Anlage. Für geringfügige Anpassungen (WP 1-3) rücken die Maxima der Verteilungen in einen ähnlichen Bereich. . . .	43
3.12	Vergleich der Fallweiten in Abhängigkeit von der Nabenhöhe bei linearer Anpassung der Windgeschwindigkeit auf 7 m s^{-1} . Ein grob linearer Zusammenhang zwischen Fallweite und Nabenhöhe ist zu erkennen.	43
3.13	Vergleich der Fallweiten in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit bei linearer Anpassung der Nabenhöhe auf 110 m. Ein grob linearer Zusammenhang zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit ist erkennbar.	44
3.14	Exemplarische Verteilung von Eisfragmenten im WP 2. Die WEA befindet sich im Ursprung, die Gradangaben sind willkürlich gewählt.	45
3.15	Eine deutlich ausgeprägte Zunahme der Breite mit der Länge der fallenden Fragmente zeigte sich bei der Beobachtung in WP 2.	46
3.16	Zunahme der Fallweite mit Abnahme der Fragmentlänge am Beispiel des WP 2. Die Fragmentbreite wird durch die Größe der Kreise dargestellt.	47
3.17	Histogramme der Längen- (links) und Breitenverteilung (rechts) bei der Beobachtung in WP 2 (91 Fragmente). In diesem Fall treten überwiegend Längen von 30 m bis 50 m auf, während die Breitenverteilung kein ausgeprägtes Maximum aufweist.	47
3.18	3D Scan eines Eisfragments.	48
3.19	Histogramm der Dichte aller gesammelten Eisfragmente. Raueis mit einer Dichte von 0.6 kg m^{-3} tritt am häufigsten auf.	48
3.20	Modellierung der Trajektorien	49
3.21	Beispiel für Geschwindigkeiten und Beschleunigungen eines fallenden Eisfragments. Die radiale Geschwindigkeit ist vergleichsweise niedrig.	50
3.22	Boxplot der gemessenen Endgeschwindigkeiten bei beobachtetem Eisfall: Die Engeschwindigkeiten sind grob normalverteilt, der Mittelwert liegt bei 26 m s^{-1}	50
3.23	Verhältnis Masse zu Wurfweite für die untersuchten KWEA: Für die Anlage Schachner SW 5 wurde für die geringere Masthöhe linear korrigiert. Es ergeben sich geringere Wurfweiten für höhere Massen.	52
3.24	Fundorte von Eisfragmenten, den jeweiligen Anlagen zugeordnet. Die Linien zeigen die angenommene Wurfebene.	52
3.25	Histogramme der Fallweitenverteilung (links) und der Massenverteilung (rechts) bei Eiswurf von KWEA.	53
3.26	3D Scan des Fragments A2	56
3.27	3D Modelle des Fragments C2 in Originalform und Vereinfachung	57
3.28	Modellgenerierung für Klareisprobekörper.	57
3.29	Gemessene Windgeschwindigkeit und -richtung während der drei durchgeführten Abwurfdurchgänge am Tag 1. Die strichlierte Linie markiert den zeitlichen Sprung zwischen zwei Durchgängen.	61
3.30	Kamerapositionen an Tag 1	61
3.31	Kamerapositionen an Tag 2, bei „wind“ befindet sich der Windmessmast	61
3.32	Gemessene Windgeschwindigkeit und -richtung, geglättet über 10 Minuten Intervalle, während der zwei durchgeführten Abwurfdurchgänge an Tag 2. Die gestrichelte Linie markiert den zeitlichen Sprung zwischen zwei Durchgängen. .	62
3.33	Windgeschwindigkeitsverteilungen an beiden Versuchstagen. Es ergeben sich mittlere Windgeschwindigkeiten von 3.4 m s^{-1} und 9.7 m s^{-1}	63

3.34	Vergleich von Normal- und logistischer Verteilung für Probekörpertyp Akz an Tag 1. Obwohl qualitativ eine logistische Verteilung angemessener erscheint, ist die Übereinstimmung nicht messbar besser.	64
3.35	Ein linearer Zusammenhang zwischen Fallweite und Windgeschwindigkeit kann für den Probekörpertyp Akz bei Betrachtung beider Versuchstage festgestellt werden, für individuelle Versuchstage ergibt sich kein Zusammenhang.	65
3.36	Vergleich der Verteilungen der flachen Akz Probekörper mit den gebogenen PS A5 an Tag 1. Flache Probekörper erreichen bei gleichen Bedingungen höhere Fallweiten.	67
3.37	Angepasste zweidimensionale Normalverteilung für die Probekörpertypen Amz und PS A4. Die Reduktion der Fallweite durch die Krümmung der PS A4 wird durch die höhere Masse der Amz teilweise kompensiert.	67
3.38	Vergleich der Verteilungen der Probekörper des Typs C2 mit ihrer vereinfachten Variante an beiden Versuchstagen.	68
3.39	Fallweiten zylindrischer Probekörper bei Windgeschwindigkeiten von $3.2 \pm 1.0 \text{ m s}^{-1}$. Besonders auffällig ist die große Fallweite der 50 cm langen, 8 cm durchmessenden Halbzylinder, die mit einfachen Modellen nicht erklärt werden kann.	69
3.40	Beispiel für eine gekrümmte Probekörper-Flugbahn. Kreuze markieren Messpunkte, die verbindende Linie dient der Orientierung. Die Zahlen neben den Messpunkten geben die Höhe relativ zum Turmfuß wieder.	70
3.41	Beispiel für die Änderung des Raumwinkels θ mit der radialen Distanz: alle Probekörper sind vom Typ PS A4, zeigen aber gänzlich unterschiedliches Verhalten.	71
3.42	Beispiel für die Veränderung der Höhe mit dem radialen Abstand, sowie die lineare Näherung und Näherung mit Polygon dritter Ordnung im Vergleich - letzteres beschreibt die Daten deutlich besser.	71
3.43	Beispiel für die Geschwindigkeit eines Probekörpers. Zahlen neben den Markierungen geben die Höhe an. Ein einzelner Messfehler bei ca 3.5 s ist erkennbar, sowie die Unsicherheit bei geringen Höhen (an den letzten zwei Messwerten abzulesen).	72
3.44	Vergleich der Endgeschwindigkeiten verschiedener Probekörpertypen. Sie variieren stark nach Probekörpertyp.	73
3.45	Experimenteller Aufbau für Eiswurf-Untersuchungen bei KWEA.	77
3.46	Probekörpertyp NBL an der Fundstelle (links) und das dazu passende 3D-Modell (rechts).	78
3.47	Probekörpertyp NAL an der Fundstelle (links) und das dazu passende 3D-Modell (rechts).	78
3.48	Probekörper für Eiswurf. Der Kabelbinder für Schnellmontage und die Zündkapsel mit Verkabelung sind links oben und unten zu erkennen.	79
3.49	Fundorte der geworfenen Probekörper an Versuchstag 1. Die Verfactung in Windrichtung (normal zur Wurfebene) ist deutlich erkennbar.	81
3.50	Endgeschwindigkeiten der gemessenen Trajektorien.	82
3.51	Vergleich der Auswirkung des logarithmischen Windprofils gegenüber konstanter Windgeschwindigkeit auf die Fallweite im Biswas Modell für die Trajektorie. Die Unterschiede der Fallweiten betragen ca. 10%.	85
3.52	Vergleich der Auswirkung des logarithmischen Windprofils gegenüber konstanter Windgeschwindigkeit auf die Fallweite im Biswas Modell für die Variation der Windgeschwindigkeit.	85

3.53	Die Zunahme der durchschnittlichen Fallweite mit der Windgeschwindigkeit zeigt einen linearen Zusammenhang.	87
3.54	Die Zunahme der durchschnittlichen Fallweite mit der Höhe erfolgt in drei Phasen: exponentielle Zunahme (hier bis ca 30 m), schnelle lineare Zunahme (hier bis ca 510 m) und langsame lineare Zunahme	88
3.55	Variation der Fallweite mit dem initialen Winkel der fallenden Platte im Baker-Modell	88
3.56	Vergleich zwischen Modellen und Experiment für Versuchstag 1 in Boxplots, + markieren Ausreißer.	91
3.57	Vergleich zwischen Modellen und Experiment für Versuchstag 2 in Boxplots, + markieren Ausreißer.	92
3.58	Vergleich zwischen Modellen und Experiment für Versuchstag 2 für zylindrische Probekörper als Boxplots, + markieren Ausreißer.	93
3.59	Vergleich zwischen Modellen und Experiment für die Endgeschwindigkeiten am Versuchstag 1. Die hellblauen Linien zeigen die 40 J Grenze für Risikorelevanz. Für den Probekörper Mmx liegt die Grenze bei ca. 7 m s^{-1} und daher nicht mehr auf der Abbildung.	94
3.60	Vergleich zwischen Experiment und Simulation für die Wurfweite zur Höhe. Die Simulation überschätzt die Wurfweite um ca. 17%.	95
3.61	Vergleich zwischen Experiment und Simulation für Bewegung längs (in Richtung negativer y-Achse) und quer zum Wind. Die Simulation unterschätzt den Einfluss des Windes deutlich.	95
3.62	Beispiele für Risiko-Flächen bei unterschiedlichen Auflösungen. Die Grafiken dienen der qualitativen Darstellung, Achsen daher in beliebigen Einheiten. . . .	97
3.63	Windrose für Windverhältnisse während und bis zu eine Stunde nach möglicher Vereisung in Lichtenegg für den Winter 2016/17. Während der relevanten Zeit treten überwiegend Winde aus Norden oder Süden auf, eine Häufung hoher Geschwindigkeiten findet sich aus Nordwesten.	99
3.64	Histogramm der Windgeschwindigkeiten während und bis zu eine Stunde nach möglicher Vereisung in Lichtenegg für den Winter 2016/17. Während der Großteil der gemessenen Werte einer Weibullverteilung folgt, findet sich eine Häufung von Messwerten bei 16 m s^{-1}	100
3.65	Beispiel für Risikoflächen bei Eiswurf von einer KWEA in 16 m Höhe für einen Typ von Eisfragment. Die Anlage befindet sich im Ursprung der Darstellung, der Einfluss der ausgeprägten Windrichtungsverteilung ist deutlich erkennbar. .	100
5.1	Windrichtungsverteilung (links) und maximaler Mittelwind (rechts) nach Vereisungsereignissen im ostösterreichischen Flachland basierend auf 30 Jahren meteorologischer Daten (aus Pospichal und Formayer 2011).	113

Abkürzungen

Abk	Abkürzung
ALARA	As Low As Reasonbly Achievable
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cDAom	„cD Area over mass“ - Formfaktor
CFD	Computational Fluid Dynamics
d.h.	das heißt
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
ggf.	gegebenenfalls
GWEA	Großwindenergieanlage
IEA	International Energy Agency
ISR	Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
KWEA	Kleinwindenergieanlage
LIRA	Localized Individual Risk per Annum
LWC	liquid water content - Flüssigwassergehalt
mpO	mittlere projizierte Oberfläche
MVD	mittlerer Volumendurchmesser
o.ä.	oder ähnliches
PSA	probabilistische Sicherheitsanalyse
u.ä.	und ähnliches
WEA	Windenergieanlage
WP	Windpark
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
z.B.	zum Beispiel

Anhang

Fragmentbezeichnung	Volumen (in cm ³)	Gewicht (in g)	Dichte (in g/cm ³)
x1	801.45	290.6	0.36
I	244.40	95.2	0.39
D0	244.20	96.5	0.40
B2'	995.05	411.7	0.41
C	424.32	180.0	0.42
B	958.34	414.0	0.43
H	358.75	159.0	0.44
H2	173.65	84.2	0.48
G	235.70	120.4	0.51
F	457.08	248.2	0.54
G2	208.04	120.3	0.58
B2	218.97	135.0	0.62
L2	98.44	62.9	0.64
F2	258.80	170.2	0.66
E	311.43	205.6	0.66
J2	160.86	108.5	0.67
C2	1202.70	820.0	0.68
A2	372.45	260.0	0.70
D2	982.72	690.0	0.70
E2 Part 1	427.44	300.2	0.70
A	73.98	56.2	0.76
E2 Part 2	282.08	225.1	0.80
I5	92.74	89.0	0.96
L1	1459.89	1010.0	0.69
Mittelwert	437	246	0.59
St.Abw.	370	230	0.15
Minimum	74	56	0.36
Maximum	1460	1010	0.96

Tabelle 8.1: Übersicht über die untersuchten Fragmente

Typ_Tag	polar		kartesisch	
	p-Wert	R	p-Wert	R
A2_2	0,11	-0,47	0,05	0,55
A2_cut_2	0,60	-0,27	0,08	0,76
Akz_1	0,00	-0,65	0,02	-0,44
Akz_2	0,13	-0,35	0,55	0,14
Amz_1	0,30	-0,20	0,91	-0,02
Amz_2	0,01	-0,55	0,82	-0,05
C2Loft_1	0,83	0,06	0,23	0,36
C2Loft_2	0,96	0,01	0,37	0,23
C2_1	0,36	-0,25	0,34	-0,26
C2_2	0,92	-0,05	0,35	0,42
Fgy_2	0,15	-0,36	0,57	-0,15
Fkx_1	0,79	0,05	0,46	0,14
M24_1	0,29	0,37	0,29	0,37
PS A4_1	0,93	-0,02	0,26	0,23
PS A4_2	0,10	-0,37	0,81	0,06
PS A5_1	0,35	0,23	0,19	0,31
PS A5_2	0,03	-0,48	0,02	-0,50
Z6HK_2	0,07	-0,48	0,19	0,36
Z6HL_2	0,02	-0,57	0,19	-0,36
Z6VK_2	0,35	-0,26	0,16	-0,38
Z6VL_2	0,86	-0,05	0,86	0,05
Z8HK_2	0,03	-0,58	0,34	0,28
Z8VK_2	0,74	-0,10	0,19	0,36
Z8VL_2	0,54	-0,17	0,04	0,55

Tabelle 8.2: Signifikanzwert p und Korrelationskoeffizient R für polare (θ, ρ) und kartesische (x, y) Darstellung der räumlichen Verteilung der Probekörper. Für viele Probekörpertypen sind signifikante Korrelationen ($p < 0.05$) feststellbar (kursiv hervorgehoben), d.h. die Breite der Verteilung hängt linear von der Fallweite ab.

Typ	R				θ			
	Normal	Extremwert	logistisch	Weibull	Normal	Extremwert	logistisch	Weibull
A2	0.98	0.96	0.96	0.80	0.59	0.10	0.65	0.41
A2 vereinfacht	0.06	0.03	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
Akz	0.78	0.36	0.64	0.81	0.00	0.00	0.00	0.06
Amz	0.80	0.92	0.81	0.52	0.00	0.00	0.00	0.02
C2	0.04	0.03	0.02	0.01	0.19	0.17	0.15	0.11
C2 vereinfacht	0.17	0.00	0.27	0.26	0.22	0.71	0.26	0.09
Fgy	0.39	0.40	0.33	0.30	0.00	0.00	0.00	0.02
PS A4	0.67	0.77	0.61	0.38	0.77	0.45	0.80	0.75
PS A5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.10	0.00	0.19	0.15
Z6HK	0.58	0.26	0.66	0.39	0.01	0.01	0.01	0.11
Z6HL	0.97	0.85	0.94	0.89	0.00	0.00	0.00	0.06
Z6VK	0.27	0.19	0.45	0.28	0.06	0.01	0.07	0.03
Z6VL	0.79	0.35	0.89	0.72	0.01	0.00	0.01	0.00
Z8HK	0.08	0.22	0.05	0.01	0.02	0.04	0.00	0.27
Z8VK	0.02	0.01	0.02	0.02	0.44	0.54	0.57	0.51
Z8VL	0.88	0.65	0.89	0.84	0.13	0.21	0.12	0.12
Akz	0.05	0.80	0.14	0.48	0.74	0.38	0.69	0.53
Amz	0.80	0.51	0.76	0.80	0.96	0.70	0.93	0.88
C2	0.02	0.00	0.04	0.01	0.23	0.11	0.19	0.17
C2 vereinfacht	0.48	0.31	0.49	0.43	0.84	0.84	0.87	0.87
Fkx	0.11	0.02	0.07	0.06	0.16	0.87	0.26	0.53
M24	0.44	0.45	0.46	0.49	0.03	0.01	0.01	0.02
PS A4	0.25	0.04	0.27	0.17	0.26	0.04	0.21	0.10
PS A5	0.27	0.07	0.22	0.21	0.57	0.58	0.53	0.52

Tabelle 8.3: Signifikanzwerte für vier verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Beschreibung der räumlichen Verteilung der Probekörper in Polarkoordinaten jeweils an beiden Versuchstagen. Werte unter 0.05 unterschreiten das Signifikanzniveau und zeigen, dass die Verteilung zur Beschreibung der Verteilung der jeweiligen Probekörper nicht geeignet ist.

Lebenslauf

Name: Markus Drapalik
Geburtsdatum: 11. August 1984
Geburtsort: Wien, Österreich

Beruflicher Werdegang

seit 2010 tätig als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Sicherheit- und Risikowissenschaften der Universität für Bodenkultur Wien

Projekte (Auszug)

seit 2014	Untersuchung von Risiken Urbaner Windenergie
2012 - 2016	Beobachtung von Eisabfall von Windenergieanlagen
2011 - 2013	FOCUS - Foresight Security Scenarios: Mapping Research to a Comprehensive Approach to Exogenous EU Roles
seit 2010	Gutachten zum Risiko von Eisabfall durch Windenergieanlagen
2010 - 2011	OPAL - Optimierung der Schnittstelle zwischen agrarischer Landnutzung und Verwertung erneuerbarer agrarischer Energieträger

Ausbildung

2010 - 2017	Doktoratsstudium an der Universität für Bodenkultur Wien Doktorarbeit: „Risiken der Vereisungs-Problematik bei Windenergieanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Situation in Österreich“ Betreuer: Wolfgang Kromp, Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften
2003 - 2010	Physikstudium an der Universität Wien Diplomarbeit: „Investigations of the ability of photovoltaic solar power generators to receive RF radiation“ Betreuer: Viktor Schlosser, Institut für Festkörperphysik
2002 - 2003	Zivildienst am Otto Wagner-Spital, Wien
1994 - 2002	Gymnasium und Realgymnasium Parhamerplatz, Wien
1990 - 1994	Volksschule Landsteiner-gasse, Wien