

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

29-03-2013

Projekttitlel:

SNOW

Projektnummer:

829757

AutorInnen:

Universität für Bodenkultur Wien

Mag. Dr. Burkart Julia

Dipl. Ing. Bacher Michael

Dr. Sergey Sokratov

Technische Universität Wien

Dipl. Ing. Dr. Breiling Meinhard

Fred G. Best

Dipl. Ing. Dr. Harasek Michael

Dipl. Ing. Dr. Siegmann Tanja

NEUE ENERGIEN 2020

Endbericht – Tätigkeitsbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

1 Projektdaten

Kurztitel	SNOW	
Langtitel	Schneekristallbildung in einer künstlichen Wolke zum Einsatz als Schneeerzeuger	
Projektnummer	829757	
Programm/Programmlinie	Neue Energien 2020 4 Ausschreibung	
ProjektnehmerIn	Universität für Bodenkultur Wien Michael Bacher, DI	
ProjektpartnerInnen	Technische Universität Wien Siemens AG Österreich	
Projektstart u. - Dauer	Projektstart: 01.10.2010	Dauer: 27 Monate
Berichtszeitraum	[von 01.10.2010 bis 31.12.2012]	

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Synopsis:

SNOW wird die Produktion von Schneekristallen in einem Behälter erforschen, in dem die Bedingungen einer Wolke kontrolliert nachgebildet werden. Dieser Schnee ist in seiner Form und Dichte natürlichem Schnee sehr ähnlich und stellt eine energieeffizientere und ökologisch vorteilhafte Alternative zu herkömmlichen Kunstsnee dar.

Inhaltsverzeichnis

1	Projektdaten.....	1
2	Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit	5
2.1	Projektabriss.....	5
2.1.1	Kurzbeschreibung des Projektes	5
2.1.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Projektes.....	6
2.1.3	Ausblick und Resümee	7
2.2	Inhalte und Ergebnisse des Projektes	8
2.2.1	Ausgangssituation/Motivation des Projektes.....	8
2.2.2	Zielsetzungen des Projektes.....	8
2.2.3	Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Projektes inkl. Methodik	8
2.2.3.1	Optimierung eines Versuchsbehälters (AP1)	8
2.2.3.2	Versuchsbehälter im Kältelabor (AP1).....	11
2.2.3.3	Erfassung von Messdaten.....	13
2.2.3.4	Zerstäubungstechnik.....	14
2.2.3.5	Beobachtung Eiskristalle	15
2.2.3.6	Mathematisches Modell zur Schneekristallbildung	16
2.2.3.7	PDA Messungen in Laborversuchen der TUW unter der Verwendung von Ultraschallzerstäubern und Zerstäuberdüsen (AP1).....	18
2.2.3.8	Strömungssimulation (AP2).....	19
2.2.3.9	Optimierung der Produktion von Schneekristallen (AP2)	19
2.2.3.10	Ausbringen der Schneekristalle (AP2)	21
2.2.3.11	Energiebedarf.....	21
2.2.3.12	Einbettungsanalyse (AP5)	21
2.2.3.13	Projektmanagement (AP6)	22
2.2.4	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	22
2.2.4.1	Eiskristallbildung.....	22
2.2.4.2	PDA Messungen	23
2.2.4.3	Strömungssimulation	23
2.2.4.4	Schneekristallbildung als Funktion der Luft- und Wassertemperatur.....	25
2.2.4.5	Kontinuierliche Schneeproduktion	26
2.2.4.6	Energiebedarf und Anwendungsmöglichkeiten.....	26
2.2.4.7	Einbettungsanalyse	26

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

2.2.4.8	Verbreitungsmaßnahmen	26
2.2.4.9	Berichtswesen	27
2.2.5	Beschreibung der eventuellen Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten Ziele	27
2.2.6	Beschreibung der „Highlights“ des Projektes	27
2.2.7	Beschreibung und Begründung der Unterschiede zum ursprünglichen Projektantrag	28
2.3	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	28
2.4	Arbeits- und Zeitplan.....	30
2.5	Anhang	31
2.5.1	Skizze des Versuchsaufbaus	31
2.5.2	Schneekristallklassifikation	32
2.5.3	Energiebilanz des Versuchsreaktors	33
2.5.4	Abbildungsverzeichnis	35
2.5.5	Literaturangaben.....	36
2.5.5.1	Infos zur Eiskeimproduktion	36
2.5.5.2	Hinweise für eine Weiterentwicklung der Bauweise	36
2.5.5.3	Aktuelle Studien zum Wachstum von Eiskristallen bei unterschiedlichen Bedingungen 37	
2.5.5.4	Klassifikation von Eiskristallen	37
2.5.5.5	Wissenschaftliche Schneeerzeugung	37
2.5.5.6	Physik der Schneekristalle (Auszug)	38
2.5.5.7	Bücher	38
2.5.5.8	Einbettungsanalyse	38
2.5.5.9	Publikationen und Konferenzen im Rahmen des Projekts	39
3	Kosten.....	41
3.1	Kostentabelle für die gesamte Projektlaufzeit.....	41
3.2	Kostenbeschreibung für die gesamte Projektlaufzeit	42
3.2.1	Kostenbeschreibung der Universität für Bodenkultur Wien (A)	42
3.2.2	Kostenbeschreibung der Siemens AG Österreich (P1)	42
3.2.3	Kostenbeschreibung der Technischen Universität Wien (P2)	43
3.2.4	Soll-ist Vergleich	43
3.3	Kostenumschichtungen.....	43
4	Verwertung	43
5	Ausblick	47

2 Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit

2.1 Projektabriss

2.1.1 Kurzbeschreibung des Projektes

Das Projekt SNOW baut auf einer Entwicklungsperiode auf, die im Rahmen des uni:invent Programms PRIZE gefördert wurde. In diesem ersten Abschnitt konnten wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die ideale Tröpfchengröße für das Kristallwachstum gewonnen werden. In Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr wurde ein kühlbarer Behälter gebaut, der auch im Rahmen vom Projekt SNOW eingesetzt wird. Damit können Versuche im Labor unter normalen Umgebungsbedingungen ($T=22^{\circ}\text{C}$) durchgeführt werden. Ein weiterer Behältertyp wird für das Kältelabor gebaut. Damit wird die Grundlage geschaffen, um einerseits die komplexen Vorgänge beim Kristallwachstum zu untersuchen bzw. die relevanten Parameter zu definieren und andererseits den Prozessablauf zu optimieren. Ein weiteres Ziel des Projekts ist es, den Nachweis der Energieeffizienz gegenüber konventionellen Schneemaschinen zu erbringen.

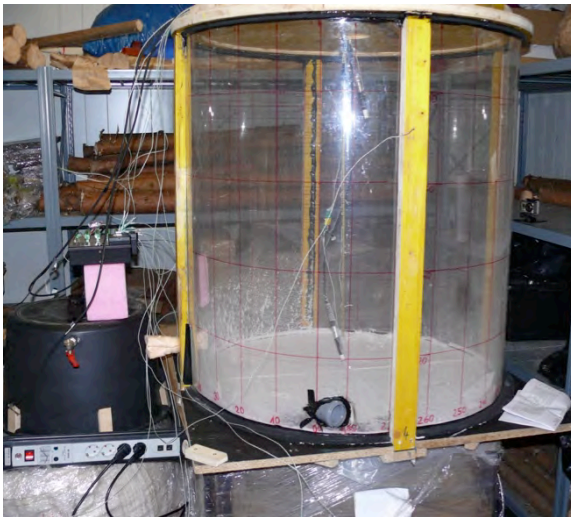


Abbildung 1: Behälter im Kältelabor, entstanden im Rahmen vom Projekt SNOW. Volumen 0.6m^3 .



Abbildung 2: Kühlbarer Behälter, gebaut während des Projekts PRIZE. Volumen 1.0m^3 .

Empirische Datenerhebung auf Basis physikalischer Modellierung des Prozesses in einem Versuchsbehälter bildete die Grundlage für alle Analysen im Rahmen des Projekt SNOW. Dafür wurden im ersten Arbeitspaket Laborversuche durchgeführt, bei denen aus zerstäubtem Wasser (Tröpfchengrößen zw. 5 und $80\ \mu\text{m}$) Eiskeime erzeugt werden. Im Versuchsbehälter werden diese mit Feuchtigkeit versorgt (Tröpfchengrößen kleiner $10\ \mu\text{m}$) und so zum Wachstum angeregt.

Die Bestimmung des optimalen Tröpfchendurchmessers erfolgt in erster Linie empirisch. Messungen werden mit Hilfe eines Phasen-Doppler-Particle-Anemometer (PDPA) zur gleichzeitigen Vermessung der Partikelgröße und -geschwindigkeit durchgeführt.

Die Vermischung von feuchter relativ warmer, Luft mit der kalten trockenen Umgebungsluft erfolgt im Behälter. Das Strömungsbild hat sowohl Auswirkungen auf das Kristallwachstum als auch die

Effizienz des Prozesses. Empirische Versuchsreihen führen zu einer bestmöglichen Kombination von Einlass- und Auslassgeometrie sowie dem Strömungsbild im inneren des Behälters. Diese Erfahrungen fließen in die numerischen Simulationen (CFD) der Behälterströmung ein.

Weiters wurde an einem mathematischen Modell gearbeitet, das die Phasenübergänge beim Kristallwachstum berücksichtigt und gleichzeitig auch Rückschlüsse auf die Luftströmung im Behälter zulässt. Phasenübergänge spielen in Bezug auf die Effizienz des Prozesses eine entscheidende Rolle, da die latenten Wärmeströme in der künstlichen Wolke das Kristallwachstum maßgeblich beeinflussen.

Eine Einbettungsanalyse wurde durchgeführt: das Vermarktungspotential sowie das klimatologische Potential der Technologie wurde untersucht. Veranstaltungen mit Diskussionen zu projektrelevanten Fragestellungen wurden abgehalten.

2.1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Projektes

Das Ergebnis des Projekts ist ein vertieftes Prozessverständnis des Kristallwachstums in einer künstlichen Wolke. Es wurden Temperatur, Nebeldichte und das Volumen des Versuchsbehälters variiert und die Abhängigkeit des Kristallwachstums untersucht. Im normalen Labor als auch im Kältelabor konnte nachgewiesen werden, dass innerhalb enger Grenzen in Bezug auf die Luft- und Wassertemperatur hochqualitativer, d.h. dendritischer Schnee erzeugt werden kann. Der einzelne Schneekristall wächst dabei zu 100% durch Resublimation von Wassermolekülen. Je nach Menge des bereitgestellten Wassers und der aktuellen Lufttemperatur können so die grundlegenden Formen von Eiskristallen – Plättchen, Säulen oder Dendriten – beobachtet werden.

Die Dokumentation der produzierten Eiskristalle stellte eine besondere Herausforderung dar. Auf Grund ihrer geringen Größe mussten spezielle Techniken eingesetzt werden, die bei unterschiedlichen Vergrößerungen ausreichend gute Fotoaufnahmen ermöglichten. Daher wurden einfache Makroobjektive, Balgengeräte und ein Mikroskop für die Fotodokumentation angeschafft. Auf diese Weise sind Aufnahmen mit einer 0.5 bis 100-fachen Vergrößerung möglich.

In den einzelnen Testreihen wurde sowohl die Abhängigkeit des Kristallwachstums von der Lufttemperatur als auch der Wassertemperatur untersucht. Vorbereitende Arbeiten konzentrierten sich darauf, das Einbringen der Eiskeime zu optimieren. Speziell wurde hier untersucht, ob die Anordnung von mehreren, auch in Serie geschalteter Versuchsbehälter, das Wachstum der Kristalle beeinflussen kann. Durch die Komplexität der Vielzahl unterschiedlicher Luftströmungen etablierte sich der 1-Volumenbehälter als optimalste Lösung für das weitere Studium des Kristallwachstums in der künstlichen Wolke. Dabei kommt ein Behälter zum Einsatz, der durch periodisches injizieren von Eiskeimen, das Wachstum der Eiskristalle ermöglicht.

Die Luftströmung im Behälter ist ein kritischer Parameter bei der Schneeproduktion. Das Behälterdesign, in Kombination mit der Position von Ein- und Auslässen, beeinflusst maßgeblich die Strömungsvektoren im Behälterinneren. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit im Inneren, desto eher können die Eiskristalle in Schwebelage gehalten werden. Und je langsamer der Luftstrom ist, desto größer können die Eiskristalle wachsen. Im Versuchsaufbau haben sich zwei Varianten für den Auslass als praktikabel heraus gestellt: ein zentrales Auslassrohr sowie ein tangentialer Auslass am oberen Ende. Jedoch wurde die Luftströmung immer so eingestellt, dass der produzierte Schnee am

Behälterboden zur Ablagerung kommt. Im Behälter wurde ein System eingebaut, das ein automatisches Ausbringen des produzierten Schnees ermöglicht.

Die Zerstäubungstechniken konnten in einem voran gegangenen Projekt bereits untersucht und vorselektiert werden. Für den Laborbetrieb haben sich Ultraschallzerstäuber als brauchbarste Lösung hervor getan. Diese überzeugen zwar nicht durch Energieeffizienz aber sie generieren einen quasi statischen Nebel, der durch zusätzliche Luftströmungen einfach zu beschleunigen ist. Um die Zerstäubungsrate zu variieren mussten eigene Messbehälter gefertigt werden, die eine laufende Wasserstandskontrolle erlauben.

2.1.3 Ausblick und Resümee

Im Laufe des Projekts konnte ein vertieftes Prozessverständnis des Eiskristallwachstums in einer Wolke gewonnen werden:

- Die erzeugte künstliche Wolke erlaubt das Wachstum von natürlichen Schneekristallen
- Die Form der Schneekristalle kann einerseits über die Temperatur in der Wolke gesteuert werden und andererseits kann mit Hilfe der Wassertemperatur die Komplexität der Kristalle beeinflusst werden.
- Natürlicher und homogener Schnee kann auf diese Weise produziert werden. Die Produktionsrate des Laborbehälters liegt dabei bei etwa 11 Litern pro Stunde.
- Die Schneedichte kann mit Hilfe der Wolkentemperatur variiert werden. Die im Reaktor gemessenen Schneedichten bilden eine Bandbreite von 65 bis 250 kg/m³ ab.
- Es wurde ein System entwickelt, um Schnee automatisch aus dem Behälter zu befördern. Damit kann der Laborbehälter automatisch und dauerhaft natürlichen Schnee produzieren.

Die erreichten Schneemengen sind nach Literaturrecherchen einzigartig und wurden noch von keinen vergleichbaren Technologien erreicht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei um Schneemengen handelt, die ausschließlich aus der Dampfphase gewachsen sind. Konventionelle Techniken, bei den Wassertropfen einfach gefroren werden, sind in dieser Hinsicht effizienter.

Die Motivation des Projekt war es eine Technologie weiter zu entwickeln, die in weiterer Folge als Schneeerzeuger in Skigebieten eingesetzt werden kann. Das auch deshalb, da diese Produktionsmethode im Vergleich zum State-of-the-art energieeffizienter und ressourcenschonender arbeitet. Aus heutiger Sicht, d.h. nach den im Rahmen des SNOW Projekts durchgeführten Labortests, kann festgehalten werden, dass diese Attribute vor allem durch den geringeren Wasserbedarf erreicht werden. Die Volumsausbeute in Schnee pro Kubikmeter Wasser ist signifikant erhöht. Gleichzeitig wird aber auch weniger Wasser pro Betriebsstunde benötigt. Zusätzlich fallen keine Verluste durch Verdunstung oder Verwehung in die freie Atmosphäre an.

Das gesammelte Know-how soll nun dazu eingesetzt werden, diese Technologie auf größere Behältervolumina zu skalieren, um realistische Anwendungsszenarien zu testen. Auf Grund der zu erwartenden Behältergröße müssen eine große Anzahl an Tests im freien Gelände durchgeführt werden. Erst nach Abschluss solcher Testreihen kann in Abhängigkeit von der Produktionsrate die endgültige Energie- und Wassereffizienz ermittelt werden. Die Ergebnisse aus dem Labor lassen vermuten, dass das Erreichen der anvisierten Projektziele sehr wahrscheinlich ist.

2.2 Inhalte und Ergebnisse des Projektes

2.2.1 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Grundlage für die Projekteinreichung war eine gemeinsame Patentanmeldung der Technischen Universität Wien sowie der Universität für Bodenkultur Wien. Die Invention beschreibt die Herstellung von echten Schneekristallen in einer künstlichen Wolke, die auch in Skigebieten als Schneeerzeuger für Skitouristen eingesetzt werden kann. Durch ein neues Produktionsverfahren des technischen Schnees kann im Vergleich zu konventionellen Geräten eine signifikante Energie- und Wassereinsparung erzielt werden. Die Siemens AG Österreich komplettierte das Konsortium mit dem Vorhaben, die technische Entwicklung zu begleiten und zu einem späteren Zeitpunkt die mögliche Vermarktung der Technologie zu übernehmen.

2.2.2 Zielsetzungen des Projektes

Erarbeitung von **Know-how** im Bereich des Kristallisationsvorgangs von Wassermolekülen innerhalb einer künstlichen Wolke, dem kontrollierten Wachstum von Eiskristallen, die innerhalb eines definierten Volumens zufällig verteilt sind. Als Grundlage dafür wird ein Prozessablauf entworfen, der innerhalb eines Behälters Eiskeimbildung, Kristallisation, Wachstum und Sammeln der Schneekristalle erlaubt und damit für die kontinuierliche Schneeproduktion genutzt werden kann.

Der **Energieverbrauch** zur Schneeerzeugung soll um bis zu 90% reduziert werden. Eine solche Einsparung berücksichtigt die gesamte Kette der eingesetzten Infrastruktur, von der Aufnahme des Wassers bis hin zur Schneeerzeugung. Ein zu einem späteren Zeitpunkt marktfähig entwickeltes Gerät soll eine Leistungsaufnahme von weniger als 2kW aufweisen. Im Rahmen des Projekts werden Grundlagen dazu erarbeitet.

Da die Schneeerzeugung nicht einfach auf dem Gefrieren von Wassertropfen beruht, kann auch die Dichte des produzierten Schnees unterschiedlich sein. In erster Linie ergibt sich daraus ein sparsamerer Umgang mit der Ressource **Wasser**. Während konventionelle Anlagen aus einem Kubikmeter Wasser max. zwei Kubikmeter Schnee erzeugen (Verhältnis 1:2), wird hier das Verhältnis deutlich verringert. D.h. ein Verhältnis von 1:5 bis 1:10 wird angestrebt. Das entspricht im Wesentlichen feuchtem Neuschnee (1:5) oder sehr trockenem Pulverschnee (1:10).

2.2.3 Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Projektes inkl. Methodik

2.2.3.1 Optimierung eines Versuchsbehälters (AP1)

Im ersten Arbeitspaket wurde an den Grundlagen der Schneekristallbildung gearbeitet. Da physikalische Modellierung der künstlichen Wolke die Basis für alle Erhebungen bildete wurden die im Projekt PRIZE09 voran getriebenen Bemühungen um einen optimalen Versuchsbehälter aufgegriffen und weiter verfeinert. Die relevanten Parameter für die Durchführung der Tests wurden systematisch erfasst und Optionen für die Verbesserung der einzelnen Komponenten erarbeitet. Das betraf die Zerstäubungstechnik, die Erzeugung eines (regelbaren) Luftstroms, die Temperaturkontrolle im Behälterinneren, die Bereitstellung eines kalten Luftstroms (im Labor unter normalen Temperaturbedingungen von +22°C), die Bereitstellung von Eiskeimen als Basis für das weitere Kristallwachstum sowie die (echtzeit) Beobachtung des Kristallwachstums (Fotografie, Video).

Der kühlbare Behälter, der im Projekt PRIZE09 gebaut wurde, stellte zu Beginn des AP1 die Basis für alle Testläufe dar. Das Arbeiten unter Normalbedingungen setzte voraus, dass der Kreislauf des

kalten Luftstroms vor Wärmeverlusten nach außen geschützt ist. Durch zusätzliche bauliche Maßnahmen wurden solche Verluste auf ein Minimum reduziert.

Der Versuchsaufbau im Detail, ohne der Beschreibung der Messpunkte (siehe Abbildung 3):

Eine konventionelle Tiefkühltruhe dient als Kältequelle. Ein **Wärmetauscher**, bestehend aus einem langem Rohrsystem, in der Kühltruhe senkt die Temperatur des Luftstroms auf das für die Testläufe erforderliche Niveau. Um Temperaturanstiege zu kompensieren bzw. einen besseren Wärmetransport zu ermöglichen ist der Wärmetauscher in Frostschutzmittel getaucht.

In einer **Mischzone** wird zuerst der kalte Luftstrom aufgeteilt, um zum einen direkt in den Versuchsbehälter zu strömen und zum anderen, den erzeugten Nebel aufzugreifen und ebenfalls in den Behälter zu blasen. Der Nebel wird von einem Ultraschallerzeuger bereit gestellt.

Im **Versuchsbehälter** wird der Nebel in Schwebelage gehalten und Eiskeime über den Behälterboden eingeblasen. Eiskristalle kommen im Behälter zur Ablagerung bzw. werden zum Teil vom Abluftstrom mitgerissen.

Die **Abluft** wird vor dem Eintritt in die Kühltruhe **entfeuchtet**. Mit einem solchen Test-Setup können Versuche bis zu einer Dauer von ca. 45min durchgeführt werden. Grund für die limitierende Versuchsdauer ist die zunehmende Vereisung im **Entfeuchter**, die den Luftvolumenstrom bei gleichbleibender Ventilatoreinstellung und bei längeren Versuchen deutlich abschwächt.

Versuchsaufbau Labor

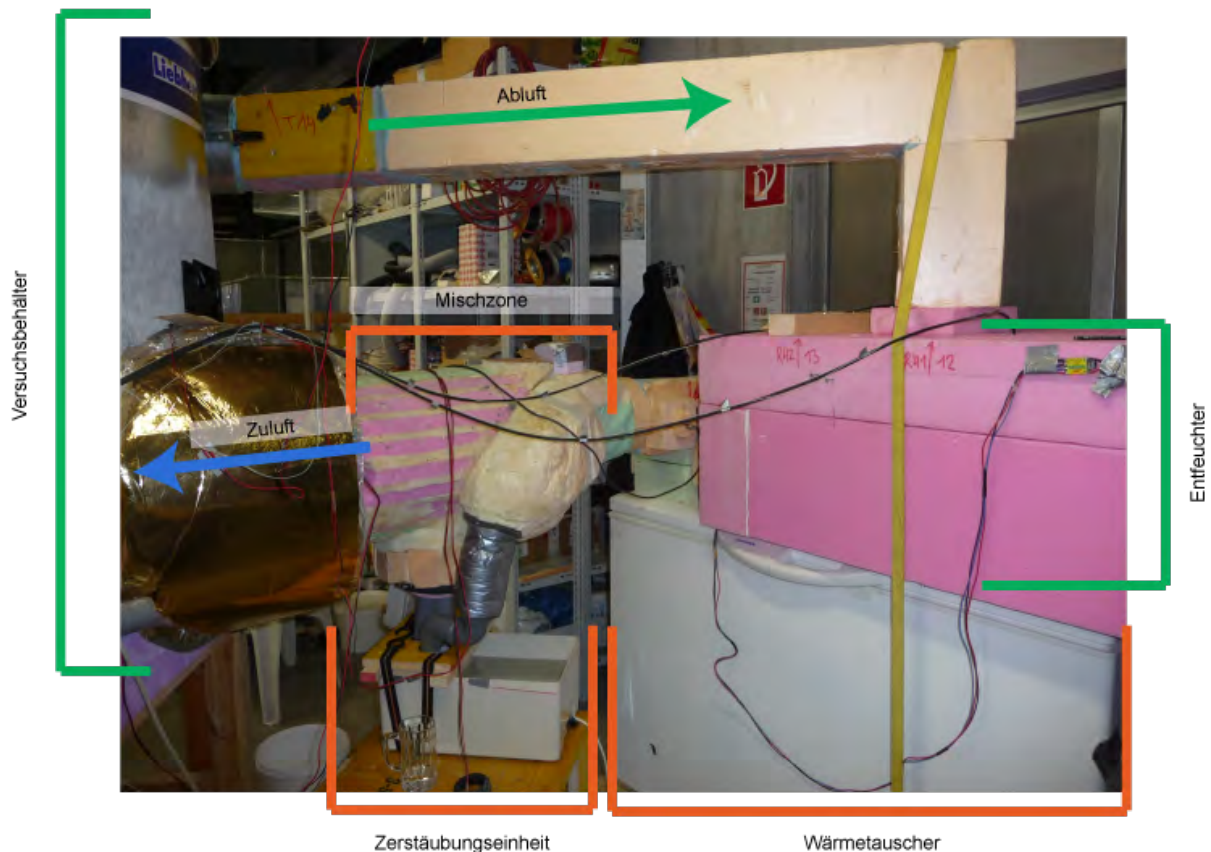


Abbildung 3: Versuchsaufbau im Labor zur Schneeproduktion unter Normalbedingungen bei +22°C.

Der kalte Luftstrom für die Versuche wurde mit Hilfe eines Wärmetauschers erzeugt, der ebenfalls im Projekt PRIZE09 entwickelt wurde. Für die neue Versuchsreihe im Projekt SNOW wurde diese Technik verfeinert. Eine konventionelle Tiefkühltruhe, die mit Frostschutzmittel gefüllt war, diente als Kältequelle. Ein Leitungssystem, das in der Kühltruhe versenkt wurde, führte den Luftstrom durch das kalte Medium und kühlte diesen auf die gewünschte Temperatur. Um Eisbildung durch Ablagerung bzw. Kondensation im Inneren des Leitungssystems zu verhindern, wurde zusätzlich ein Entfeuchter gebaut. Das eingesetzte Silicagel diente als hydrophiles Medium.

Für die Befeuchtung der Luft wurden konventionelle Ultraschallzerstäuber eingesetzt, die u.a. auch für die Luftbefeuchtung in Wohnräumen eingesetzt werden. die auf Grund des erzeugten

Ein Nachteil des kühlbaren Behälters, der im wesentlichen wie ein Kühlschrank funktioniert (Verdampfer innen, Kondensator außen), bestand vor allem in einer deutlich Differenz (einige °C) zwischen Wand- und Lufttemperatur (wobei Wandtemperatur stets < Lufttemperatur). Dabei konnte ab einer Wandtemperatur von ca. 5°C unter der Temperatur des zugeführten Nebel/Luftgemisches eine vermehrte Ablagerung, d.h. das Angefrieren, von Wassertropfen an der Behälterwand beobachtet werden. Diesen Prozess galt es zu verhindern.

In einem ersten Anlauf wurde die Wand mit einer dünnen Schicht isolierendem Material ausgekleidet (siehe z.B. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Zusätzliche stellte sich heraus, dass eine Steuerung der Wandtemperatur auch eine qualitative Verbesserung des Versuchsablaufs herbeiführen konnte. Aus diesem Grund wurde eine Heizung an der Behälterwand angebracht, die eine Kontrolle der Wandtemperatur ermöglichte. Mit Hilfe einer SIMATIC Einheit konnte die Wandtemperatur an die Temperatur des zugeführten Nebel/Luftgemisches angepasst und so eine kontinuierliche Ablagerung von Wasser und die Bildung von Eis verhindert werden. Theoretisch wurde damit aber auch erreicht, dass sich der überschüssige Wasserdampf an den Eiskeimen und nicht an der Wand anlagert und so das Eiskristallwachstum verbessert wird.

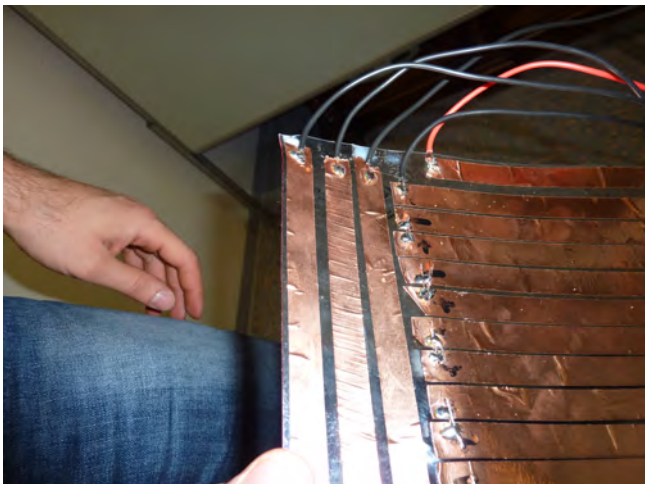


Abbildung 4: Heizungselement im Detail.

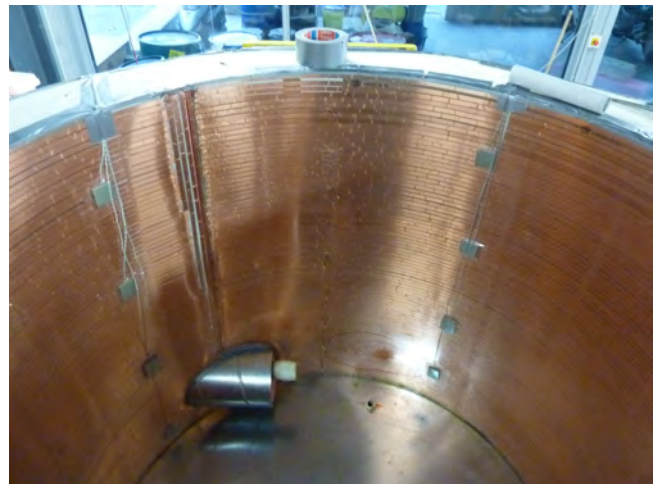


Abbildung 5: Flächige Wandheizung zur Steuerung der Oberflächentemperatur.

Ein entscheidender Vorteil eines solchen Versuchsaufbaus ist die Arbeitstemperatur für die Projektmitarbeiter. Anstelle von permanenten Temperaturen unter Null Grad, kann mit einem solchen Behälter unter normalen Bedingungen gearbeitet werden. Die Beobachtung und Kontrolle des Prozesses erfolgt über die eingebauten Sensoren (Luftmenge, Temperatur, Feuchtigkeit). Ebenso positiv ist eine regelbare Temperatur im Inneren des Behälters.

Die Nachteile des kühlbaren Behälters sind die erschwerte Beobachtung des Prozesses in Echtzeit (isolierter Behälter ist undurchsichtig) sowie die Kontrolle des Ergebnisses, dh z.B. die Vermessung der gewachsenen Eiskristalle. Für die Beobachtung des Prozesses wurden einfache Webcams im inneren des Behälters befestigt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Damit war eine Echtzeitbeobachtung der Wolkenbildung möglich. Zusätzlich wurde eine hochauflösende Videokamera mit einem Weitwinkelobjektiv eingesetzt.

Die bei den Versuchen erzeugten Kristalle werden entsprechend ihrer Form analysiert. Da die Bedingungen in der Wolke bekannt sind kann die Form der Kristalle zur Überprüfung herangezogen werden. Ein Vergleich mit bisher in der Literatur bekannten Formen und Entstehungsbedingungen ist möglich. Die exakte Beobachtung solcher meist sehr kleinen Kristalle erfordert Vergrößerungstechniken, die nicht im Behälter platziert werden können. Daher müssen die Objekte aus dem Versuchsbehälter evakuiert werden, um solche Analysen möglich zu machen. Die thermisch sehr fragilen Kristalle können aber nur unter ähnlichen Bedingungen wie bei ihrer Entstehung reproduzierbar analysiert werden. Bei einem Behälter, der in einer Umgebung von +22°C aufgebaut ist, stellt das ein entscheidendes Problem dar.



Abbildung 6: Beobachtung der Kristalle im Behälter.

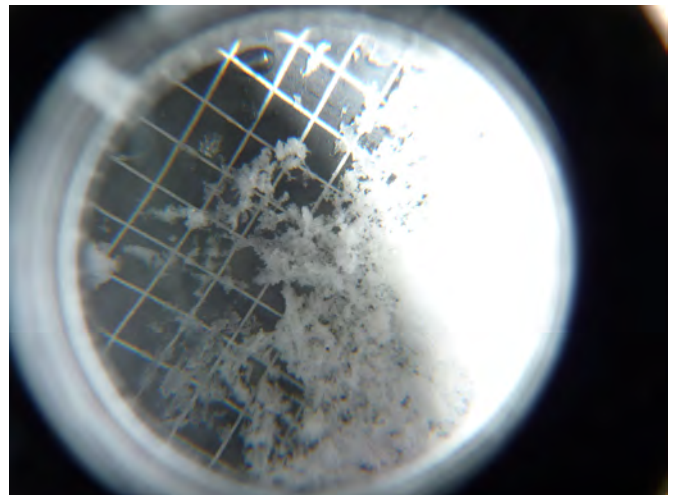


Abbildung 7: Lupenansicht des erzeugten Schnees.

2.2.3.2 Versuchsbehälter im Kältelabor (AP1)

Die fehlenden Möglichkeiten die genaue Form der Kristalle ausreichend untersuchen zu können hat dazu geführt, dass die Versuche wieder in den Kälteraum der BOKU verlagert wurden. In der kalten Umgebung konnte einerseits ein Behälter verwendet werden, dessen Wände aus transparentem Material bestehen und andererseits eine entsprechende Technik eingesetzt werden, die die Vermessung der Kristalle erlaubte.

Für die ersten Arbeiten im Kältelabor wurde ein bereits bestehender Behälter in Kegelform für die Versuche adaptiert. Später wurde ein einfacher Behälter gebaut, der eine maßstäbliche Kopie des kühlbaren Behälters darstellt, allerdings transparente Seitenwände besitzt. Es wurden unterschiedliche Arten der Einbringung von Nebel in den Reaktor getestet. Dieser Schritte wurde deshalb gesetzt, da die ersten Analysen der Versuche mit dem kühlbaren Behälter vermuten ließen, dass das Volumen bei einem (nahezu) tangentialen Einstromen des Nebels nicht optimal ausgenutzt wird und einige Bereiche nicht effektiv für das Kristallwachstum genutzt werden können.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Durch die geringe Dimension des Versuchsbehälters, bedingt auch durch das limitierende Platzangebot im Kälteraum, sind Eiskristalle bei normaler Beleuchtung im Labor nur schwer zu erkennen. Die Beobachtung des Prozesses der Eiskristallbildung ist aber entscheidend für die Identifizierung notwendiger Veränderungen bzw. die Optimierung. Abhilfe schaffte ein stark gebündelter Lichtstrahl, der von den kleinen Plättchen reflektiert wird und so die Partikel besser sichtbar werden.

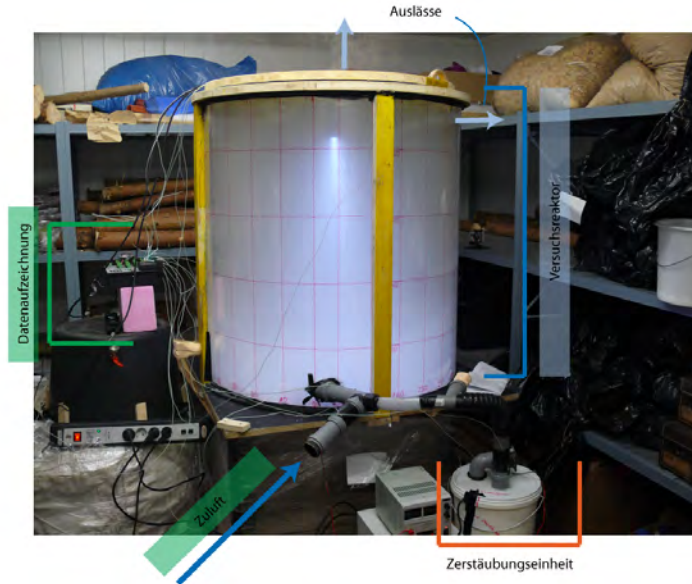


Abbildung 8: Standardversuchsaufbau im Kältelabor, während eines Testlaufs, mit den grundlegenden Komponenten: Nebelzufuhr, zusätzlicher kalter Luftstrom, Datenaufzeichnung und Versuchsreaktor. Optional wurde ein zentraler Auslass im Reaktordeckel oder ein tangentialer Auslass in der Behälterwand gewählt. Nicht im Bild ist die Öffnung für das Einbringen der Eiskeime (Nukleatoren).



Abbildung 9: Beobachtung der Eiskristall-bildung mit Hilfe eines gebündelten Lichtstrahls.



Abbildung 10: sichtbare Wolke im unteren Bereich des Behälters, unsichtbare Eiskristalle bei normaler Beleuchtung.

2.2.3.3 Erfassung von Messdaten

Neben der Beobachtung des Prozesses im Behälter spielt die Messung der relevanten meteorologischen Parameter der künstlichen Wolke eine wichtige Rolle. Dies sind u.a. die Lufttemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit, sowie die Partikelkonzentration. Die Datenerfassung erfolgte mit Hilfe der Datenlogger der Firma Campbell Sci, es wurde das Modell CR800, sowie CR3000 eingesetzt.

Im Kältelabor wurden, ebenso wie im kühlbaren Behälter, Typ-K Thermoelemente für die Messung der Lufttemperatur eingesetzt. Die Messfühler wurden vertikal, im Abstand von 15-20cm, im Inneren des Behälters positioniert, um die Änderungen der Luft- bzw. Nebeltemperatur während der Versuche zu erfassen. Zusätzlich wurden die Temperaturfühler für die Messung der Wassertemperatur im Zerstäuberbehälter sowie im Zuluftstrom eingesetzt. Die Temperatur im Kältelabor während der Testläufe wurde ebenfalls mit diesen Sensoren erfasst.

Für die Messung der Luftfeuchtigkeit wurde auf einen Sensor der Firma Campbell Sci. zurückgegriffen. Der Sensor CS215 ist für den dauerhaften Außeneinsatz zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit geeignet und wurde daher für die Messung im Kältelabor sowie im Inneren des Versuchsbehälters ausgewählt.

Die Messung der Übersättigung, also einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 100% ist mit konventionellen Sensoren, für unseren Anwendungsfall, nicht möglich und wurde daher im Rahmen dieses Projekts nicht weiter verfolgt.

Eine Analyse der Nebeldichte bzw. der Tröpfchenkonzentration in der künstlichen Wolke kann mit einfachen, am Markt erhältlichen Mitteln noch nicht durchgeführt werden. Vergleichbare Geräte für die Messung in natürlichen Wolken kosten etwa €40.000. Daher wurde eine mittlere Nebeldichte für die Testläufe mit Hilfe der Zerstäubungsrate und dem Luftvolumenstrom errechnet.



Abbildung 11: Anordnung der Thermoelemente und des Sensors für die relative Luftfeuchtigkeit im kühlbaren Behälter. Kältelabor.

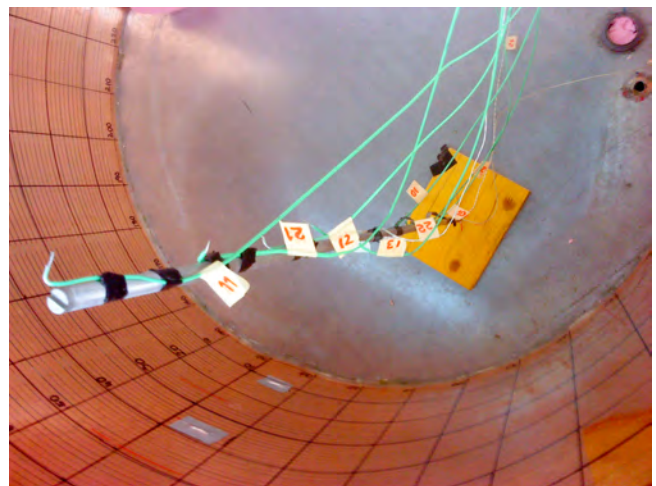


Abbildung 12: Zusätzliches vertikales Messprofil im kühlbaren Behälter.

Der Luftvolumenstrom wurde mit Hilfe eines Massendurchflussmessers ermittelt, der speziell für diese Untersuchungen angeschafft wurde. Es handelt sich dabei um ein Modell der Firma Fluid Components International, ST98. Das Messgerät wurde für den Einsatz von Volumenstrommessungen bei Temperaturen zw. 0 und -30°C kalibriert. Ein analoger Ausgang des Messsignals erlaubte die gemeinsame Datenerfassung mit dem verwendeten Datenlogger.



Abbildung 13: Außenansicht Massendurchflussmesser, die Durchflussrichtung ist von rechts nach links mit einem $d_i = 68\text{mm}$.

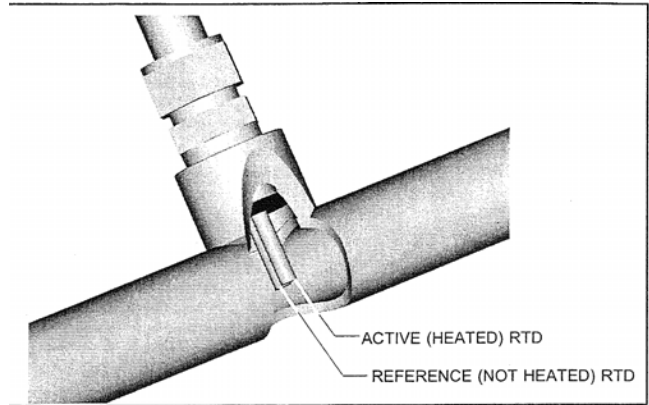


Abbildung 14: Innenansicht Massendurchflussmesser mit den beheizten und unbeheizten Temperaturfühlern.

2.2.3.4 Zerstäubungstechnik

Die Bereitstellung eines Wassernebels ist Voraussetzung für ein mögliches Kristallwachstum im Versuchsbehälter. Die erforderlichen Eigenschaften des Nebel wurden speziell für den Anwendungsfall des Kristallwachstums an frei suspendierten Eiskeimen untersucht (Draxler 2010). Ein quasi-statischer Nebel wird mit Hilfe von Ultraschallzerstäubern produziert. Durch die Einstellung bzw. Regelung des Luftvolumenstroms wird der Nebel beschleunigt und in den Versuchsreaktor geleitet. Auf diese Art und Weise kann die Nebeldichte im Reaktor definiert werden.

Quantitative Rückschlüsse auf die Eiskristallbildung erfordern eine möglichst genaue Bestimmung der Zerstäubungsrate. Beim Einsatz von Düsen kann auf einen konventionellen Durchflussmesser zurückgegriffen werden. Bei konventionellen Ultraschallzerstäubern müssen solche Messvorrichtungen für den jeweiligen Anwendungsfall entwickelt werden. Als wichtigste Parameter, die die Zerstäubungsrate unter Verwendung eines definierten Behältnisses wesentlich beeinflussen, wurden folgende Variablen identifiziert:

- die Wassersäule über den Membranen,
- die Wassertemperatur und
- der Luftvolumenstrom.

Zusätzlich wurde der Einfluss der Größe des Zerstäuberbehälters auf die Nebelproduktionsrate untersucht.

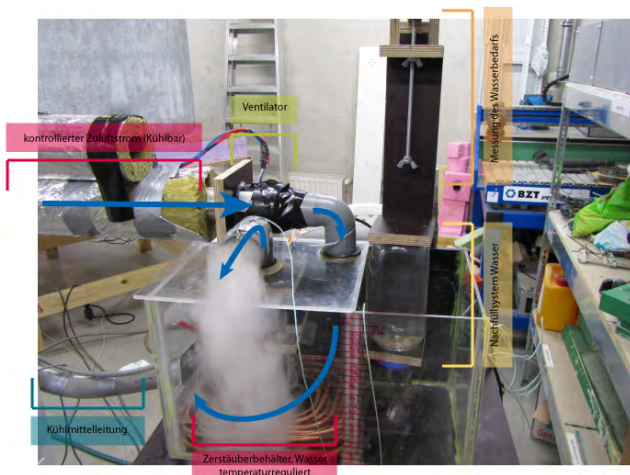


Abbildung 15: Versuchsaufbau zur Bestimmung der maßgeblichen Einflussgrößen auf die Zerstäubungsrate des Ultraschallzerstäuber.



Abbildung 16: Zerstäuberbehälter der letzten Generation, wie er für die weiteren Arbeiten im AP2 verwendet wurde. Ein Nachfüllsystem, links neben dem orangenen Zerstäubervolumen, ermöglichte die Einstellung eines konstanten Wasserspiegels. Minimale Änderungen des Wasserspiegels während des Nachfüllvorgangs wurden mit Hilfe von Ultraschallsensoren (rechts) erfasst. Die Messung der Wassertemperatur erfolgte über den Behälterdeckel (nicht sichtbar). Der Ultraschallzerstäuber wurde in der Mitte des orangenen Zerstäubervolumens positioniert.

2.2.3.5 Beobachtung Eiskristalle

Neben der produzierten Schneemenge war im ersten Arbeitspaket vor allem die Art der erzeugten Kristalle im Mittelpunkt des Interesses. Denn: das Wachstum der Kristalle und ihr Erscheinungsbild können am besten als Funktion der Umgebungstemperatur sowie dem Grad der Übersättigung, dh dem Überschuss an Wasserdampf in der Atmosphäre definiert werden.

Eiskristalle wurden aus der Wolke evakuiert, in dem herkömmliche Objektträger der Mikroskopie für eine bestimmte Zeit im Inneren des Behälters platziert wurden. Die darauf abgelagerten Kristalle wurden fotografiert und später vermessen.

Zu Beginn wurde versucht, die in der Schneeforschung üblichen Lupen als Okulare zu verwenden, um die Kristalle fotografisch zu erfassen. Ebenso wurde ein Taschenmikroskop getestet. Beide Varianten sind bei größeren Kristallen und ohne Anspruch auf eine genaue Fotodokumentation ausreichend. Ein Balgengerät für Makrofotografie stellte den nächsten evolutionären Schritt dar. Die geringe Schärfentiefe machte sinnvolle Aufnahmen von den Kristallen aber nicht möglich.

Ein herkömmliches Mikroskop aus einem benachbarten Versuchslabor an der BOKU brachte den gewünschten Erfolg der exakten Beobachtung der Eiskristalle bei einer bekannten Vergrößerung. Der fehlende Lichtgang für einen Fotoapparat führte dann zum Kauf eines eigenen Mikroskops mit Trinokularkopf und Adapter für eine DSR-Kamera.



Abbildung 17: Durchlicht-Mikroskop mit 4x, 10x, 40x und 100x Vergrößerung inkl. Trinokularkopf (Modell: BTC-BIM105T). Für die Fotoaufnahmen der Kristalle wurde eine Nikon D5100 mit elektronischem Fernauslöser verwendet. Die Objektträger wurden für die Aufnahmen immer in der selben Position unter dem Mikroskop platziert und mit Hilfe des Kreuztisches an vordefinierte Aufnahmepunkte gefahren, um willkürliche Fotoaufnahmen zu vermeiden.

2.2.3.6 Mathematisches Modell zur Schneekristallbildung

Die Arbeiten an einem numerischen Modell zur Abbildung des Kristallwachstums in einer Wolke unter Berücksichtigung der thermischen Energiebilanz wurden begonnen. Um die Luftströmung im Inneren des Behälters zu visualisieren auf ein Modell auf Basis einer CFD-Simulation zurückgegriffen. Die Inputparameter für diese Modellierung wurden von den physikalischen Tests übernommen.

Eine **mathematische Beschreibung** der Vorgänge im Schneereaktor hat als Ziele

1. ein verbessertes Verständnis der ablaufenden physikalischen Prozesse sowie
2. einen Beitrag zur systematischen Optimierung der Behälter-Geometrie und der Prozessparameter.

Eine vollständige und befriedigende Lösung dieser Aufgabenstellungen wäre nur im Rahmen eines umfangreichen mathematischen Forschungsprojektes möglich. In diesem Projekt konnten **erste Teilziele** einer repräsentativen Lösung erreicht werden.

Ausgehend von der **umfangreichen Literatur** zur Simulation der Vorgänge in natürlichen Wolken, wurde ein erstes mathematisches Modell formuliert. Das Grundproblem dabei ist es, einen geeigneten Kompromiss zwischen physikalischer Genauigkeit des Modells und numerischer Effizienz der entsprechenden Simulationen zu finden. Physikalisch genaue Modelle für das Wachstum einzelner Schneekristalle kommen dabei nicht in Frage, weil damit schon die Simulation eines einzigen Kristalls

erhebliche Computer-Rechenzeiten und Speicherplatz-Erfordernisse bedeuten würde. Auch mit stark vereinfachten Modellen, in denen ein Schneekristall durch eine kleine Anzahl von Parametern (wie z.B. Position, Geschwindigkeit, Masse, Durchmesser) beschrieben wird, wäre es nicht möglich, die Entwicklung der großen Zahl aller Kristalle im Versuchsbehälter zu berechnen. Es müssen daher **Modelle der Kontinuumsmechanik** verwendet werden, deren Variablen gemittelte Größen in Kontrollvolumina sind, die einerseits klein im Vergleich zu den Ausmaßen des Reaktors gewählt werden, aber andererseits so groß, dass sie viele Schneekristalle enthalten. Die resultierenden mathematischen Modelle sind **Systeme partieller Differentialgleichungen**.

Der Versuchsbehälter zur Schneeerzeugung enthält Luft und Wasser in Form von Dampf, Tröpfchen und Eiskristallen. Die letzteren wachsen (und werden ab einer gewissen Größe als Schneekristalle bezeichnet) hauptsächlich durch Kondensation des Dampfes. Dieser wieder entsteht durch Evaporation der Tröpfchen, die die künstliche Wolke im Behälter bilden. Diese **Phasenübergänge** werden durch das mathematische Modell beschrieben, wie auch ein direkter Übergang vom flüssigen zum festen Aggregatzustand bei Kollision von Tröpfchen mit Schneekristallen.

Evaporation und Kondensation sind komplexe Prozesse, die durch die Form der Oberflächen von Tröpfchen und Schneekristallen sowie durch lokale Dichte-unterschiede des Dampfes gesteuert werden. Das erfordert die Lösung eines lokalen Modelles in der Umgebung einzelner Tröpfchen bzw. Schneekristalle. Auch die Temperatur spielt eine wesentliche Rolle. Zum Unterschied von natürlichen Wolken kann im Reaktor die Situation auftreten, dass die Lufttemperatur sich deutlich von der Tröpfchentemperatur unterscheidet. Eine approximative möglichst einfach berechenbare Lösung der lokalen (mikrophysikalischen) Probleme ist als **Input für das makroskopische Simulationsmodell** notwendig. Hier wurden bis jetzt stark vereinfachende unrealistische Annahmen gemacht wie zum Beispiel, dass die Tröpfchen und Schneekristalle Kugelform besitzen.

Das **makroskopische Modell** beschreibt die Dichteverteilungen von Dampf, Tröpfchen und Schneekristallen, sowie die lokale mittlere Größe der letzteren. Für die Tröpfchen wird eine vorgegebene Größenverteilung angenommen. Schließlich ist noch die Luftströmung im Behälter zu berücksichtigen, die durch die Navier-Stokes-Gleichungen der Gasdynamik beschrieben wird. Da diese Strömung relativ langsam ist, ist eine inkompressible Approximation möglich. Ein wichtiger Bestandteil des Modells ist die Wärmeenergiebilanz, die von der Luftströmung sowie von den durch die Phasenübergänge erzeugten Wärmequellen und –senken beeinflusst wird.

Zunächst wurde das Modell mit Methoden der Dimensionsanalyse studiert. Das beinhaltet eine geeignete Auswahl von Referenzgrößen, d.h. Einheiten, sodass die relative Bedeutung der Bestandteile des Modells sichtbar wird. Als Konsequenz konnten einerseits Modellvereinfachungen durchgeführt werden, und andererseits wurden die Anforderungen an die Simulationsmethoden deutlich.

In den im Rahmen des Projektes durchgeführten ersten Simulationen wurde eine weitere erhebliche Simplifizierung durchgeführt, nämlich auf ein eindimensionales Modell, das annimmt, dass alle berechneten Größen räumlich nur von der Höhe abhängen. Um Simulationen durchführen zu können, wurde schließlich eine zeitliche und räumliche Diskretisierung des Modells durchgeführt, wobei die Wahl geeigneter Diskretisierungsverfahren aus Stabilitätsgründen entscheidend war. Schließlich konnten erste Simulationen durchgeführt werden.

2.2.3.7 PDA Messungen in Laborversuchen der TUW unter der Verwendung von Ultraschallzerstäubern und Zerstäuberdüsen (AP1)

Für die Reproduzierbarkeit und die Optimierung von experimentellen Versuchen im Reaktor sind grundsätzliche Informationen über die von den Zerstäubern oder Düsen hergestellten Tröpfchen von großem Interesse. Zur Charakterisierung der Tröpfchen und zur Ermittlung der Tröpfchengeschwindigkeiten wurden von der TUW im Laborversuch unter möglichst konstanten Bedingungen **Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) Messungen** durchgeführt. Zunächst liefern Laborexperimente der BOKU erste Anhaltspunkte über die optimalen Bedingungen für die Schneeproduktion. Durch die Laborversuche der TUW soll nachgewiesen werden, welche Größen, Größenverteilungen und Geschwindigkeiten die Tröpfchen aufweisen und welche Bedingungen einen Einfluss auf diese Eigenschaften ausüben.

Bei der PDA handelt es sich um eine **berührungslose optische Messtechnik** mit der, bei hoher Zeit und Ortsauflösung, Partikelgrößen, -größenverteilungen und -geschwindigkeiten bestimmt werden können. Die vom Zerstäuber gebildeten Partikel bzw. Tröpfchen, die gemessen werden sollen, passieren das Messvolumen und streuen das Licht (Frequenz proportional zur Geschwindigkeit). Eine Empfängersonde, in der sich drei Detektoren befinden, nimmt das gestreute Licht auf. Aus der unterschiedlichen Phasenlage des Streulichtsignals an den drei Detektoren, die sich an unterschiedlichen Orten im Raum befinden, kann der Krümmungsradius der Partikeloberfläche bestimmt werden. Bei kugelförmigen Partikeln folgt hieraus der Durchmesser. Durch Mittelung mehrerer tausend Einzelmessungen werden statistisch verlässliche mittlere **Geschwindigkeiten und Tröpfchendurchmesser** ermittelt. Mit dem verwendeten System können in Abhängigkeit von den verwendeten Linsen Partikelgrößen von ~500nm bis ~0,9mm gemessen werden.

Im **experimentellen Aufbau der PDA** werden eine *Transmittersonde* und eine *Receiversonde* auf den beiden L-förmig angeordneten Armen einer 3d Traverse montiert (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Das Messvolumen kann auf diese Weise an jeder beliebigen, durch die Verfahrenswege der Traverse limitierten, Stelle im Raum positioniert werden. Die Auswertung der Daten erfolgt mit Hilfe der Software FlowSizer (Version 2.0.4) der Firma TSI Inc, die zusätzlich verschiedene Statistiken und Validationsmethoden zur Verfügung stellt.

Es wurden zwei unterschiedliche experimentelle Aufbauten für die Messungen an den Ultraschallzerstäubern und an den Spraydüsen verwendet. In den Versuchen der BOKU ist in erster Linie ein **Ultraschallzerstäuber mit sechs Membranen** der Firma Seliger zum Einsatz gekommen. Die meisten PDA Messungen wurden unter Verwendung dieses Zerstäubers durchgeführt. Der Ultraschallzerstäuber befindet sich in einem geschlossenen Behälter und ist mit einer ausreichenden Menge Wasser bis zu einem definierten Füllstand bedeckt. Ein Ventilator bläst Luft in den Behälter. Der auf diese Weise ausgeblasene Nebel verlässt den Behälter über einen Auslass. Zu variierende Parameter sind der Wasserstand (Füllstand) im Inneren des Behälters, die Ventilatorspannung und die Messposition in vertikaler Richtung vom Auslass bzw. Austritt des Nebels.

Spraymessungen wurden für **zwei verschiedene Zweistoffdüsen** durchgeführt. Bei den beiden Düsen handelt es sich um Luftzerstäuberdüsen gleicher Bauart (Firma Spraying Systems (India) Pvt. Ltd.: B1/4 JR-SS + DF 15-SS und B1/4 JR-SS + DF 25-SS).

Die Spraymessungen wurden in einer sogenannten Strömungsbox durchgeführt. Die mit Hilfe von CFD Simulationen optimierte Konstruktion besteht aus einem fahrbaren Aluminiumrahmen mit Glas- bzw. PVC-Platten, die den optischen Zugang für die Messtechnik ermöglichen. Unterhalb der eigentlichen

Glasbox befindet sich ein Boden mit Öffnungen durch die von einem starken Gebläse Luft durch Schlitze im Deckel der Box angesaugt wird. Auf diese Weise wird eine gerichtete Luftströmung realisiert, die Tröpfchen von den Scheiben fern hält, um längere Messzeiten zu ermöglichen. Die Düse wird in der oberen Begrenzung der Box installiert. Die Düsenöffnung zeigt nach unten. Über die 3d Traverse werden die *Transmitter*- und *Receiversonde* außerhalb der Box platziert. Das Messvolumen wird dann mit Hilfe der Traverse im Spraykegel positioniert.

Für die Düsen sind Nenngrößen für Druck und Volumenströme für Luft und Wasser angegeben. Die Druckluftleitung im Labor der TUW liefert einen maximalen Luftstrom von ~60 l/min bei ~4,5 bar. Die Wasserleitung liefert bis zu ~0,3 l/min. Diese Werte liegen unterhalb der für die Düsen angegebenen Nenngrößen. Für die Messungen wurden daher in Absprache mit der BOKU von den Nenngrößen abweichende Versuchsparameter festgelegt. Des Weiteren wurde eine Matrix von Messpositionen festgelegt, die unter Berücksichtigung der Rotationssymmetrie des Sprays den Spraykegel im Wesentlichen erfasst. Die festgelegten Messpositionen wurden für eine Auswahl verschiedener Parameterkombinationen vermessen.

2.2.3.8 Strömungssimulation (AP2)

Die Geschwindigkeits-, Temperatur- und Feuchteverteilung im Reaktor sind messtechnisch nur zum Teil zugänglich. Numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) erlaubt die theoretische Berechnung orts aufgelöster Information über die Strömungseigenschaften solcher Apparate. Damit kann CFD den Design-Prozess und das Auffinden geeigneter Geometrien mit günstigen Verweilzeiteigenschaften unterstützen und zum Verständnis für die im Experiment beobachteten Phänomene beitragen.

Am Institut für Verfahrenstechnik der TU Wien wurde die Geometrie der Liebherr-Kühlkammer unter Berücksichtigung der Zu- und Abluftstutzen für die Strömungssimulation mit dem Softwarepaket Ansys-Fluent implementiert. Bei typischen Eintrittsgeschwindigkeiten der zugeführten Luft von etwa 1 m/s ist die Strömung im Behälter laminar. Für die Beschreibung der gekühlten Wand wurde als Randbedingung eine konstante Wandtemperatur angenommen, wodurch die Wärmestromdichte durch die Wand, die Abkühlung, die Dichtzunahme der Luft und sich daraus ergebende freie Konvektionsphänomene berechnet werden können.

2.2.3.9 Optimierung der Produktion von Schneekristallen (AP2)

Aufbauend auf den Vorarbeiten des ersten Arbeitspakets wurden im zweiten Arbeitspaket Maßnahmen getestet, die eine Optimierung des Kristallwachstums im Versuchsbehälter zum Ziel hatten. Zusätzlich wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets ein Schaltschrank gebaut, der neben der Datenerfassung auch die Stromversorgung für die Versuche im Kältelabor sowie im Freien sicher stellte.

Die oben genannten Optimierungsschritte beziehen sich auf

- a) die Qualität des erzeugten Schnees und
- b) eine quantitative Verbesserung der Schneeproduktion.

Während der Kälteraum an der BOKU sehr gute Möglichkeiten zur qualitativen Optimierung des Kristallwachstums bot, mussten auf Grund der räumlichen Gegebenheiten des Labors deutliche Abstriche hinsichtlich einer quantitativen Verbesserung der Schneeproduktion gemacht werden. Daher wurden zusätzliche Finanzmittel bereitgestellt, um mit dem Versuchsreaktor im Freien die Testreihen zu wiederholen.

Einerseits wurden die erforderlichen Optimierungsschritte im Team diskutiert und evaluiert, andererseits wurden Designvorschläge mit Hilfe von CFD-Modellierungen genauer untersucht und diese Ergebnisse mit den empirischen Versuchen im Labor einem Vergleich unterzogen.

Die Beobachtungen im Kälteraum hinsichtlich der Entwicklung des Strömungsbildes im Versuchsreaktor bildeten also die Grundlage für diese Arbeiten. Die Vielzahl der Variablen, die Einfluss auf die Kristallbildung um Behälter nehmen, wurde auf Grund der limitierenden Ressourcen durch Expertengespräche und Mini-workshops auf eine überschaubare Menge begrenzt. Folgende Parametermengen wurden daher für eine Optimierung in Betracht gezogen:

- Position der Ein- und Auslässe am Behälter
- Durchmesser der Auslässe im Behälter
- Einbringung des Nebels in den Behälter
- Einbringung der Eiskeime in den Behälter
- Anzahl der Behälter für das Kristallwachstum
- Behältervolumen
- Zerstäubungsrate

Die empirischen Untersuchungen dazu wurden im Kälteraum der BOKU sowie am Teststandort Kitzsteinhorn vorgenommen. Alle Untersuchungen sollten in einem Temperaturbereich von -8 bis -18°C durchgeführt werden. Vor allem in Bezug auf den Kälteraum an der BOKU können höhere Start-Temperaturen einen zu raschen Anstieg der Lufttemperatur im Testraum hervorrufen was in weiterer Folge die Testdauer limitiert. Versuche bei tieferen Temperaturen verbessern zwar das Kristallisationsverhalten, wurden aber auf Grund der fehlenden kontinuierlichen Kühlung im Kälteraum nicht berücksichtigt.

Die Qualität, dh die Form und Größe, der Schneekristalle wurde bei den einzelnen Tests untersucht. Ebenso die Eignung für hohe Produktionsraten.

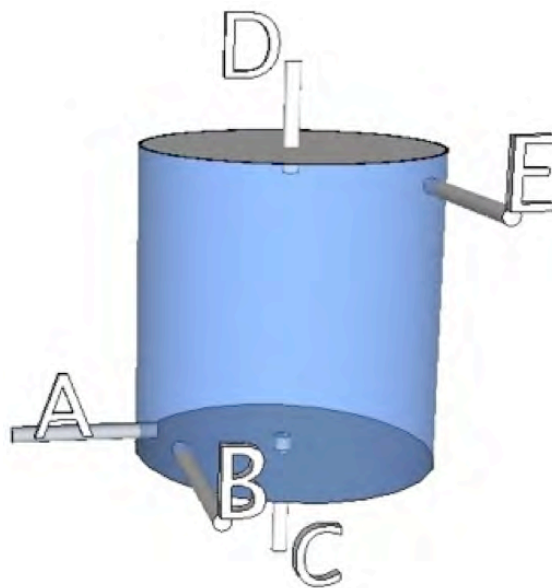


Abbildung 18: Schematische Übersicht der möglichen Ein- (A-E) und Auslässe (E,D).



Abbildung 19: Beispiel für das Variantenstudium mit Einlässen inkl. Nebelzufuhr bei den Öffnungen B und E sowie dem Auslass an der Position D. Ziel der Tests mit diesem Set-up war die räumliche Trennung zweier Nebelluftströme, um den Eiskristallen in der aufwärtsgerichteten Strömungsspirale zusätzliche Feuchtigkeit für das Wachstum zur Verfügung zu stellen.

2.2.3.10 Ausbringen der Schneekristalle (AP2)

Das Sammeln der Schneekristalle und die effektive Ausbringung ist ein zentrales Anliegen des Projekts. Erste Tests haben gezeigt, dass es nicht möglich ist, die gesamten Eiskristalle, die in der Wolke entstehen, durch eine im oberen Bereich des Behälters platzierte Auslassöffnung zu blasen. Vielmehr haben die Versuche erkennen lassen, dass eine Ablagerung der Eiskristalle am Behälterboden bei allen Optimierungsvarianten die besten Ergebnisse produziert.

Es wurde daher ein einfaches Verfahren entwickelt, um den angesammelten Schnee am Behälterboden aus dem Reaktor zu entfernen und in einem Auffangbehälter zu sammeln. Diese Methode der Schneeausbringung war nur für jene Tests relevant, bei denen das Augenmerk auf eine möglichst hohe Produktionsmenge gerichtet war.

2.2.3.11 Energiebedarf

Es wurde eine Energiebedarfsrechnung für den Laborbehälter durchgeführt und diese Ergebnisse auf ein zukünftiges marktfähiges Produkt projiziert. Es wurde eine Energiebilanz erstellt (siehe Anhang, 2.5.3) sowie ein mögliches Einsparpotential abgeschätzt. Zusätzlich wurden Gespräche mit Experten der Branche geführt, um den Bedarf von energieeffizienten Methoden in der Beschneigung von Skigebieten zu erörtern (z.B. Firma Wirkungsgrad.at, Bregenz, Vbg.).

2.2.3.12 Einbettungsanalyse (AP5)

Eine Einbettungsanalyse ist eine wesentliche Voraussetzung für eine mögliche spätere Vermarktung der Technologie. Diese umfasst eine Marktanalyse, Untersuchungen zur Ressourceneffizienz, eine Aufstellung der Kosten für die Beschneigungsinfrastruktur sowie einer Analyse der Chancen und Risiken der hier entwickelten Technologie. Workshops, Vorträge und Fachdiskussionen wurden im Rahmen des Projekts organisiert, um unterschiedliche Aspekte einer nachhaltigen Schneeproduktion zu thematisieren.

2.2.3.13 Projektmanagement (AP6)

Die Tätigkeiten aller im Projektmanagement beteiligten Personen war darauf ausgerichtet, die einzelnen Projektziele effizient und zielgerichtet zu erarbeiten. Grundlage dafür stellte die administrative Koordination der Fördermittel dar. Basis für die Aufteilung der Fördergelder war der genehmigte Finanzplan der Projektbeschreibung. Anhand eines an der BOKU erprobten Verteilungsschlüssel wurden die Transferraten der Projektpartner festgelegt.

Die Abstimmung der Zeitplanung erfolgte direkt mit den Projektpartnern. Durch die laufende enge Zusammenarbeit und den regen Austausch der involvierten Arbeitsgruppen, konnten anstehende Herausforderungen im direkten Gespräch rasch geklärt werden.

Die Termine für die Abfassung der Zwischen- und Endberichte wurden im Vorfeld mit allen Projektpartnern besprochen und frühzeitig kommuniziert, um die Dokumente zeitgerecht zu übermitteln.

Während der Projektphase gab es im Kernteam regelmäßige Zusammenkünfte, sowie Telefon- und Videokonferenzen (z.B. via Skype).

2.2.4 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

2.2.4.1 Eiskristallbildung

Mit den Versuchsbehältern wurden Versuche zur Eiskristallbildung in einer künstlichen Wolke durchgeführt. Bei den Versuchen wurde die Menge an zugeführter Feuchtigkeit, die Temperatur des zu zerstäubenden Wassers, die Lufttemperatur vor der Vermischung mit dem Nebel, die Nebeltemperatur, die Luftfeuchtigkeit (teilweise), die Lufttemperatur im Behälter (vertikales Profil) sowie die Luftmenge gemessen. Damit konnten die Bedingungen im Inneren des Behälters beschrieben werden. Durch die Bereitstellung von Eiskeimen wurde das Kristallwachstum in der Wolke ausgelöst.

Die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Beschreibung der Kristallbildung in der künstlichen Wolke wurde in Angriff genommen. Unter den zu berücksichtigenden technischen Möglichkeiten wurde ein einfaches Modell formuliert, das die Prozesse in einer Wolke unter Berücksichtigung der Phasenübergänge beim Kristallwachstum berücksichtigt. Dieses stark vereinfachte Modell kann als Input für ein makroskopisches Strömungsmodell herangezogen werden. (→ E1.1)

Versuche haben gezeigt, dass eine Wolke aus unterkühlten Wassertröpfchen ohne die Zufuhr von Eiskeimen Eiskristalle enthalten kann, aber diese mit den vorhandenen Apparaturen nicht identifizier- bzw. messbar waren. Spontanes Gefrieren von Wassertropfen passiert erst ab Temperaturen unterhalb von -38°C . Erst durch die Zufuhr von Eiskeimen konnte das Kristallwachstum reproduzierbar wiederholt werden.

Im Kühlbaren Behälter wurden Versuche bei Temperaturen zw. -10 und -28°C durchgeführt. Die genaue Beobachtung des Kristallisationsprozesses in Echtzeit war durch die ungenügenden Methoden nicht möglich.

Bei den Versuchen im Kältelabor konnte der Kristallisationsprozess in Echtzeit verfolgt werden. Ebenso konnten die Eiskristalle genauer beobachtet und analysiert werden. Die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen wurden im Detail entwickelt und beschrieben. Die Bandbreiten für die relevanten Parameter wurden definiert. (→ E1.2)

Die Grundlage für umfangreiche Testläufe zur Schneekristallbildung in einem Versuchsreaktor war damit geschaffen. In ersten Tests wurden reproduzierbar unterschiedlichste Schneekristalltypen in den Versuchsreaktoren produziert. (→ M1)

2.2.4.2 PDA Messungen

Die Datensätze der Ultraschallzerstäubermessungen lieferten Ergebnisse aufgrund derer verschiedene Schlussfolgerungen gezogen werden können. Die mittleren Durchmesser D_{10} bewegen sich zwischen 3 und $6\mu\text{m}$ und weisen eine relativ geringe Streuung auf (s. Abbildung 20). Es sind Abhängigkeiten hinsichtlich des mittleren Durchmessers, des Füllstands und der Ventilatorspannung zu erkennen. Vermutlich liegt die Ursache jedoch vielmehr in unterschiedlichen Datenqualitäten bzw. Fehlern im mittleren Durchmesser als in einer tatsächlichen Abhängigkeit von den Versuchsparametern. Bei höheren Ventilatorspannungen und höheren Füllständen werden die geringsten Werte von $3,5 \pm 1\mu\text{m}$ verzeichnet. Aufgrund der höheren Datenqualität bei diesem Parameter ist anzunehmen, dass es sich hierbei um die verlässlichsten Ergebnisse handelt.

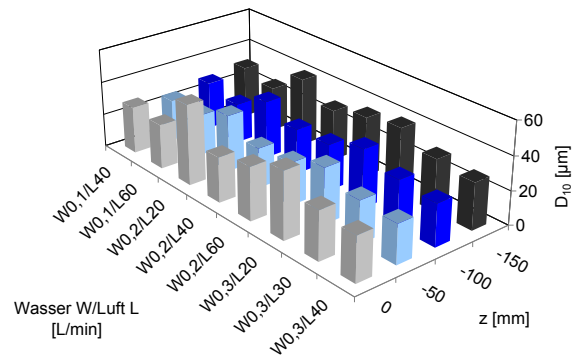
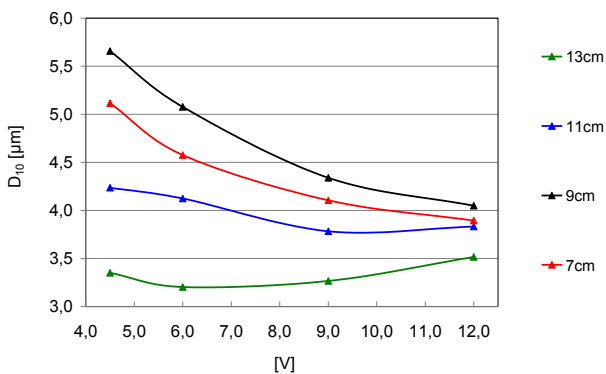


Abbildung 20: PDA Messungen – Ultraschallzerstäuber: Mittlerer Durchmesser D_{10} als Funktion der Ventilatorspannung bei verschiedenen Füllständen.

Abbildung 21: PDA Messungen – Spraydüsen: Mittlerer Durchmesser D_{10} für DF 25 in Abhängigkeit von der Messposition in vertikaler (z) Richtung für verschiedene Parameter.

Spraymessungen für zwei verschiedene Düsen wurden für diverse Parameterkombinationen und Messpositionen durchgeführt. Erste Auswertungen liefern unter anderem Aussagen hinsichtlich der produzierten mittleren Durchmesser D_{10} . Es ist keine eindeutige Tendenz in Abhängigkeit vom Luft- und vom Wasservolumenstrom zu erkennen. Die von der Düse DF 15 produzierten Tröpfchen weisen mittlere Durchmesser D_{10} zwischen $25\mu\text{m}$ und $30\mu\text{m}$ auf. Der mittlere Durchmesser der von der Düse DF 25 produzierten Tröpfchen liegt bei etwas größeren Durchmessern von bis zu $50\mu\text{m}$ (s. Abbildung 21). Bei einem Wasservolumenstrom von $0,2\text{ l/min}$ und einem geringen Luftvolumenstrom von 20 l/min werden die größten mittleren Durchmesser erreicht. (→ M1)

2.2.4.3 Strömungssimulation

Typische Ergebnisse der Strömungssimulation sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Sehr gut erkennbar ist der stabile, laminare Freistrahler der eingebrachten Luft, der sich an die Behälterwand anlegt und eine rotierende Luftströmung im Zylinder (einige cm/s) mit einem Stagnationsgebiet im Kern erzeugt. Dies begünstigt den Wärmetransport durch die Wand, erzeugt jedoch in gewissem Umfang eine Kurzschluss-Strömung zum Austritt. Je nach Erfordernis (zeitlich variante Randbedingungen, beispielsweise Zuluft, Zerstäubung, Kühlung) kann zukünftig auch ein instationärer Strömungslöser eingesetzt werden, allerdings mit deutlich höherem Rechenzeit-Aufwand. Konkret wurden geometrische Optimierungen (zur Verbesserung der Verweilzeitverteilung)

des Laborbehälters vorgeschlagen. Ein erweitertes Euler-Lagrange-Modell (Berücksichtigung der Wassertröpfchen, Kristallisation) konnte nicht implementiert werden.

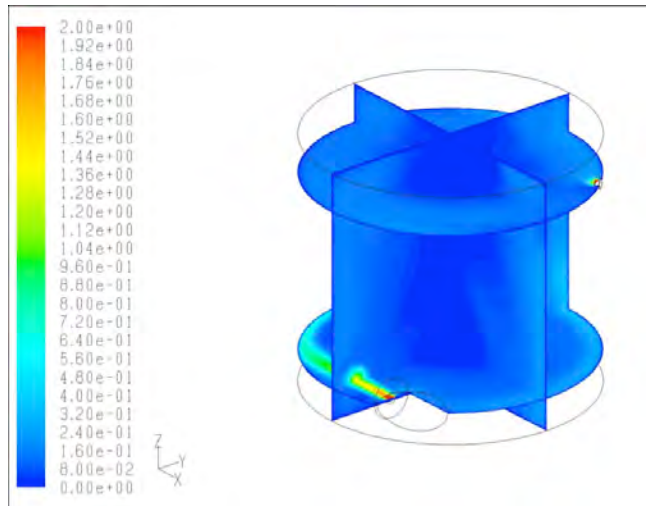


Abbildung 22: Strömungssimulation des kühlbaren Behälters – Geschwindigkeitsbetrag [m/s]

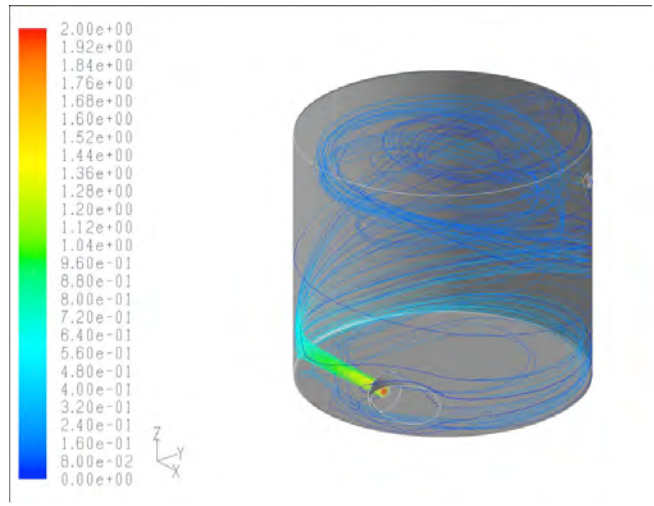


Abbildung 23: Strömungssimulation des kühlbaren Behälters – Strömungslinien [m/s]

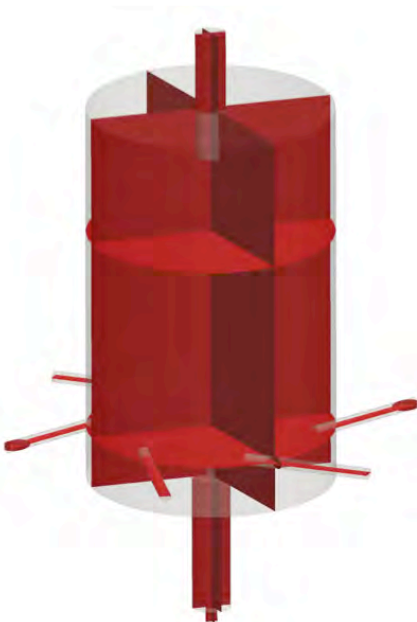


Abbildung 24: Strömungssimulation des kühlbaren Behälters – Geschwindigkeitsbetrag [m/s]



Abbildung 25: Strömungssimulation des kühlbaren Behälters – Strömungslinien [m/s]

Für einen Versuchsreaktor wurden unterschiedliche Varianten von Testläufen mit Hilfe der numerischen Verfahren im Rahmen einer stationären, sowie transienten Simulation analysiert (Abbildung 24, Abbildung 25). Entlang der Auswerteebenen wurden u.a. vertikale und tangentielle Geschwindigkeitskomponenten berechnet. Die Aufenthaltsdauer einzelner Tröpfchen im Behälter wurde analysiert, ebenso eine Abschätzung der Tröpfchendichtevertellung. (→ M2)

2.2.4.4 Schneekristallbildung als Funktion der Luft- und Wassertemperatur

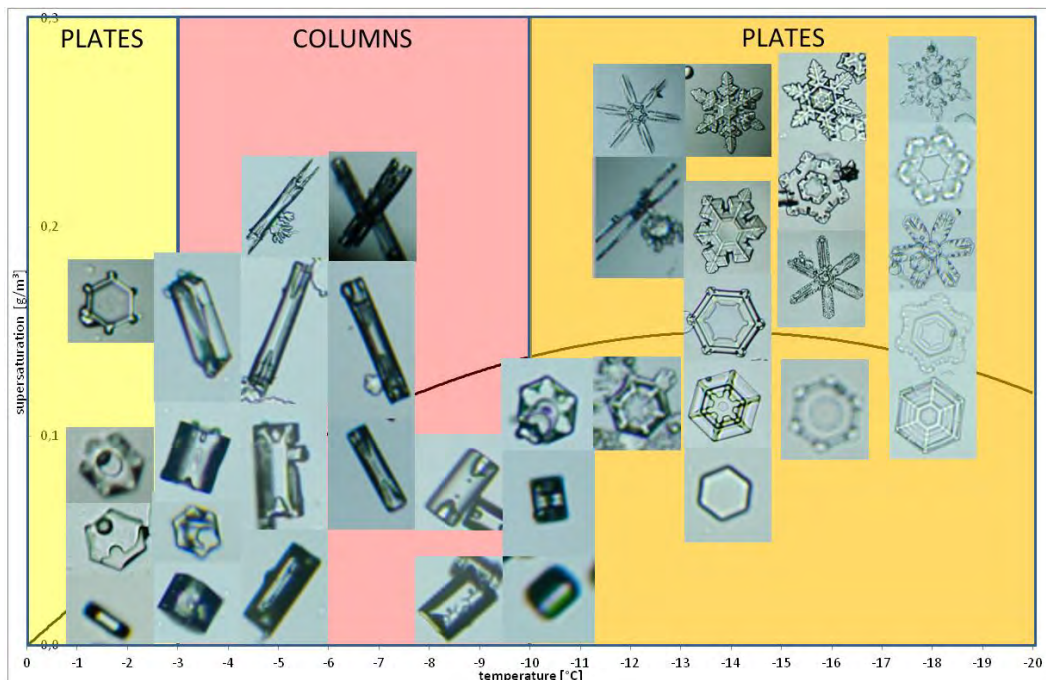


Abbildung 26: Unterschiedliche Kristalltypen als Funktion der Temperatur. Die Ordinate wurde aus der Literatur übernommen (z.B. Libbrecht 2001), die Übersättigung in der künstlichen Wolke konnte im Rahmen dieser Testreihen nicht ermittelt werden (siehe auch Lettner, 2012).

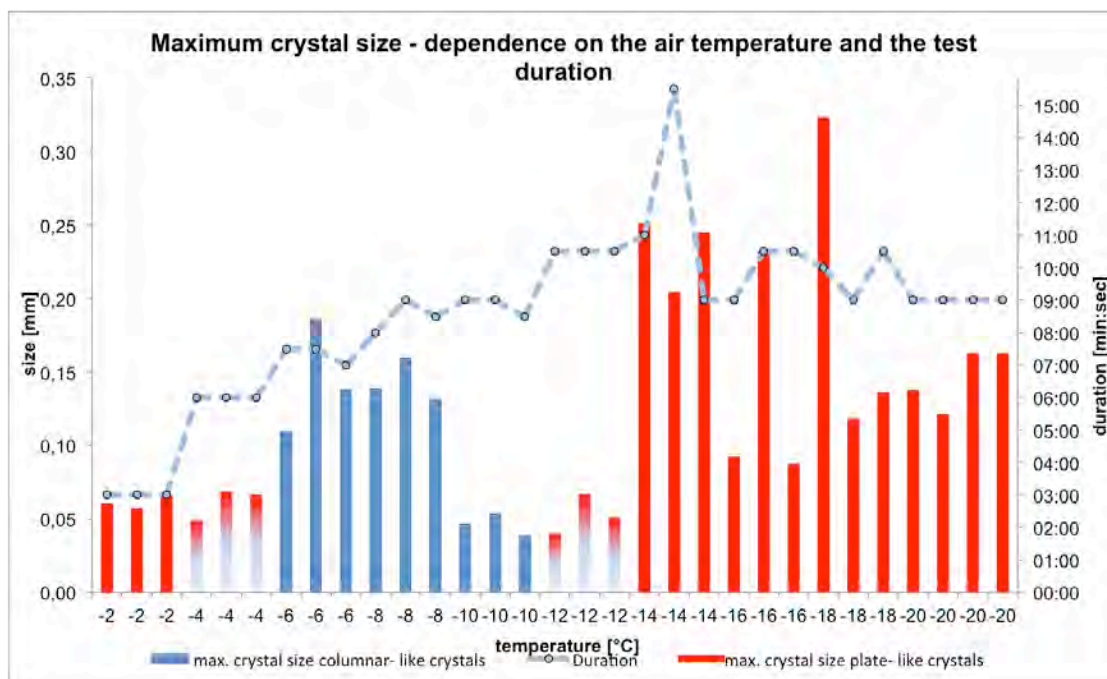


Abbildung 27: Beschreibung der mittleren Kristallgröße (Ordinate links) und der mittleren Wachstumszeit (Ordinate rechts) als Funktion der gemittelten Behältertemperatur während der Versuche (siehe auch Lettner 2012, bzw. Braito 2012).

Versuchsreihen wurden durchgeführt, um die Kristallbildung im Reaktor als Funktion der Lufttemperatur sowie der Temperatur des zerstäubten Wassers zu beschreiben. Ein weiterer

Messparameter war die Dauer, bis die Kristalle die angegebene Größe erreicht hatten. Die Kristalle wurden an Hand ihrer Größe sowie der Morphologie (siehe Abbildung 26) beschrieben. Eigene morphologische Klassifikationen wurden an Hand der beobachteten Kristalle definiert. (→ E2.2, M2)

2.2.4.5 Kontinuierliche Schneeproduktion

Für die Ausbringung der Schneekristalle wurde ein System entwickelt, das einen Auswurf am Behälterboden ermöglicht. Der Versuchsaufbau hat gezeigt, dass ein Ausbringen des gesamten Schnees mit Hilfe des zugeführten Luftstroms bzw. über ein Unterdrucksystem nicht möglich ist.

Es wurde ein System installiert, mit dessen Hilfe eine kontinuierliche Schneeproduktion im Behälter möglich ist. Eiskeime werden dabei intervall-artig in den Behälter initiiert während über die Öffnungen im Behälter laufend ein Wassertropfen-Luft-Gemisch eingeblasen wird. Je nach Temperatur im Behälter kann das Intervall für die Zufuhr der Eiskeime angepasst werden.

Der produzierte Schnee lagert sich am Behälterboden ab und wird in ein seitliches Behältnis befördert. Dort kann er für weitere Analysen entnommen werden. (→E2.2, M2)

2.2.4.6 Energiebedarf und Anwendungsmöglichkeiten

Die Diskussion mit Vertretern der Skigebiete als Hauptanwender der technischen Schneeerzeugung lassen keinen Bedarf von energieeffizienten Methoden für die Produktion von Schnee erkennen. Unter den gegebenen technischen Möglichkeiten (tiefe Temperaturen $< -6^{\circ}\text{C}$ für die Schneeproduktion werden benötigt; Saison muss früh beginnen, daher muss viel Schnee bereits zu Saisonstart verfügbar sein, etwa 70% der Jahresproduktion) liegt das Augenmerk auf einer hohen Produktionskapazität in möglichst kurzer Zeit.

Der spezifische Energiebedarf des Laborgeräts (kWh / kg Wasser) ist im Mittel ident mit jenem konventioneller Beschneigungsgeräte. Allerdings ist der Wasserbedarf des Laborgeräts deutlich reduziert. Bei einem fiktiven Marktanteil eines solchen neuen Geräts von 9% ergeben sich laut der Berechnung ein jährliches Einsparpotential für Strom von 52,80GWh sowie eine Reduktion des Wassereinsatzes um ca. 27,3 Mio. Kubikmeter. Diese Berechnung bezieht sich auf den Alpenraum. Nähere Informationen sind im Anhang angeführt (siehe 2.5.3.). Es wird nicht davon ausgegangen, dass ein späteres marktfähiges Produkt sofort als Substitut zu bestehenden Technologien eingesetzt werden kann. Vielmehr gehen wir davon aus, dass die Technologie in Skigebieten überall dort zum Einsatz kommt, wo leichter und weicherer Schnee benötigt wird: Kinderpisten, SnowParks, spezielle Tiefschneepisten und ähnliches.

2.2.4.7 Einbettungsanalyse

Das klimabedingte Marktpotential wurde erhoben (→ E5.4) und die Grenztemperaturen und der Anwendungsbereich für die neue Beschneigungstechnologie in österreichischen Skigebieten wurde analysiert (→ M5).

2.2.4.8 Verbreitungsmaßnahmen

In regelmäßigen Abständen wurden Projektmeetings organisiert, für die auch weitere Wissenschaftler bzw. Interessierte eingeladen waren. Zwei Veranstaltungen an der TU Wien wurden explizit beworben um die Projektergebnisse zu präsentieren (10.11.2011, 13.9.2012). (→ E5.1)

Drei Konferenzen wurden besucht, um die Arbeiten des Projekts einem breiteren Publikum zu präsentieren. Zwei dieser Konferenzen waren mit internationaler Beteiligung (14. österr. Klimatag 22.9.2011, EGU 2012 20.4.2012, ICCP Leipzig 2.8.2012). (→ E5.2)

Mit drei Experten wurden vertiefende Diskussionen über eine nachhaltige Schneeerzeugung geführt (Lonnie Thompson, Byrd Polar Research Institute, USA; Carmen de Jong, Universite de Savoie, Frankreich; Daniel Scott, University of Waterloo, Canada) (→ E5.3)

2.2.4.9 Berichtswesen

Die Zwischenberichte wurden zeitgerecht präsentiert (→ E6.1). Der Endbericht und die Endabrechnung werden im Rahmen dieses Berichts erklärt und zeitgerecht präsentiert (→E6.3, M4).

2.2.5 Beschreibung der eventuellen Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten Ziele

Die Schneeproduktion im Versuchsreaktor konnten aus quantitativer Sicht nicht optimiert werden. Der für die Versuche an der BOKU Wien vorhandene Kälteraum ist für diese Art der Untersuchungen nicht geeignet. Die limitierende Größe verhindert das Arbeiten mit größeren Versuchsbehältern und die Art der Kühlung macht kontinuierliche Testläufe auf Grund der Umluftventilatoren nicht möglich, ohne dabei maßgeblich den Prozess im Inneren des Behälters zu beeinflussen.

Eine aussagekräftige Energiebedarfsrechnung bzw. ein Vergleich mit dem State-of-the-Art ist nur mit einer annähernd marktfähigen Demonstrationsanlage möglich. Die Bandbreite der Schneeproduktion wurde mit dem Laborbehälter abgesteckt, aber ein Vergleich mit realen Schneegeräten ist nur unter Annahmen spezifischer Weiterentwicklungen möglich. Die Diskussionen mit den Experten der Beschneigungsindustrie haben gezeigt, dass Untersuchungen mit weiterentwickelten Geräten erforderlich sind, um die Frage der Energieeffizienz auch kritikerresistent präsentieren zu können. Versuchsreihen mit einer Folgeanlage im Freien sind dafür die Voraussetzung.

Die produzierten Eiskristalle sind in der Form und Größe ideal, um sie im Luftstrom des Behälters zu suspendieren. Um alle produzierten Eiskristalle in Schwebelage zu halten, wird ein großer Luftstrom benötigt, der wiederum die Verweildauer der einzelnen Partikel im Behälter reduziert. Da der Versuchsbehälter in der Größe limitiert war, wurde darauf verzichtet, die Eiskristalle permanent in Schwebelage zu halten. Die wachsenden Partikel nahmen während des Aufenthalts im Reaktor an Masse zu und lagerten sich dann am Behälterboden ab.

Ein (mikroskopisches) Modell zur theoretischen Betrachtung und Analyse des Kristallisationsvorgangs in Wolken inkl. der Berücksichtigung von Phasenübergängen konnte im Rahmen des Projekts in Grundzügen definiert werden. Eine erfolgreiche Implementierung in ein makroskopisches Strömungsmodell ist in dem hier vorgegebenen Zeit- und Budgethorizont nicht sinnvoll umzusetzen.

2.2.6 Beschreibung der „Highlights“ des Projektes

Schneekristalle in einer künstlichen Wolke entstehen zu lassen bzw. ihr Wachstum weiter zu beobachten und sogar durch Änderung von Testparametern beeinflussen zu können ist das Highlight des Projekts. Die Dichte des erzeugten Schnees ist deutlich geringer als konventioneller Kunstschnee und wurde bisher in solchen Mengen noch nicht im Labor produziert.

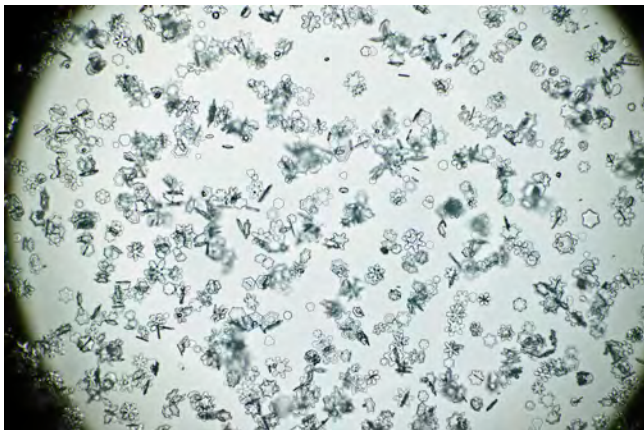


Abbildung 28: Mikroskopaufnahme eines Testlaufs im Kälteraum der BOKU Wien im August 2011.



Abbildung 29: Produzierter Schnee im Kälteraum der BOKU Wien.

2.2.7 Beschreibung und Begründung der Unterschiede zum ursprünglichen Projektantrag

Im Projekt wurde versucht den Vorgaben der Projektplans sowie der Jury zu folgen und die Entwicklung des Schneeerzeugers voran zu bringen. Abweichungen vom Projektantrag wurden gegenüber der FFG formuliert.

2.3 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Welche Erkenntnisse für das Projektteam wurden aus dem Projekt gewonnen?

Die Entwicklung und die Arbeiten an dem Laborgerät des „Dendrite Generator“ haben das Projektteam verstehen lassen, wo die Stärken und wo die Schwachpunkte des Schneeerzeugers liegen. Zusammenfassend können folgende Erfolge definiert werden:

- Die erzeugte künstliche Wolke erlaubt das Wachstum von natürlichen Schneekristallen
- Die Form der Schneekristalle kann einerseits über die Temperatur in der Wolke gesteuert werden und andererseits kann mit Hilfe der Wassertemperatur die Komplexität der Kristalle beeinflusst werden.
- Natürlicher und homogener Schnee kann auf diese Weise produziert werden. Die Produktionsrate des Laborbehälters liegt dabei bei etwa 11 Litern pro Stunde.
- Die Schneedichte kann mit Hilfe der Wolkentemperatur variiert werden. Die im Reaktor gemessenen Schneedichten bilden eine Bandbreite von 65 bis 250 kg/m³ ab.
- Es wurde ein System entwickelt, um Schnee automatisch aus dem Behälter zu befördern. Damit kann der Laborbehälter automatisch und dauerhaft natürlichen Schnee produzieren.

Als primärer Kritikpunkt nach den Arbeiten im Labor sowie dem kurzen Testlauf im Freien ist die mangelnde Produktionskapazität der Demonstrationsanlage. Durch die Arbeiten im Kälteraum konnte nicht auf effiziente Zerstäubungsmechanismen zurückgegriffen werden. Die verwendeten Ultraschallzerstäuber sind nur für die Zerstäubung kleiner Mengen Wasser gut geeignet. Jedoch ist nicht nur die Zerstäubungsmenge selbst limitierend, auch das verwendete Behältervolumen schränkt die Produktionsmenge ein.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

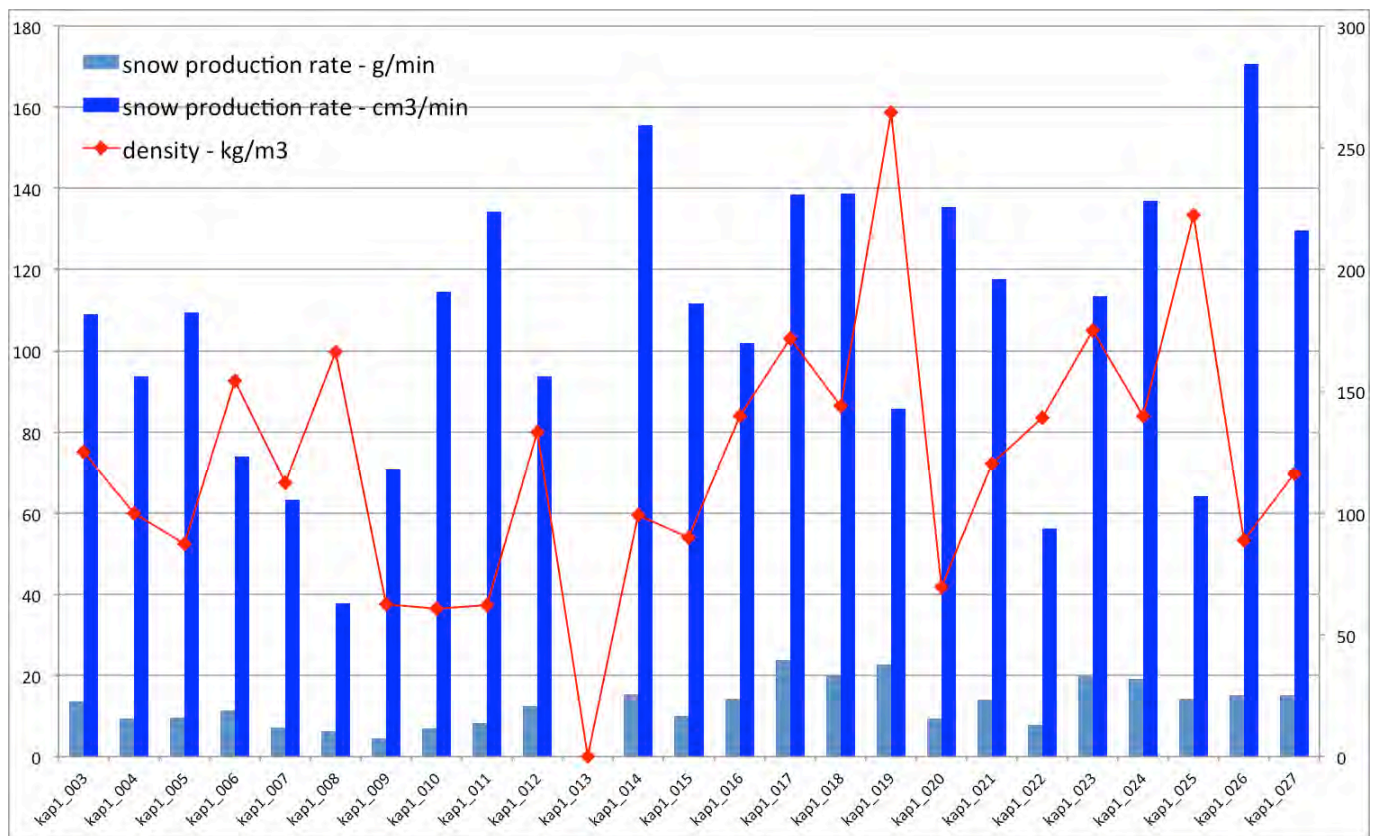


Abbildung 30: Darstellung einer Versuchsreihe mit den Angaben zur Schneeproduktionsrate in g/min bzw. cm³/min sowie der erreichten Schneedichte.

Die Stärke der Versuchsanordnung und der unterschiedlichen Reaktoren ist das kontrollierte Wachstum von primären Kristallformen (Plättchen oder Säulen), das die Produktion von homogenen Schnee erlaubt. Dabei wird kein statisches Wachstumssubstrat verwendet sondern die Kristalle wachsen an zufällig verteilten Eiskeimen in der Wolke aus zuerst ausschließlich unterkühlten Wassertröpfchen.

Sollte die Produktionsrate gesteigert werden und sich der Energiebedarf für die Schneeerzeugung so entwickeln wie im Projekt erarbeitet, dann ist es in Zukunft möglich, weitere Applikationen für diese Technologie zu entwickeln. Gespräche im Rahmen des Projekts haben ergeben, dass ein Einsatz im Bereich des Geoengineering sowie der landwirtschaftlichen Melioration denkbar sind.

Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?

Die Arbeiten an dem Schneeerzeuger werden fortgesetzt, auch wenn zur Zeit noch keine ausreichende Finanzierung für alle Vorhaben gegeben ist. Das bedeutet aber auch, dass nicht alle Mitglieder des Projektteams gehalten werden können. Aus entwicklungstechnischer Sicht ist es das Ziel, einen größeren Versuchsbehälter zu bauen, um die Schneeproduktionsraten zu steigern aber auch um effektivere Zerstäubungstechniken einzusetzen.

Für dieses Vorhaben sind Testläufe im Freien notwendig, da die erforderliche Infrastruktur für größere Behältervolumina nicht gegeben ist. Neben der Skalierung des Behältervolumens und einer neuen Zerstäubungsmethode werden auch Maßnahmen gesetzt, um die Luftströmung im Behälter so zu gestalten, dass die Kristalle so lang wie möglich bzw. so kurz wie notwendig im Behälter suspendiert bleiben. Für diesen Schritt muss die Durchmischung im Behälter näher analysiert werden.

Gleichzeitig ist es auch das Ziel, die Arbeiten im Labor an einem maßstabsgerechten Modell des großen Behälters weiter zu führen. Eine erste Pilotstudie (siehe z.B. Lettner 2012) zur Erforschung des Schneekristallwachstums unter unterschiedlichen Bedingungen wurde durchgeführt. Aufbauend darauf kann eine systematische Untersuchung erfolgen. Die Vielzahl der einflussnehmenden Parameter bzw. deren Messung muss näher analysiert werden, zB Anzahl Eiskeime, Flüssiggehalt der Wolke.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Projekts wurden beim FWF zwei Forschungsanträge platziert, um spezifische Fragestellungen um den Wolkenreaktor näher zu untersuchen. Eingereicht wurden diese Anträge von Prof.Schmeiser (Weiterentwicklung der mathematischen Modellierung der Eiskristallisation in der künstlichen Wolke) sowie Prof. Grothe gemeinsam mit Dr.Burkart (Eisnukleation an Aerosolen).

Für welche anderen Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?

Kurzfristig sind die Arbeiten für all jene Forschungsgruppen interessant, die an einer kontrollierten Erzeugung von Schnee zu Forschungszwecken interessiert sind. Mit der entwickelten Methode kann homogener Schnee für spezielle Anwendungen erzeugt werden. Eine mögliche Anwendung ist z.B. die technische Erzeugung einer natürlichen Schneedecke, um in weiterer Folge Instabilitäten bzw. das Auslöseverhalten von Schneebrettern im Labor zu untersuchen.

Weiters erlaubt der erarbeitete Versuchsaufbau das Erforschen von Eiskristallen und deren Wachstum bei unterschiedlichen Bedingungen. So kann der Einfluss eines statischen Nebels vs. einem dynamischen Nebel (=bisherige Versuche) untersucht werden.

Die Arbeiten an dem mathematischen Modell zur Eiskristallbildung in einer Wolke sind noch nicht abgeschlossen. Die bisher fehlenden Kalibrierungsmöglichkeiten eines solchen Modells können durch den Einsatz des Versuchsbehälters zumindest teilweise kompensiert werden.

Langfristig ist es das Ziel, den Versuchsaufbau auch für weitere wissenschaftliche Anwendungen zu öffnen. In globalen Klimamodellen (GCM) spielt Schnee eine bedeutende Rolle, da schneebedeckte Oberflächen mehr Strahlung reflektieren als Abschnitte mit einer geringeren Albedo. Eine genauere Charakterisierung von Schnee könnte zu einer Verbesserung dieser Modelle beitragen. Mit dem Versuchsaufbau ist es theoretisch möglich, unterschiedliche Schneearten zu erzeugen.

2.4 Arbeits- und Zeitplan

In Bezug auf die ursprüngliche Arbeits- und Zeitplanung kamen im Rahmen des laufenden Projekts folgende Änderungen zum Tragen:

Die Laufzeit des Arbeitspakets AP2 wurde um drei Monate verlängert, um in erster Linie die Arbeiten im Messlabor der TU Wien noch in den Endbericht integrieren zu können. Grund für die Verzögerung war ein technischer Defekt an der Messapparatur zur Vermessung der Tröpfchengrößen.

2.5 Anhang

2.5.1 Skizze des Versuchsaufbaus

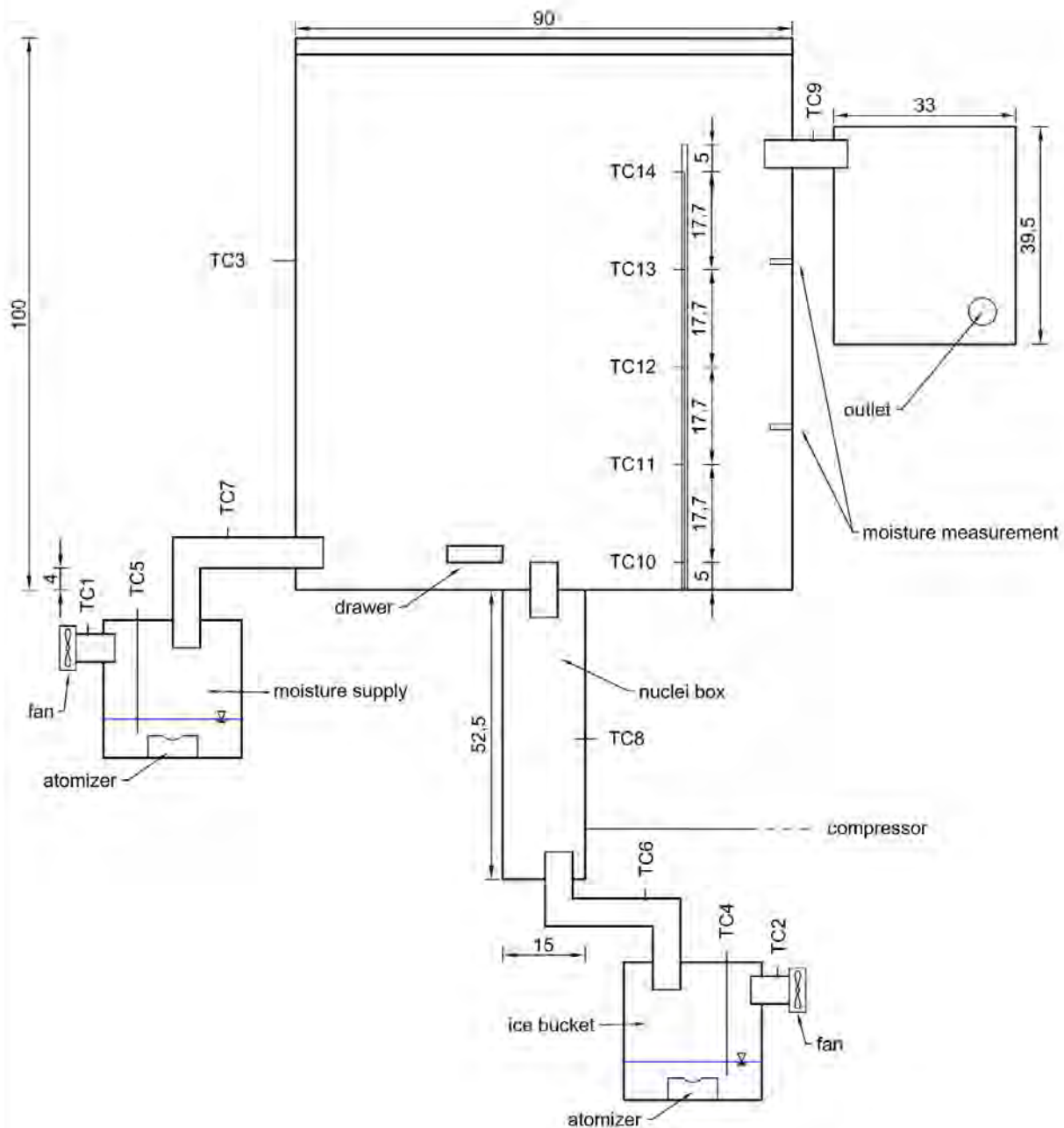


Abbildung 31: Skizze des Versuchsbehälters mit den Positionen der Messfühler sowie den zugeführten Strömen von Luft und Nebel.

2.5.2 Schneekristallklassifikation

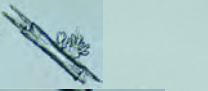

















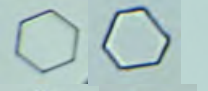

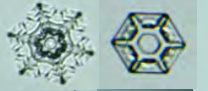

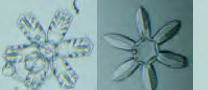

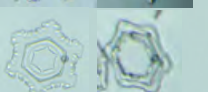

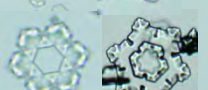

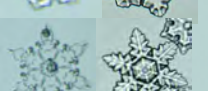



Classification scheme				
main category	subcategory	sub- subcategory	examples	symbols
needle crystal	needle	needle		
		sheath		
		long solid column		
columnar crystal	column	pyramid		
		bullet		
		solid column		
		hollow column		
		solid thick plate		
		thick plate of skelton form		
plane crystal	regular crystal developed in one plane	hexagonal plate		
		hexagonal plate with spatial sectors		
		crystal with broad branches		
	plane crystal with extensions of different form	plate with simple extensions		
		plate with sectorlike extensions		
		plate with dendritic extensions		
combination of column and plane crystals	column with plane crystals			

Abbildung 32: Vorschlag einer Schneekristallklassifikation basierend auf den Untersuchungen mit dem Schnee-Reaktor (siehe auch Lettner 2012)

2.5.3 Energiebilanz des Versuchsreaktors

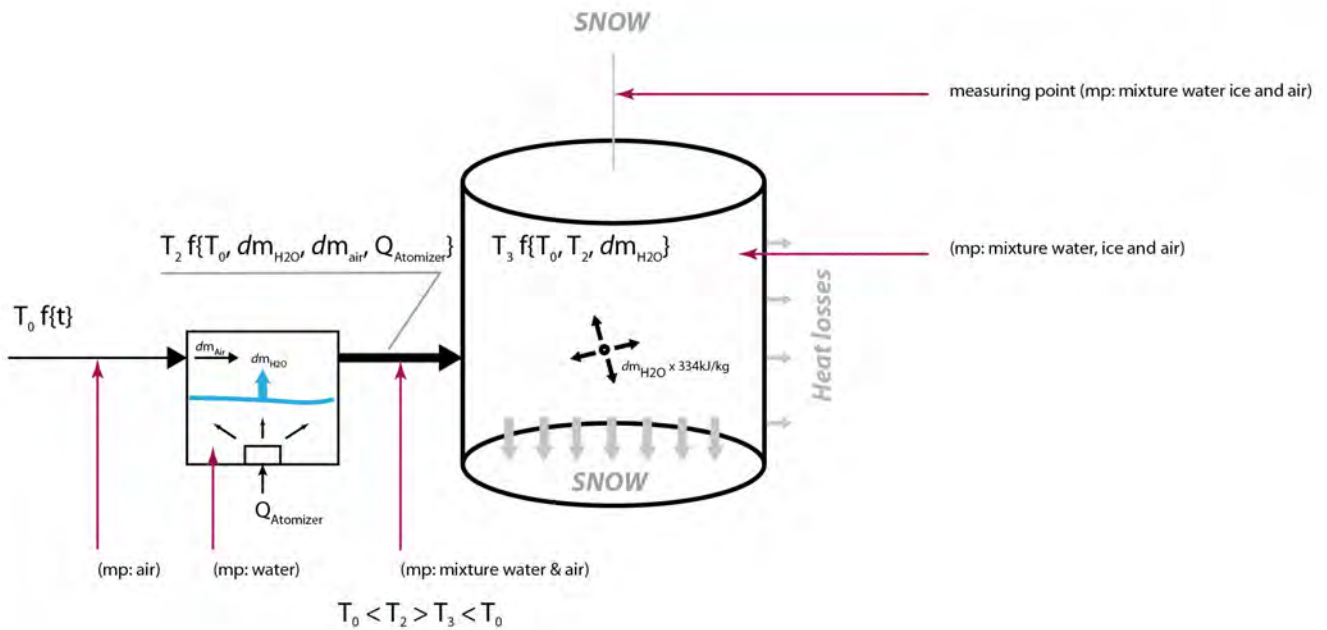


Abbildung 33: Skizze der Wärmeströme und Messpunkte im Versuchsbehälter.

Fact sheet: Laboratory device

Water:	0.736kg ± 0.333
Air:	16.775kg ± 10.344
ΔT_{air} :	+3.7°C ± 3.2
RH_start:	67.78% ± 12.05
Volume:	1.0m ³

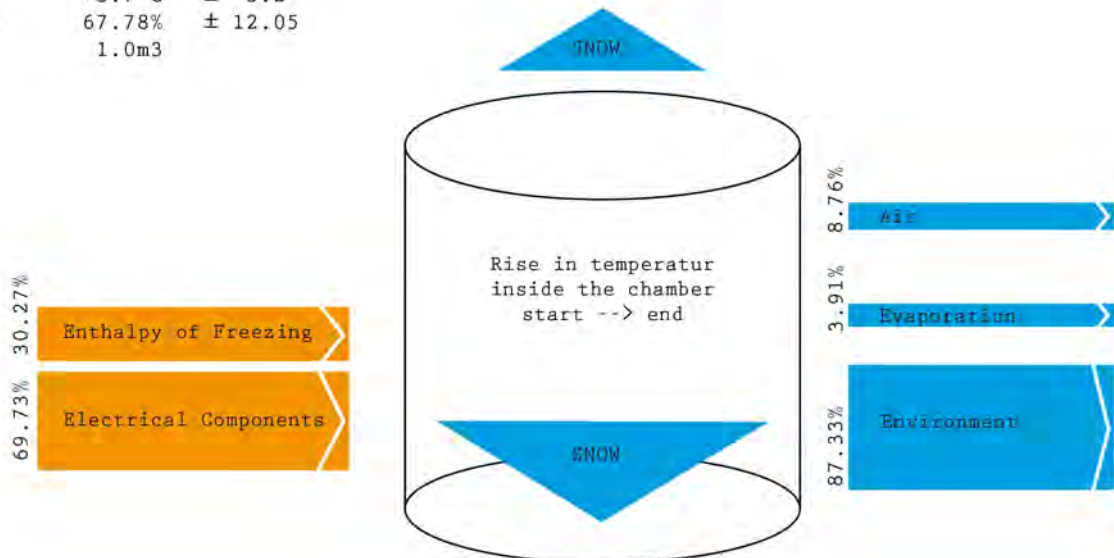


Abbildung 34: Energiebilanz des Versuchsbehälters unter Berücksichtigung der latenten Wärmeströme. Obwohl der Schnee im inneren eines Behälters produziert wird, dissipiert im Mittel etwa 87% der zugeführten Wärme durch die Behälterwand. Der Trägerluftstrom sowie mögliche Evaporationsverluste tragen nur unwesentlich zur „Kühlung“ des Behälters bei.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

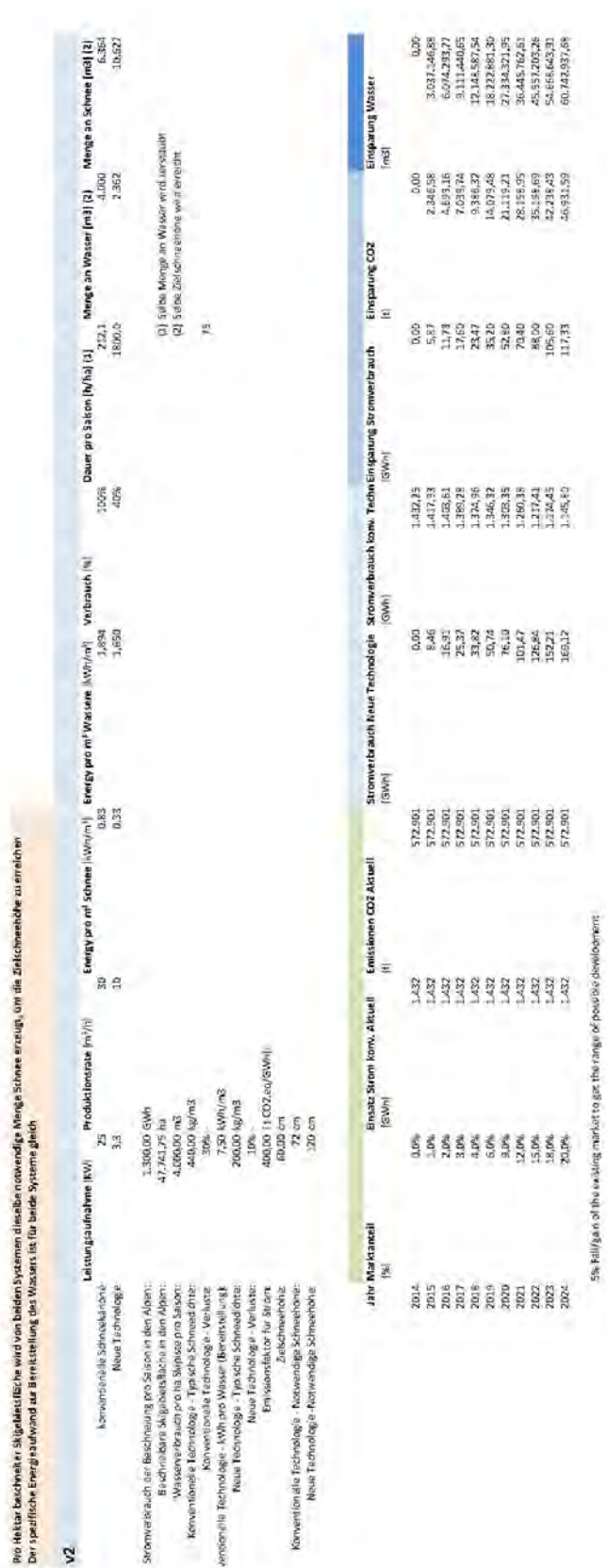


Abbildung 35: Einsparpotential der neuen Technologie und Vergleich mit konventionellen Schneigeräten. In der Vergleichsrechnung wird angenommen, dass beide Typen jene Menge an Schnee produzieren, die für die sog. Grundbeschneigung erforderlich ist.

2.5.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Behälter im Kältelabor, entstanden im Rahmen vom Projekt SNOW. Volumen 0.6m^3	5
Abbildung 2: Kühlbarer Behälter, gebaut während des Projekts PRIZE. Volumen 1.0m^3	5
Abbildung 3: Versuchsaufbau im Labor zur Schneeproduktion unter Normalbedingungen bei $+22^\circ\text{C}$	9
Abbildung 4: Heizungselement im Detail.....	10
Abbildung 5: Flächige Wandheizung zur Steuerung der Oberflächentemperatur.....	10
Abbildung 6: Beobachtung der Kristalle im Behälter.	11
Abbildung 7: Lupenansicht des erzeugten Schnees.	11
Abbildung 8: Standardversuchsaufbau im Kältelabor, während eines Testlaufs, mit den grundlegenden Komponenten: Nebelzufuhr, zusätzlicher kalter Luftstrom, Datenaufzeichnung und Versuchsreaktor. Optional wurde ein zentraler Auslass im Reaktordeckel oder ein tangentialer Auslass in der Behälterwand gewählt. Nicht im Bild ist die Öffnung für das Einbringen der Eiskeime (Nukleatoren).	12
Abbildung 9: Beobachtung der Eiskristall-bildung mit Hilfe eines gebündelten Lichtstrahls.	12
Abbildung 10: sichtbare Wolke im unteren Bereich des Behälters, unsichtbare Eiskristalle bei normaler Beleuchtung.	12
Abbildung 11: Anordnung der Thermoelemente und des Sensors für die relative Luftfeuchtigkeit im Kältelabor.	13
Abbildung 12: Zusätzliches vertikales Messprofil im kühlbaren Behälter.	13
Abbildung 13: Außenansicht Massendurch-flussmesser, die Durchflussrichtung ist von rechts nach links mit einem $d_i = 68\text{mm}$	14
Abbildung 14: Innenansicht Massendurch-flussmesser mit den beheizten und unbeheizten Temperaturfühlern.	14
Abbildung 15: Versuchsaufbau zur Bestimmung der maßgeblichen Einflussgrößen auf die Zerstäubungsrate des Ultraschallzerstäuber.	15
Abbildung 16: Zerstäuberbehälter der letzten Generation, wie er für die weiteren Arbeiten im AP2 verwendet wurde. Ein Nachfüllsystem, links neben dem orangen Zerstäubervolumen, ermöglichte die Einstellung eines konstanten Wasserspiegels. Minimale Änderungen des Wasserspiegels während des Nachfüllvorgangs wurden mit Hilfe von Ultraschallsensoren (rechts) erfasst. Die Messung der Wassertemperatur erfolgte über den Behälterdeckel (nicht sichtbar). Der Ultraschallzerstäuber wurde in der Mitte des orangen Zerstäubervolumens positioniert.	15
Abbildung 17: Durchlicht-Mikroskop mit 4x, 10x, 40x und 100x Vergrößerung inkl. Trinokularkopf (Modell: BTC-BIM105T). Für die Fotoaufnahmen der Kristalle wurde eine Nikon D5100 mit elektronischem Fernauslöser verwendet. Die Objektträger wurden für die Aufnahmen immer in der selben Position unter dem Mikroskop platziert und mit Hilfe des Kreuztisches an vordefinierte Aufnahmepunkte gefahren, um willkürliche Fotoaufnahmen zu vermeiden.	16
Abbildung 18: Schematische Übersicht der möglichen Ein- (A-E) und Auslässe (E,D).	20
Abbildung 19: Beispiel für das Variantenstudium mit Einlässen inkl. Nebelzufuhr bei den Öffnungen B und E sowie dem Auslass an der Position D. Ziel der Tests mit diesem Set-up war die räumliche Trennung zweier Nebelluftströme, um den Eiskristallen in der aufwärtsgerichteten Strömungsspirale zusätzliche Feuchtigkeit für das Wachstum zur Verfügung zu stellen.	21

Abbildung 20: PDA Messungen – Ultraschallzerstäuber: Mittlerer Durchmesser D_{10} als Funktion der Ventilatorspannung bei verschiedenen Füllständen.....	23
Abbildung 21: PDA Messungen – Spraydüsen: Mittlerer Durchmesser D_{10} für DF 25 in Abhängigkeit von der Messposition in vertikaler (z) Richtung für verschiedene Parameter.....	23
Abbildung 22: Strömungssimulation des kühlbaren Behälters – Geschwindigkeitsbetrag [m/s].....	24
Abbildung 23: Strömungssimulation des kühlbaren Behälters – Strömungslinien [m/s].....	24
Abbildung 24: Unterschiedliche Kristalltypen als Funktion der Temperatur. Die Ordinate wurde aus der Literatur übernommen (z.B. Libbrecht 2001), die Übersättigung in der künstlichen Wolke konnte im Rahmen dieser Testreihen nicht ermittelt werden (siehe auch Lettner, 2012).	25
Abbildung 25: Beschreibung der mittleren Kristallgröße (Ordinate links) und der mittleren Wachstumszeit (Ordinate rechts) als Funktion der gemittelten Behältertemperatur während der Versuche (siehe auch Lettner 2012, bzw. Braitto 2012).....	25
Abbildung 26: Mikroskopaufnahme eines Testlaufs im Kälteraum der BOKU Wien im August 2011.....	28
Abbildung 27: Produzierter Schnee im Kälteraum der BOKU Wien.	28
Abbildung 28: Darstellung einer Versuchsreihe mit den Angaben zur Schneeproduktionsrate in g/min bzw. cm^3/min sowie der erreichten Schneedichte.	29
Abbildung 29: Skizze des Versuchsbehälters mit den Positionen der Messfühler sowie den zugeführten Strömen von Luft und Nebel.	31
Abbildung 30: Vorschlag einer Schneekristallklassifikation basierend auf den Untersuchungen mit dem Schnee-Reaktor (siehe auch Lettner 2012)	32
Abbildung 31: Skizze der Wärmeströme und Messpunkte im Versuchsbehälter.	33
Abbildung 32: Energiebilanz des Versuchsbehälters unter Berücksichtigung der latenten Wärmeströme.	33
Abbildung 33: Einsparpotential der neuen Technologie und Vergleich mit konventionellen Schneigeräten. In der Vergleichsrechnung wird angenommen, dass beide Typen jene Menge an Schnee produzieren, die für die sog. Grundbeschneigung erforderlich ist.....	34

2.5.5 Literaturangaben

2.5.5.1 Infos zur Eiskeimproduktion

Hallett, J. and T. C. Foster (1992). Ice crystals produced by expansion: experiments and application to aircraft-produced ice. *Journal of Applied Meteorology* 32, 716-728.

[Vonnegut, B. (1948). Production of Ice Crystals by the Adiabatic Expansion of Gas. *Journal of Applied Physics* 19, 959.]

2.5.5.2 Hinweise für eine Weiterentwicklung der Bauweise

Takahashi, T., C. Inoue, Y. Furukawa, T. Endoh and R. Naruse (1985). A vertical wind tunnel for snow process studies (1985). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 3, 182-185.

→ In Schwebelage halten der wachsenden Schneekristalle mit Hilfe einer vertikalen Luftströmung, die reguliert werden kann

Song, N. and D. Lamb (1994). Experimental investigations of ice in supercooled clouds. Part 1: System description and growth of ice by vapor deposition. *Journal of the Atmospheric Sciences* 51, 1:91-103.

2.5.5.3 Aktuelle Studien zum Wachstum von Eiskristallen bei unterschiedlichen Bedingungen

→ besseres Verstehen der relevanten Parameter für ein kontrolliertes Wachstum der Eiskristalle

→ bzw. notwendig zum Ausarbeiten von aktuellen wissenschaftlichen Fragestellungen für einen möglichen Einsatzes des DG als Forschungsinstruments

Fukuta, N. and T. Takahashi (1999). The Growth of Atmospheric Ice Crystals: A Summary of Findings in Vertical Supercooled Cloud Tunnel Studies. *Journal of the Atmospheric Sciences* 56, 1963-1978.

Bailey, M. P. and Hallett, J. (2009). A Comprehensive Habit Diagram for Atmospheric Ice Crystals: Confirmation from the Laboratory, AIRS II, and Other Field Studies. *Journal of the Atmospheric Sciences* 66, 2888-2899.

Bailey, M. P. and Hallett, J. (2002). Nucleation effects on the habit of vapour grown ice crystals from -18 to -42 °C. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128, 1461-1483.

Westbrook, C. D. and A. J. Heymsfield (2011). Ice Crystals Growing from Vapor in Supercooled Clouds between -2.5° and -22° C: Testing Current Parameterization Methods Using Laboratory Data. *Journal of the Atmospheric Sciences* 68, 2416-2429.

Bacon, N., Baker, M. B. and B. D. Swanson (2003). Initial stages in the morphological evolution of vapour-grown ice crystals: A laboratory investigation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 129, 1903-1927.

Takahashi, T., N. Fukuta and T. Hashimoto (2008). Vertical supercooled cloud tunnel studies on the growth of dendritic snow crystals. Proceedings of the 15th International Conference on Clouds and Precipitation, Mexico 2008, ICCP 2008.

Takahashi, C. and M. Mori (2006). Growth of snow crystals from frozen water droplets. *Atmospheric Research* 82, 385-390.

2.5.5.4 Klassifikation von Eiskristallen

Kikuchi K., Kameda T., Higuchi K., Yamashita A. (2012). Global classification, new classification of natural snow crystals based on observations in mid-latitude and polar regions. *Seppyo; Journal of the Japanese Society of Snow and Ice* 74, 3: 223-241

(in Japanese, with English names of the types of crystals)

Bailey, M. P. and Hallett, J. (2009). A Comprehensive Habit Diagram for Atmospheric Ice Crystals: Confirmation from the Laboratory, AIRS II, and Other Field Studies. *Journal of the Atmospheric Sciences* 66, 2888-2899.

Magono, C. and C. W. Lee (1966). Meteorological Classification of Natural Snow Crystals. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 2(4): 321-335.

2.5.5.5 Wissenschaftliche Schneeerzeugung

Bones, J. and E. E. Adams (2009). Controlling Crystal Habit in a Small Scale Snowmaker. Proceedings International Snow Science Workshop, Davos 2009, Report ISSW09, 67-72.

Meier, M. (2006). *Produktion von naturidentischem Schnee*. Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich.

Nakamura, H. (1978). A new apparatus to produce fresh snow. *Report of the National Research Center for Disaster Prevention 19*, 229-237.

2.5.5.6 Physik der Schneekristalle (Auszug)

Beckmann, W., R. Lacmann, et al. (1983). "Growth Rates and Habits of Ice Crystals Grown from the Vapor Phase." *Journal of Physical Chemistry* 87.

Foster, T. C., & Hallett, J. (1993). Ice Crystals Produced by Expansion: Experiments and Application to Aircraft- produced Ice. *Journal of Applied Meteorology*, 32(April), 716–728.

Günther, E., Mehling, H., & Hiebler, S. (n.d.). Nucleation by Ultrasound in subcooled PCM. Bavarian Center for Applied Energy Research

Keller, V. W. and J. Hallett (1982). "Influence of air velocity on the habit of ice crystal growth from the vapor." *Journal of Crystal Growth* 60.

Libbrecht, K. G. (2001). "Morphogenesis on Ice: The Physics of Snow Crystals." *Engineering and Science* LXIV(1):10-19.

Libbrecht, K. G. (2005). The physics of snow crystals. *Reports on Progress in Physics*, 68(4), 855–895. doi:10.1088/0034-4885/68/4/R03

Murphy, D. M., & Koop, T. (2005). Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(608), 1539–1565. doi:10.1256/qj.04.94

Nakaya, U. (1954). *Snow Crystals, Natural and Artificial*. Cambridge, Harvard Univ. Press.

Sei, T. and T. Gonda (1987). "The Growth Mechanism of Ice Crystals Grown in Air at a Low Pressure and their Habit Change with Temperature." *Journal de Physique* 3.

2.5.5.7 Bücher

→ Darstellung der grundlegenden physikalischen Prozesse in Wolken

Pruppacher, H.R. and J.D. Klett (1997). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic Publishers.

Lamb, D. and J. Verlinde (2009). *Physics and Chemistry of Clouds*. Cambridge University Press, New York.

2.5.5.8 Einbettungsanalyse

Aonofriesei F. (2008). Microbial life in polar regions pp 74-80 in *Proceeding to The Vienna Conference on Polar Tourism*
http://www.breiling.org/lect/090209/proceedings_polar_tourism_081021.pdf (retrieved on March 15th, 2013)

Böhm R., Schöner W., Auer I., Hynek B., Kroisleitner C., Weyss G. (2007): *Gletscher im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern*. Wien: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 111 Seiten, ISBN 987-3200010130

Breiling M., P. Charamza, O.R. Skage (1997). *Klimasensibilität österreichischer Bezirke mit besonderer Berücksichtigung des Wintertourismus. Rapport 1, 1997*. Department of Landscape Planning Alnarp, Swedish University of Agricultural Sciences. 104pp.

Breiling M., P. Charamza, W. Feilmayr (2008). Klimasensibilität des Salzburger Wintertourismus nach Bezirken. Die Bedeutung eines Klimawandels und Strategien der Anpassung. ISBN 3-900804-17-6

Hahn, F. (2004). Künstliche Beschneigung im Alpenraum. Ein Hintergrundbericht. Alpmedia 2004.

De Jong, C. (2011). Personal communication; Chambery, May 17th, 2011

Scott D. (2012). Personal communication; Waterloo, February 6th, 2012

Thompson L. (2011). Personal communication; Columbus, February 7th, 2011.

Zemp, M. (2006): Glaciers and climate change – Spatio-temporal analysis of glacier fluctuations in the European Alps after 1850. PhD thesis, Universität von Zürich, 201 Seiten

2.5.5.9 Publikationen und Konferenzen im Rahmen des Projekts

Bacher M. Schnee aus der Dose – Eine neue Art der Schneeproduktion in Entwicklung. In Nachlese 2011 Schneiakademie; Österreichische Schneiakademie 2011; 12 bis 14 September 2011. Retz. (http://www.schnei-akademie.at/nachlese11_1.html)

Bacher M. Kunstschnee neu definiert. Kurzvortrag im Rahmen der InnovationStars am Austrian Innovation Forum – The power of Co-creation. IST Austria Klosterneuburg, 11. Oktober 2012.

Bacher M. Innovative Schneeerzeugung – Schneekristalle in einer künstlichen Wolke. In Energie alpine; Schaufenster zu Forschung & Innovation in Westösterreich (Science Brunch 4.1, Innsbruck, Oktober 10, 2012). Wien: Klima- und Energiefonds, 2012. S. 12–13 (<http://www.klimafonds.gv.at/veranstaltungen/veranstaltungen/SB4-1-Energie-alpin/>)

Bacher M., Draxler D., Falkensteiner M., Sokratov S., Best F., **Breiling M.**, Harasek M., Siegmann-Hegerfeld T. Schneekristallbildung in einer künstlicher Wolke zum Einsatz als Schneeerzeuger SNOW. In Tagungsband des 12. Österreichischen Klimatags; „Klima, Klimawandel, Auswirkungen und Anpassung“ in Österreich; 21 und 22 September 2011. Wien: Klimaforschungsinitiative AustroClim, 2011. V32 (Vorträge Tag 2) (<http://www.austroclim.at/index.php?id=klimatag20110>)

Braitto, S. Production of natural snow in an artificial cloud with a focus on the effects of the water temperatures. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna; 127p., November 2012.

Burkart J., Bacher M., Sokratov S., Falkensteiner M., Breiling M., Best F., Braitto S., Lettner A., Schabschneider H. Introducing a new device to study crystal growth and ice nuclei in a supercooled cloud. In 16th International Conference on Clouds and Precipitation ICCP–2012; July 30–August 3, 2012. Leipzig: ICCP–IAMAS, 2012. #724 (http://www.eventclass.com/contxt_iccp2012/programme/)

Draxler D. Snow production - Formation of ice nuclei from microscopic water droplets. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna; 109p., Vienna, October 2010.

Fink Th. The enhancement of the snow production rate with a machine for artificial production of snow crystals. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna. (in progress)

Lettner A. Growth of snow crystals in an artificial cloud: effect of air temperature on crystal growth. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna; 127p., November 2012.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Schabschneider H. The influence of various parameters on the growth of snow crystals in an artificial cloud. Master thesis. Department of Physics of functional materials, Faculty of Physics, University of Vienna.

3 Kosten

3.1 Kostentabelle für die gesamte Projektlaufzeit

Die folgende Tabelle gibt einen aggregierten Überblick der angefallenen Kosten im gesamten Projektablauf pro AntragstellerIn und PartnerIn, gegliedert nach Personalkosten, FTE-Investitionen, Reisekosten, Sach- und Materialkosten und Drittkosten und ist mit dem **Abrechnungsbild** (siehe www.ffg.at/neue-energien-2020, Bereich „Vorlagen Berichtslegung“) abzustimmen.

	Personal- kosten	FTE- Invest.	Reise- kosten	Sach- und Material- kosten	Dritt- kosten	Kumulierte Kosten in der Projektlaufzeit Summe Kosten im Konsortium	Förderbare Gesamt- kosten lt. Vertrag
BOKU Wien Kosten in der Projektlaufzeit 1.10.10- 31.12.12	399.743	1.185	2.248	28.882	56.010	488.067	496.970
Siemens AG Österreich Kosten in der Projektlaufzeit 1.10.10- 31.12.12	50.999	0	512	13.526	0	65.037	115.707
TU Wien Kosten in der Projektlaufzeit 1.10.10- 31.12.12	169.108	0	7.578	9.820	35.000	221.505	224.682
Gesamt	619.850	1.185	10.336	52.228	91.010	774.609	837.359

Summe der Kosten / Kostenkategorie der Antragstellerin und aller PartnerInnen

3.2 Kostenbeschreibung für die gesamte Projektlaufzeit

3.2.1 Kostenbeschreibung der Universität für Bodenkultur Wien (A)

Personal:

In Abweichung zur ursprünglichen Projektplanung wurde zwei zusätzliche studentische Mitarbeiter abschnittsweise im Rahmen von Anstellungen in das Projekt involviert und finanziert (S.Braito, H.Schabschneider). Alle Projektmitarbeiter, die unter den Personalkosten ausgewiesen sind, arbeiteten ausschließlich im und für das Projekt SNOW. Ausnahme sind die Mitarbeiter Fritz Zott und Dr. Thomas Wiesinger, die im Rahmen ihrer Anstellungen an der Universität für Bodenkultur das Projekt stundenweise unterstützt haben.

F&E:

Im Projektantrag waren keine Mittel für infrastrukturelle F&E-Investitionen vorgesehen. Es mussten aber Computer und Fotokameras (1x gestohlen, deshalb Anschaffung von zwei Kameras) sowie ein Werkzeug angeschafft werden.

Reisekosten:

Die veranschlagten Reisekosten bezogen sich auf Aktivitäten im Rahmen der Arbeitspakete 2 und 6. Tatsächlich wurden auch Reisen im Rahmen des AP5 (Verbreitung und Verwertung) notwendig. Dabei kam es zu einer geringfügigen Erhöhung des Reisebudgets um 400 Euro.

Sach- und Materialkosten:

Alle Ausgaben betreffend Sach- und Materialkosten wurden für die konstruktiven Maßnahmen im Labor aufgewendet. Eine Ausnahme bildet ein Rechercheauftrag an ValIP e.U. um die Verwendung von bereits geschützten Technologien auszuschließen bzw. die technische Umsetzung bei der konventionellen Schneeerzeugung zu dokumentieren.

Drittkosten:

Geplant war die Umsetzung von Teilen des Engineerings des Versuchsbehälters mit der Firma TestFuchs GmbH. Dafür wurden Mittel im Bereich der Drittkosten genehmigt. Im tatsächlichen Projektablauf war die Ausgliederung des Engineerings auf Grund des zu geringen Budgets nicht realistisch bzw. effektiv. Aus diesem Grund wurde zu Dokumentationszwecken ein Unternehmen involviert, das die umgesetzten baulichen Maßnahmen rund um die Versuchsbehälter in Form von technischen Zeichnungen erfasst und digital zur Verfügung stellt.

Aufteilung der Arbeitspakete:

Durch die erhöhten Materialkosten am Beginn des Projekts entstanden in Summe geringfügig höhere Kosten im Rahmen des AP1. Ebenso wurden die Kosten für den Besuch von Veranstaltungen (AP5) zur Präsentation der Projektergebnisse unzureichend kalkuliert. Teile des Projektmanagements wurden von der Siemens AG getragen, wodurch sich der finanzielle Umfang dieses Arbeitspakets reduzierte.

3.2.2 Kostenbeschreibung der Siemens AG Österreich (P1)

Die im ursprünglichen Antrag angeführten Personen konnten auf Grund der laufenden operativen Tätigkeiten nicht am Projekt mitwirken und wurden daher von durch ein entsprechend qualifiziertes Projektteam ersetzt.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Durch die Änderungen in der Personalzusammensetzung und die geänderten Rahmenbedingungen im Projekt wurde mehr in das Projektmanagement investiert als ursprünglich veranschlagt. Die Gesamtkosten für Personal wurden aber gleichzeitig reduziert.

Die für Sach- und Materialkosten veranschlagten Gelder waren im ursprünglichen Antrag zu gering bemessen um die tatsächlichen Projektanforderungen zu erfüllen. Unter Einhaltung der genehmigten Projektvolumina für die SAGÖ wurde ein Antrag auf Kostenumschichtung gestellt.

Die veranschlagten Reisekosten wurden nicht in vollem Umfang in Anspruch genommen.

3.2.3 Kostenbeschreibung der Technischen Universität Wien (P2)

Der Großteil der TU Wien Kosten waren Lohnkosten, knapp € 170.000.-, € 35.000.- wurden in einem Subvertrag an das Institut für Mathematik der Uni Wien vergeben, knapp € 13.000.- waren Beratungskosten und € 7.500.- Reisekosten für Fred Best und Meinhard Breiling.

3.2.4 Soll-ist Vergleich

AP	BOKU ist	BOKU soll	Siemens ist	Siemens soll	TU Wien ist	TU Wien soll	
1	160.007,58	166.492,00		2.765,00	119.489,36	75.951,00	279.496,94
2	288.156,77	285.188,00	33.350,60	89.294,00	58.943,27	108.411,00	380.450,65
5	12.476,25	6.024,00		10.976,00	37.758,75	32.616,00	50.235,00
6	27.426,65	39.266,00	31.686,15	12.672,00	5.313,92	7.704,00	64.426,72
	488.067,25	496.970,00	65.036,75	115.707,00	221.505,30	224.682,00	774.609,30

3.3 Kostenumschichtungen

Erforderliche Kostenumschichtungen der Universität für Bodenkultur Wien wurden im Vorfeld der Berichtserstellung an die FGG übermittelt.

Zwischen den Partnern wurden keine Kosten umgeschichtet.

4 Verwertung

Tabelle 1: Konferenzen, Projektmeetings und sonstige Präsentationen im Rahmen von SNOW

Vortragende	Thema	Datum, Veranstaltung	Weblink
Bacher, Best, Breiling, Sokratov	Presentation of KLI.EN SNOW Project and Continuation of Discussion on Sustainable Snow Production	7. April 2011 TTL Event,	http://ttl.tuwien.ac.at/content/news_events.php
Breiling	Von der Idee zur Verwertung: „Dendritic Snow Production“	26. April 2011 FFG/LES Veranstaltung,	www.les-austria.at http://www.les-austria.at/WIPD_TTL.pdf

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Bacher	Eine neue Art der Schneeproduktion in Entwicklung	12. September 2011; 11. Österreichische Schneiakademie , Retz,	http://www.schnei-akademie.at
Bacher, Best, Breiling, Harasek, Schmeisser, Sokratov, Suppan, Karner, Stögner	Presentation of KLI.EN SNOW Project – Intermediate Report to an Interested Public	10. November 2012 TTL Event, TU Wien	http://ttl.tuwien.ac.at/content/news_events.php
Bacher, Best, Breiling, Harasek, Sokratov, Monsberger,	Presentation of KLI.EN SNOW Project – Intermediate Report to an Interested Public	5. Dezember 2012 Faculty Club BOKU	http://ttl.tuwien.ac.at/content/news_events.php
Breiling et al.	TTL - Side event EGU: Water for skiing industry and future water scarcity	23. April 2012	http://ttl.tuwien.ac.at/content/news_events.php
Breiling et al.	BOKU - Final Project Presentation & Discussion on SNOW continuation	21. Juni 2012	http://ttl.tuwien.ac.at/content/news_events.php
Breiling et al.	TTL – Final Project Presentation to an Interested Public	13. September 2012	http://ttl.tuwien.ac.at/content/news_events.php
Breiling et al.	Schneekristallbildung in einer künstlichen Wolke zum Einsatz als Schneeerzeuger	22. September 2011; 12. Österreichischer Klimatag, BOKU Wien,	http://www.austroclim.at/ http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/ppt_12.Klimatag/Programm_2011-09-20.pdf
Breiling, Sokratov	Water demand for ski resort development in the Austrian Alps: an Overview	EGU 2012	http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/EGU2012-14027.pdf
Burkart et al.	Introducing a new device to study crystal growth and ice nuclei in a supercooled cloud	IPCC 2012, Leipzig	http://www.eventclass.com/contxt_iccp2012/programme/default_session.asp?node=34&day=thursday&sessionID=21&bySearch=true&search=burkart#724
Bacher	Innovative Schneeerzeugung – Schneekristalle in einer künstlichen Wolke	Science Brunch West, Oktober 2012	

Markt:

Die Alpenregion wird als potentieller Hauptmarkt im Bereich Beschneigung für Skigebiete gesehen. Hier alleine befinden sich 60% der weltweiten Pistenfläche. Von den ca. 95.700 ha Skigebietsfläche sind aktuell etwa 58% beschneibar. Die Entwicklung der beschneibaren Fläche in den einzelnen Ländern war dabei unterschiedlich. Vor allem in Österreich und Italien ist der Anteil an beschneibaren Pisten sehr groß, ca. 67% der Pistenfläche könne beschneit werden. Andere Länder, wie die Schweiz und Frankreich waren eher restriktiv im Ausbau der technischen Beschneigung in Skigebieten. In den letzten Jahren hat sich aber auch dort die Position geändert und es kommt zu einem entsprechenden Nachrüsten. Wir gehen davon aus, dass in der nächsten Dekade der gesamte

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Alpenraum zu 75% mit Beschneiungsanlagen ausgestattet sein wird und dann mehr als 70.000 ha beschneibar sind.

Mehr als zwei Drittel des Weltmarktes liegt in der Alpenregion. Österreich alleine, mit über 15% der weltweiten Skigebietsfläche, ist der wichtigste Markt in der Alpenregion. Wir gehen von einem Volumen von etwa 150 Mio.€/a aus, das alleine auf die Schneeerzeuger entfällt. Zusätzliche Infrastruktur wie Pumpanlagen, Leitungsbau etc. sind hier nicht berücksichtigt. Für den potentiellen Einsatz in Skigebieten muss mit der neuen Technologie eine Mindestproduktionsmenge von etwa 10m^3 Schnee /h erreicht werden. Wir gehen davon aus, dass die neue Technologie nicht als Substitut für bestehende Anlagen eingesetzt werden kann, sondern überall dort wichtig wird, wo es um eine Verbesserung der Pistenqualität geht, die auf leichten und in weiterer Folge weichen Schnee zurückgreifen muss. Das sind u.a. Pisten für Kinder, stark vereiste Stellen, Snow Parks, aber auch spezielle Tiefschneepisten.

Die notwendige technische Weiterentwicklung bzw. die Skalierung der Technologie ist möglich. Aus heutiger Sicht gehen wir davon aus, dass eine Demonstrationsanlage mit einer Produktionskapazität von $1\text{-}3\text{m}^3$ Schnee / h innerhalb von 12 Monaten bereit gestellt werden kann. Ziel ist es, innerhalb von 30 Monaten einen Prototyp zu präsentieren, der die erforderliche Mindestmenge an Schnee produziert. Die Möglichkeit, naturähnlichen Schnee zu produzieren und für den Gebrauch on-demand einzusetzen ist in der sich ständig weiterentwickelnden Branche einzigartig und nachgefragt. Die zusätzlichen Verbesserungen durch einen geringeren Energieverbrauch bzw. einer effektiveren Nutzung des Wassers bilden weitere Anreize für diese Technologie.

Neben einem Einsatz in den Skigebieten ist auch ein Betrieb in Skihallen denkbar. Obwohl Österreich als Nation der Berge gilt, ist auch der Indoor Skibetrieb eine österreichische Erfindung: die erste Skihalle wurde in der Zwischenkriegszeit in Wien gebaut. Der Nordwestbahnhof in Wien war zuvor der Schneepalast und wurde am 26. November 1927 durch den Bürgermeister Karl Seitz eröffnet. Die Piste im 3000m^2 großen Skigelände verlief über eine Holzrampe. Eine Sprungschanze machte Sprungweiten bis zu 20 Meter möglich.

Heute gibt es rund 50 Skihallen, die meisten stehen in den Niederlanden und Norddeutschland mit jeweils 7 Stück. Wir rechnen, dass bis 2030 rund 1000 ha Skipiste unter Dach sind. Dies ist ein wichtiger Impuls neue Skifahrer für die heimischen Skigebiete zu gewinnen. Durch Skihallen bleibt auch der Skisport präsent in den Köpfen. Skihallen sind auch potentielle Großlabors um DG Schnee an möglichst viele unterschiedliche Produktionsbedingungen im Freiland anzupassen. Alleine deshalb sind sie interessant, wenngleich die Fläche nur rund 0,5% von Freilandflächen betragen wird.

Im Rahmen des SNOW Projekts wurden auch entsprechende Kontakte zu Skigebieten gefestigt, die als Partner für notwendige Feldversuche zur Verfügung stehen können.

Diplom/Masterarbeiten:

Im Rahmen des Projekts wurde Studenten die Möglichkeit zur Mitarbeit gegeben. Es entstanden vier Diplom- bzw. Masterarbeiten.

Braito, S. Production of natural snow in an artificial cloud with a focus on the effects of the water temperatures. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna; 127p., November 2012.

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

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

Fink Th. The enhancement of the snow production rate with a machine for artificial production of snow crystals. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna. (in progress)

Lettner A. Growth of snow crystals in an artificial cloud: effect of air temperature on crystal growth. Master thesis. Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Life Sciences Vienna; 127p., November 2012.

Schabschneider H. The influence of various parameters on the growth of snow crystals in an artificial cloud. Master thesis. Department of Physics of functional materials, Faculty of Physics, University of Vienna.

5 Ausblick

Bitte verfassen Sie in diesem Punkt Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Die Arbeiten mit dem Laborbehälter haben gezeigt, dass der Prozess sehr robust abläuft und je nach den externen Bedingungen unterschiedliche Typen von Eiskristallen produziert werden können. Weitere Forschungsarbeiten sollten demnach folgende Punkte umfassen, für die im Rahmen dieses Projekts sehr wichtige Vorarbeiten geleistet wurden:

- Empirisches Studium des Prozesses der Eiskristallentstehung sowie des Kristallwachstums in Abhängigkeit der Zufuhr von Wasser (Nebeldichte) sowie der Luftströmung im Behälter (Durchmischung).
- Untersuchungen zum Einfluss von Nukleationspunkten auf das Kristallwachstum. Es gilt die Anzahl der injizierten Kristallisationspunkte zu kontrollieren, um anschließend das Kristallwachstum in einer genau definierten Umgebung (Temperatur, Flüssiggehalt, Luftfeuchtigkeit) zu untersuchen.
- Der Wärmetransport durch die Behälterwand beeinflusst maßgeblich den Temperaturhaushalt im Inneren des Reaktors und damit auch den Prozess der Kristallbildung. Um die latenten Wärmeströme bei der Kristallisation besser zu verstehen ist es notwendig, die Wandtemperatur zu kontrollieren und damit auch den Wärmefluss nach außen.
- Weiterentwicklung eines mathematischen Modells zur Kristallisation und Kristallwachstum in einer künstlichen Wolke, das in weiterer Folge Schritt für Schritt in ein makroskopisches Strömungsmodell integriert wird. Damit soll bei gegebenen Eingangsparametern nicht nur die Strömung im Behälter ermittelt sondern auch der Einfluss der latenten Wärmeströme näher beschrieben werden.
- Die Größe der Partikel in der Nebelwolke beeinflusst den Kristallisationsvorgang. Aufbauend auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen sollten unterschiedliche Zerstäuberdüsen ausgesucht und vermessen werden. In einem iterativen Prozess sollten durch empirische Tests und Messungen eine Bandbreite optimaler Düsen und Betriebsbedingungen ermittelt werden.
- Neben den Forschungsarbeiten in Bezug auf den Prozess der Kristallisation ist geplant, die Technologie für die Anwendung in Skigebieten weiterzuentwickeln. In erster Linie bedeutet das, die Schneeproduktionsmenge bei gleicher Schneequalität zu steigern. Das soll in erster Linie mit Hilfe eines größeren Reaktors und einer effektiveren Zerstäubungstechnik erreicht werden. Die begleitenden Adaptierungen der Luftströmung, Eiskeimeinbringung etc. müssen ebenso mitberücksichtigt werden. Die bisherigen Versuche mit dem kleinen Reaktor außerhalb des Kälteraumes haben gezeigt, dass der Prozess sehr robust abläuft.