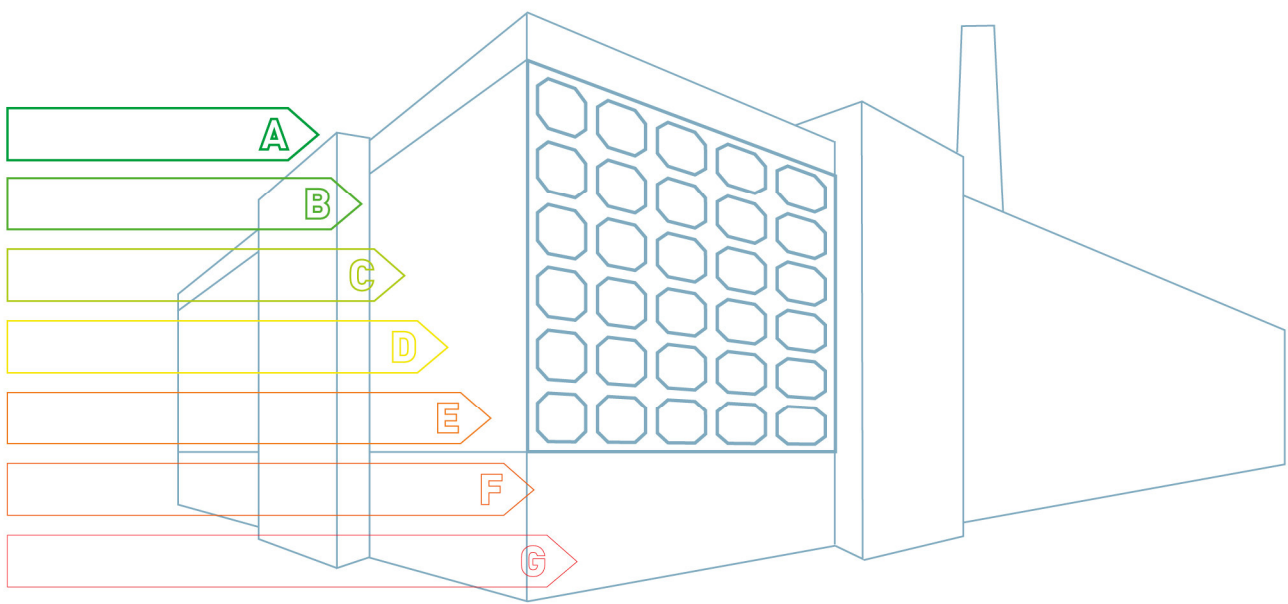




SNOW

Schneekristallbildung in einer künstlichen Wolke zum Einsatz als Schneeerzeuger



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

SNOW

Schneekristallbildung in einer künstlichen Wolke zum Einsatz als Schneeerzeuger

AutorInnen:

Universität für Bodenkultur Wien

Dipl. Ing. Bacher Michael

Mag. Dr. Burkart Julia

Dr. Sergey Sokratov

Technische Universität Wien

Dipl. Ing. Dr. Breiling Meinhard

Fred G. Best

Dipl. Ing. Dr. Harasek Michael

Dipl. Ing. Dr. Siegmann Tanja

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	5
3.1	Behälterbau und Versuchsanordnung	5
3.2	Messsystem, Zerstäubertest und Tröpfchengrößen	6
3.3	Schneeerzeugung mit dem Versuchsbehälter	7
3.4	Begleitende Modellrechnung	7
3.4.1	Mathematische Modellierung	7
3.4.2	CFD	8
3.5	Einbettungsanalyse	9
3.5.1	Marktanalyse	9
3.5.2	Ressourcen- und Energieeffizienz	9
3.5.3	Meteorologische Bedingungen	9
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	10
4.1	Erzeugung von Schneekristallen	10
4.2	Schneekristalle als Funktion der Temperatur	11
4.3	Schneedichte als Funktion der Temperatur	11
4.4	Zeitliche Entwicklung der Schneekristalle	13
4.5	Modellbeschreibung des Kristallwachstums	14
4.6	Analyse der Strömung mit Hilfe numerischer Verfahren	15
4.7	Einbettungsanalyse	15
5	Ausblick und Empfehlungen	16
6	Literaturverzeichnis	18
7	Anhang	20
8	Kontakt Daten	21

2 Einleitung

Da die technische Beschneigung von Skigebietsflächen aus der Planung der Seilbahnbetreiber nicht mehr wegzudenken ist und der dafür notwendige Strom- und Wasserbedarf enorm sind, soll im Rahmen dieses Projekts an den Grundlagen einer energie- und ressourceneffizienten Methode für die Produktion von natürlichem Schnee in einer künstlichen Wolke geforscht werden.

Aufgabe war es, Grundlagen zum Kristallisationsvorgang von Eiskristallen in der künstlichen Wolke zu erarbeiten sowie durch umfangreiche empirische Testläufe die Funktionsweise der Technologie zu demonstrieren. Das Energieeinsparpotential soll ebenso aufgezeigt werden wie die Möglichkeit, Wasser bei der Schneeerzeugung zu sparen.

Zentrale Aufgabe des Projekts war es daher, einen Versuchsbehälter zu konzipieren, der für die Testläufe verwendet werden konnte. Der Reaktor diente dazu, die Grundlagen der Kristallisation unter den gegebenen Bedingungen zu erfassen. Ebenso wurde damit der Funktionsnachweis erbracht.

Alle Arbeiten im Projekt SNOW sind der industriellen Forschung zugeordnet. Das Projekt wurde im Themenfeld: 3.3 Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe sowie im Themenpunkt: 3.3.1 Neue Produktionsverfahren und Technologien eingereicht.

Empirische Tests mit den Versuchsbehältern und die begleitenden Untersuchungen bildeten die Grundlage der Arbeiten im Rahmen des Projekts. Um den Kristallisationsprozess in der künstlichen Wolke auch theoretisch zu beschreiben, wurde damit begonnen, ein mathematisches Modell zu entwickeln, das die latenten Wärmeströme der den Phasenübergänge berücksichtigt. Ein makroskopisches Modell (CFD) wurde eingesetzt, um die Luftströmung im Behälterinneren zu beschreiben. Expertengespräche und Workshops dienten dazu, die Eignung der Technologie für eine mögliche Anwendung in Skigebieten zu erfassen.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Behälterbau und Versuchsanordnung

Für die Testläufe zur Schneeerzeugung wurden mehrere Versuchsaufbauten konzipiert, von denen eine Variante für die weiterführenden Analysen und den Funktionsnachweis verwendet wurde. Zu Beginn des Projekts wurden Tests mit einem kühlbaren Behälter durchgeführt, aber auf Grund der fehlenden Beobachtungs- und Analysemöglichkeiten in Bezug auf die Kristallisation sowie die erzeugten Schneekristalle nach einer ersten Phase eingestellt. Alle weiteren Untersuchungen wurden im Kälteraum der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt.

Zum Einsatz kam ein zylindrischer Behälter mit einem Volumen von 0.6 m^3 sowie 1.0 m^3 . Beide Zylinder waren mit transparenten Seitenwänden ausgestattet. Vorrichtungen zur Entnahme der Schneekristalle

für weiterführende Analysen wurden bei beiden Zylindern eingebaut. Die Zufuhr der Feuchtigkeit erfolgte nahe des Behälterbodens, in einer quasi-tangentialen Richtung um eine schraubenförmige, nach oben gerichtete, Luftbewegung zu ermöglichen. Die Zufuhr der Eiskeime erfolgte über den Behälterboden, in zentraler Position. Der Wassernebel wird mit Hilfe eines Ultraschallzerstäubers erzeugt.

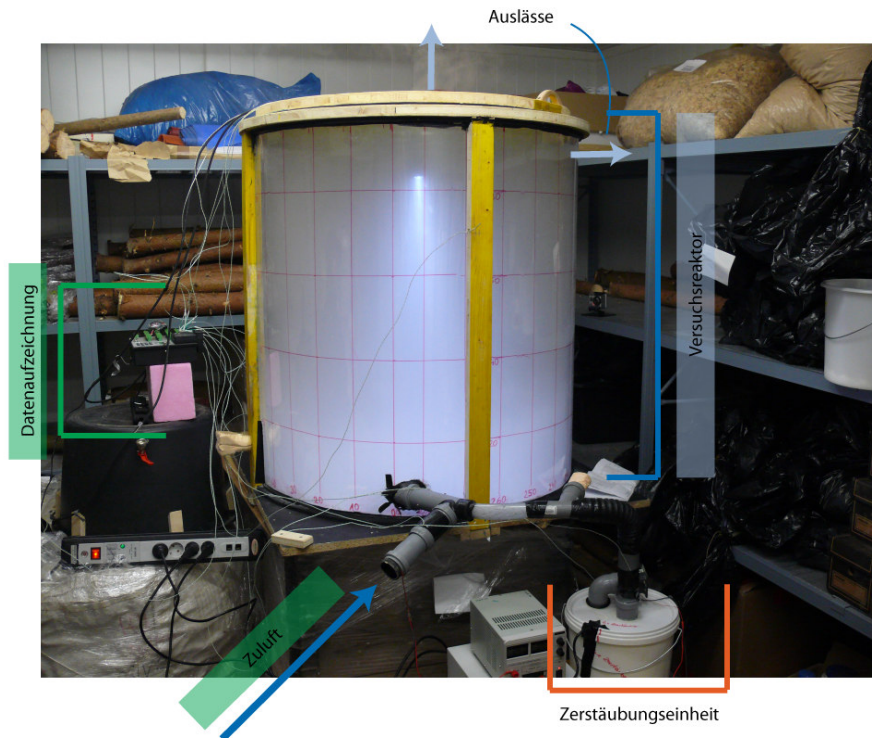


Abbildung 1: Beispiel eines Versuchsaufbaus im Kälteraum zur Schneeproduktion.

3.2 Messsystem, Zerstäubertest und Tröpfchengrößen

Die Bedingungen im Kälteraum und im Behälter wurden mit Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren erfasst. Typ-K Thermoelemente wurden für die Temperaturmessung eingesetzt, konventionelle Feuchtigkeitssensoren für die Ermittlung der relativen Luftfeuchtigkeit (Campbell S215). Die Lufttemperatur wurde entlang eines vertikalen Profils im Behälter gemessen (siehe Anhang, Abbildung 13).

Ultraschallzerstäuber erzeugen einen quasi-statischen Nebel, der mit Hilfe von Ventilatoren und Rohrleitungen in den Behälter geblasen wurde. Die geförderte Luftmenge der eingesetzten Ventilatoren wurde in eignen Versuchsreihen mit Hilfe eines Massendurchflussmessers, kalibriert für kalte Luftströme, ermittelt.

Die Zerstäubungsrate der verwendeten Ultraschallzerstäuber variiert mit der Höhe der Wassersäule über den Membranen, der Wassertemperatur sowie dem zum weiteren Transport verwendeten Luftvolumen. Diese Zusammenhänge wurden in eigenen Testreihen für den jeweiligen Versuchsaufbau ermittelt. Eine Messserie zur Bestimmung der Tröpfchengröße wurde an der TU Wien durchgeführt. Dafür wurde eine berührungslose optische Messtechnik (Phasen-Doppler-Anemometrie) eingesetzt.

3.3 Schneeerzeugung mit dem Versuchsbehälter

Die Bildung von Eiskristallen in einer natürlichen Wolke kann nur in Präsenz geeigneter Nukleationskeime statt finden. Einzig durch sehr tiefe Temperaturen ($< -38^{\circ}\text{C}$) kann ein spontanes Gefrieren von Wasser auch ohne Präsenz solcher Partikel beobachtet werden.

Auch im Inneren des Versuchsbehälters wachsen Eiskristalle wenn sowohl Eiskeime, als auch genügend Feuchtigkeit (Wasserdampf) verfügbar ist. Zuerst wird ein Wasserdampf in den Behälter eingeblasen. Durch die tiefen Temperaturen besteht dieser in erster Linie aus unterkühlten Wassertropfen. Werden nun Kristallisationspunkte in die Wolke injiziert, wachsen die Eiskeime auf Kosten der sie umgebenden Wassertropfen zu größeren Kristallen entsprechend dem Wegener-Bergeron-Findeisen Prozess (siehe z.B. Pruppacher & Klett 1997). Legen die Kristalle an Masse zu können sie nicht mehr durch die Luftströmung getragen werden und lagern sich am Behälterboden ab.

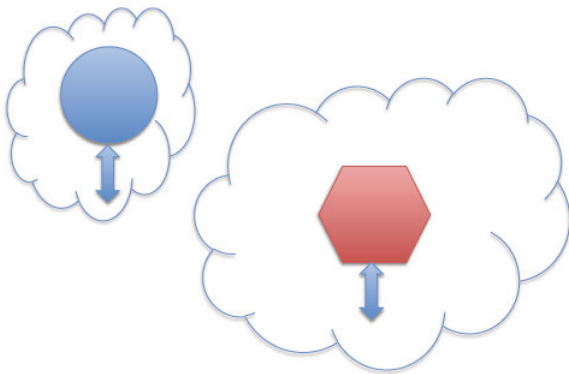


Abbildung 2: Die Wolke besteht zuerst aus einer Vielzahl von Wassertropfen, in die Eiskeime injiziert werden. Die Partikel sind umgeben von einer Hülle aus Wasserdampf.

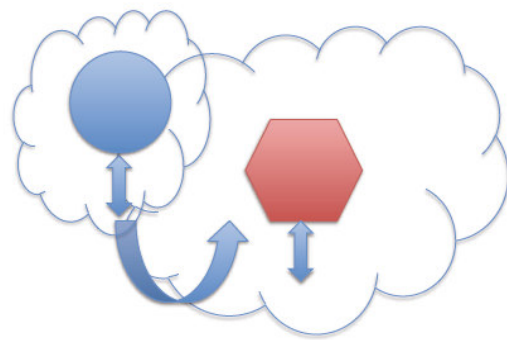


Abbildung 3: Nähern sich Wassertropfen und Eiskeime einander an, wachsen die Eiskeime auf Kosten der Wassertropfen zu größeren Partikeln.

Im Rahmen der Testläufe mit dem Versuchszylinder wurde versucht jene Bedingungen in der künstlichen Wolke zu beschreiben, bei denen das Kristallwachstum möglich ist, sowie diesen Vorgang hinsichtlich der Qualität und Quantität der Schneeproduktion zu optimieren. Dabei wurde das Kristallwachstum als Funktion der Temperatur im Reaktor beschrieben, sowie die Dichte des produzierten Schnees gemessen.

Um die Vorgänge im Behälter zu Dokumentieren wurden bei den Testläufen Proben der Eiskristalle entnommen und fotografiert.

3.4 Begleitende Modellrechnung

3.4.1 Mathematische Modellierung

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.

Die Phasenübergänge bei der Kristallisation bzw. dem Wachstum der Eiskristalle (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. Sie werden neben dem Gefrieren von Wasser im mathematischen Modell beschrieben. 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.

3.4.2 CFD

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.

Zur Unterstützung der Laborarbeiten wurden für verschiedene Versuchsaufbauten begleitende Simulationen durchgeführt. Vertikale und horizontale Geschwindigkeitsprofile, sowie eine Abschätzung der Verweildauer einzelner Partikel im Behälter, dienten als Diskussionsgrundlage für weitere Optimierungsschritte des Reaktors.

3.5 Einbettungsanalyse

3.5.1 Marktanalyse

Die Alpenregion ist der Hauptmarkt für die Hersteller von Beschneiungsmaschinen. Derzeit finden sich hier alleine knapp 100.000 ha Skipiste oder aktuell zwei Drittel der geschätzten Weltkapazität. Da speziell in Russland und China die Zahl der neuen Skigebiete rasant zunimmt, während er in den Alpen stagniert oder sogar abnimmt, rechnen wir, dass bis 2030 die Skigebietsfläche außerhalb der Alpen gleich groß wie jener der Alpenregion sein wird. Wir nehmen an, dass mit Stand Februar 2013, 80.000 ha weltweit beschneibar sind. Das ist rund die Hälfte der heute existierenden Skigebietsfläche. Ein möglicher Erfolg der Technologie setzt zuerst eine Mindestproduktionsrate von etwa 10 Kubikmeter Schnee pro Stunde voraus. Der tatsächliche spätere Einsatz einer solchen neuen Schnee-Maschine wird stark von den Kunden (Skigebietsbetreibern) abhängig sein. Es wird davon ausgegangen, dass die Technologie nicht als Substitut sondern als qualitative Ergänzung zu bestehenden Beschneiungsanlagen eingesetzt wird.

3.5.2 Ressourcen- und Energieeffizienz

Die hier entwickelte Technologie produziert Schnee mit einer geringeren Dichte. Das bedeutet, dass pro Kubikmeter Wasser mehr Volumen an Schnee produziert werden kann. Beträgt dieses Verhältnis bei konventionellen Geräten in etwa 1:2 (1 Kubikmeter Wasser ergeben theoretisch etwa 2 Kubikmeter technischen Schnee), zeigen die Laborergebnisse, dass ein Verhältnis von 1:5 bis 1:10 realistisch ist. Zusätzliche Wassereinsparung passiert durch die Verhinderung von Evaporations- bzw. Verwehungsverlusten. Die Erhebungen bei den Praktikern haben ergeben, dass diese Verluste mit etwa 30% der gesamten geförderten Wassermenge geschätzt werden können.

Durch den geringen Wasserbedarf bei der Produktion des Schnees, müssen die eingesetzten Pumpstationen weniger Leistung erbringen, was zu weiteren Einsparungen führen kann. Der aktuelle Energiebedarf für die Beschneiung in Skigebieten in Österreich je bereitgestelltem Kubikmeter Wasser kann mit etwa 8.5 kWh geschätzt werden. Das betrifft die gesamte Kette der benötigten Infrastruktur, von der Wasserfassung bis hin zur Zerstäubung am Beschneiungsgerät selbst.

3.5.3 Meteorologische Bedingungen

Der Wintersport in Österreich entstand in einer klimatisch kälteren Periode als dies heute der Fall ist. Im Schnitt konnte während der letzten 60 Jahre eine Erwärmung von 1°C festgestellt werden. Laut IPCC wird eine weitere und schnellere Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten auf alle Skiregionen zukommen. Konventionelle Beschneiung hat bis dato die festgestellte Erwärmung bzw. den ausbleibenden Schneeniederschlag ausgeglichen. In der Wintersaison, während kalter Tage, mit den

erforderlichen tiefen Temperaturen von weniger als -6°C wurde Schnee erzeugt. Die Anpassungskapazität dieser Technologie hält sich in Grenzen. Basierend auf einer Analyse der Periode 1948 bis 2007 und den Salzburger Referenzklimastationen können wir einen markanten Rückgang der kalten Tage mit einer Mitteltemperatur unter -2°C feststellen und folglich der Möglichkeit Kunstschnee zu erzeugen. Das Potential konventionellen Kunstschnee zu erzeugen ist bei den ausgewählten Stationen in wenigen Jahrzehnten und im Schnitt auf 79% zurückgegangen, je nach Höhenlage unterschiedlich, auf 63% bei der Station Mattsee oder auf 99% bei der Station Sonnblick.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Erzeugung von Schneekristallen

Der Versuchsaufbau erlaubte die Beobachtung des Kristallwachstums in Echtzeit (transparente Außenwände) und die Protokollierung der Bedingungen im Inneren des Behälters, die das Wachstum der Kristalle maßgeblich beeinflussen.

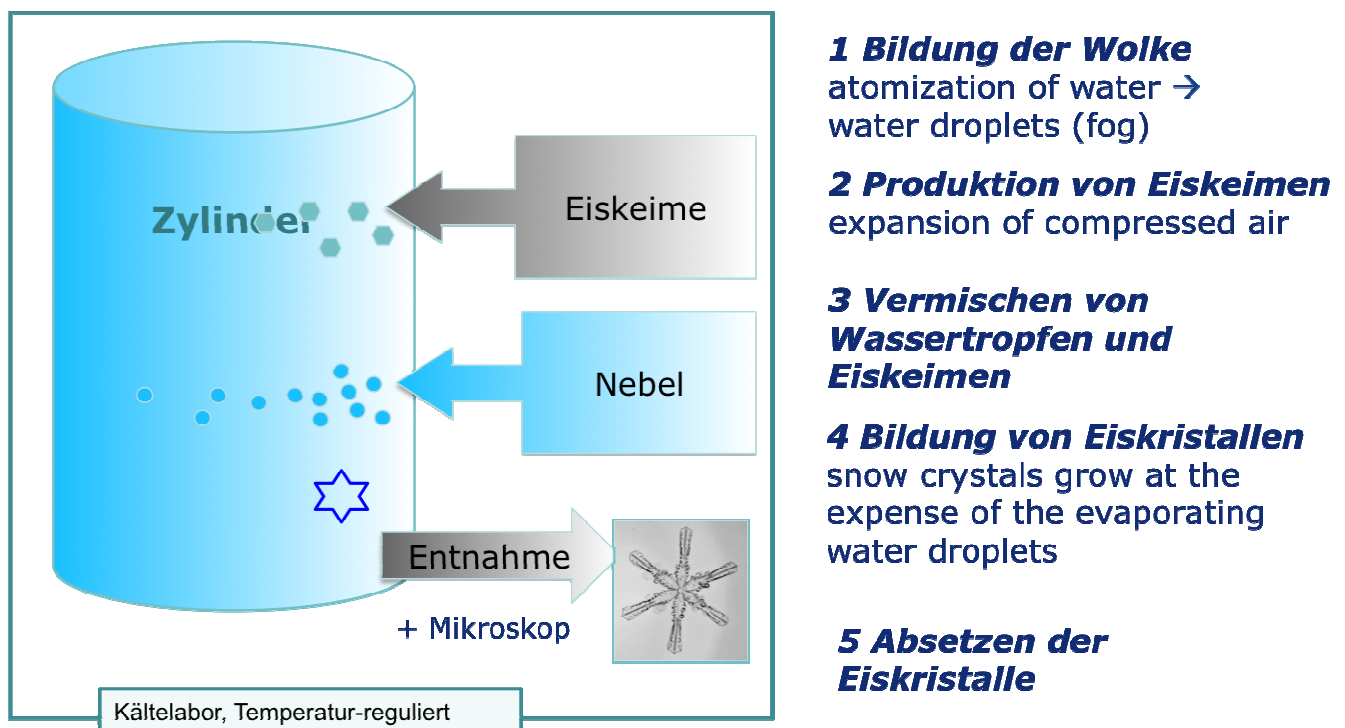


Abbildung 4: Schematischer Versuchsablauf zur Produktion von Schnee in einer künstlichen Wolke.

Der abgelagerte Schnee am Behälterboden wurde mit Hilfe einer rotierenden Scheibe aus dem Behälter ausgetragen und in einem Auffangbehälter gesammelt. Für Fotoaufnahmen mit dem Mikroskop wurde ein Entnahmesystem gebaut. Damit war es möglich, Schneekristalle direkt aus der Wolke, von unterschiedlichen Positionen, auf Objektträgern einzusammeln und fotografisch zu dokumentieren. Die Größe und Konzeption des Versuchsaufbaus war für die Produktion von großen Schneemengen nicht geeignet. Bis zu 11 Liter Schnee pro Stunde wurden mit dem 1m^3 -Behälter produziert.

4.2 Schneekristalle als Funktion der Temperatur

Der wichtigste Parameter zur Charakterisierung der Umgebung, in der Kristalle wachsen, ist die Temperatur. Daher wurde das Kristallwachstum im Reaktor, dh der Kristalltyp, als Funktion der mittleren Behältertemperatur untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die beobachteten Kristallformen (Plättchen, Säulen, Dendriten und diverse Variationen) entsprechen den Kristalltypen, welche in der Literatur bereits ausführlich beschrieben sind (z.B. Magono & Lee 1966, Beckmann & Lacmann et al. 1983, Libbrecht 2001, Bailey & Hallett 2009). Ein ebenso wichtiger Parameter für das Kristallwachstum ist die Wasserdampfübersättigung in der Atmosphäre. Bei den Versuchen im Labor konnte aber lediglich die relative Luftfeuchtigkeit gemessen und die Wasserdampfübersättigung nur abgeschätzt werden.

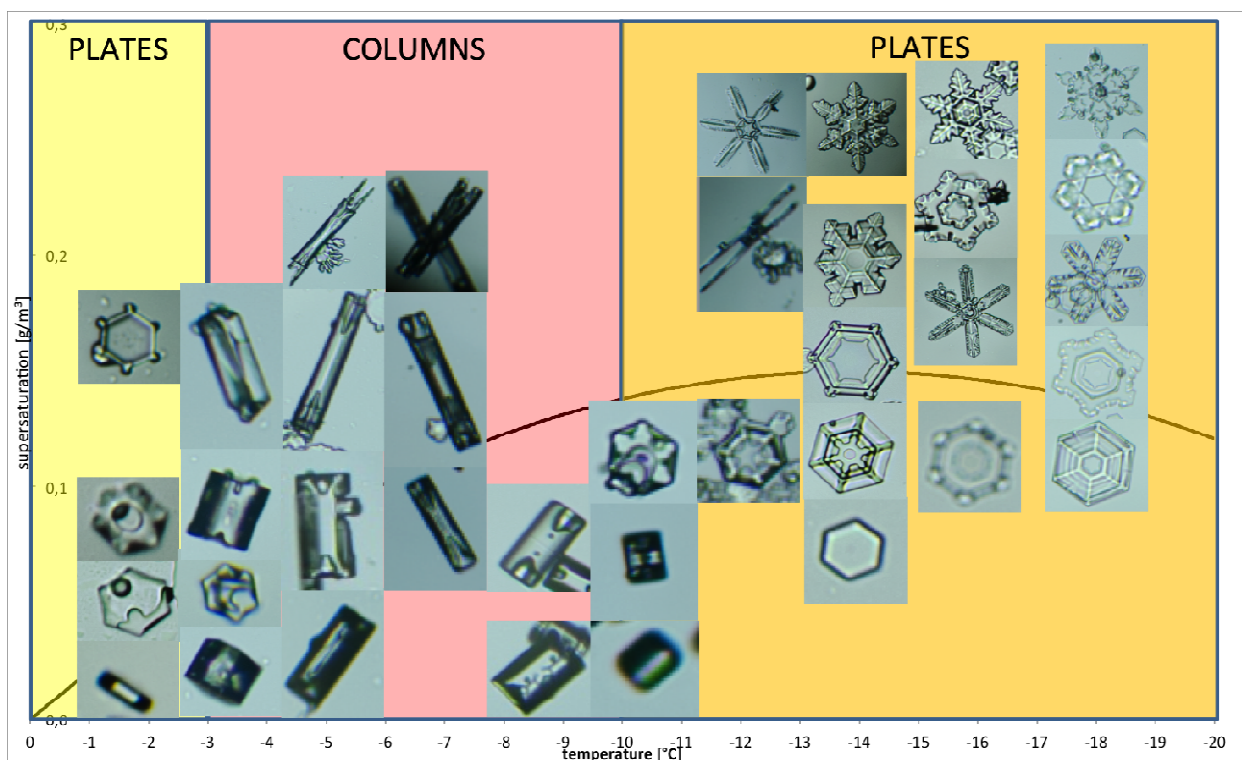


Abbildung 5: Typische Kristallformen produziert in der künstlichen Wolke als Funktion der mittleren Behältertemperatur. Die auf der y-Achse dargestellte Wasserdampfübersättigung gegenüber Eis wurde nicht gemessen, sondern aus der Literatur übernommen und stellt nur eine Annäherung dar.

4.3 Schneedichte als Funktion der Temperatur

Schnee, produziert in der beschriebenen künstlichen Wolke, ist naturähnlich. Seine Eigenschaften weisen daher dieselbe Variabilität auf wie natürlicher Schnee. Eine der wichtigsten Eigenschaften um Schnee zu beschreiben ist seine Dichte. Im Schneereaktor können unterschiedliche Schneekristalle produziert werden. Die Dichte des abgelagerten Schnees wurde nach den Versuchen, mit entsprechend großen Probenentnahmen, ermittelt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit der hier präsentierten Technologie Schnee mit geringer Dichte (60 bis ca. 300kg/m³, mittlere Dichte 140kg/m³) kontinuierlich produziert werden kann. Auch kann die Schneedichte in Abhängigkeit von der Temperatur variiert

werden, wie dies in Abbildung 6 ersichtlich ist. Die Dichte von konventionellem Kunstschnee variiert nur geringfügig mit der Temperatur (siehe Abbildung 7) und ihr Mittelwert ist deutlich höher (ca. 430kg/m³).

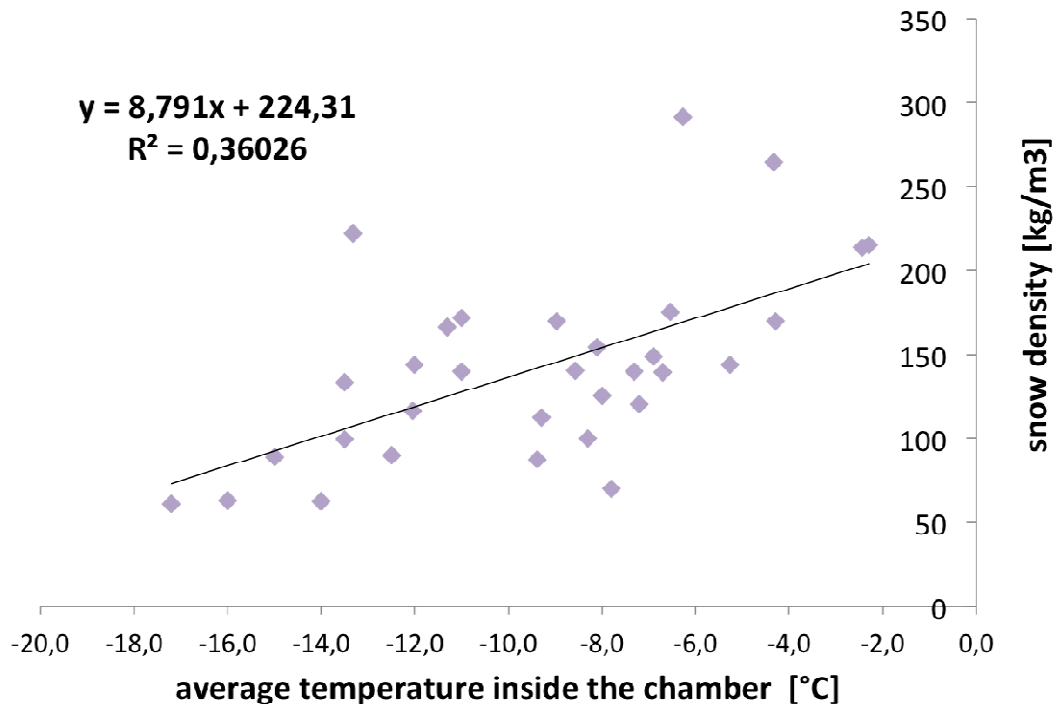


Abbildung 6: Messungen der Schneedichten als Funktion der mittleren Behältertemperatur. Je höher die Temperatur, desto höher ist auch die Dichte des erzeugten Schnees.

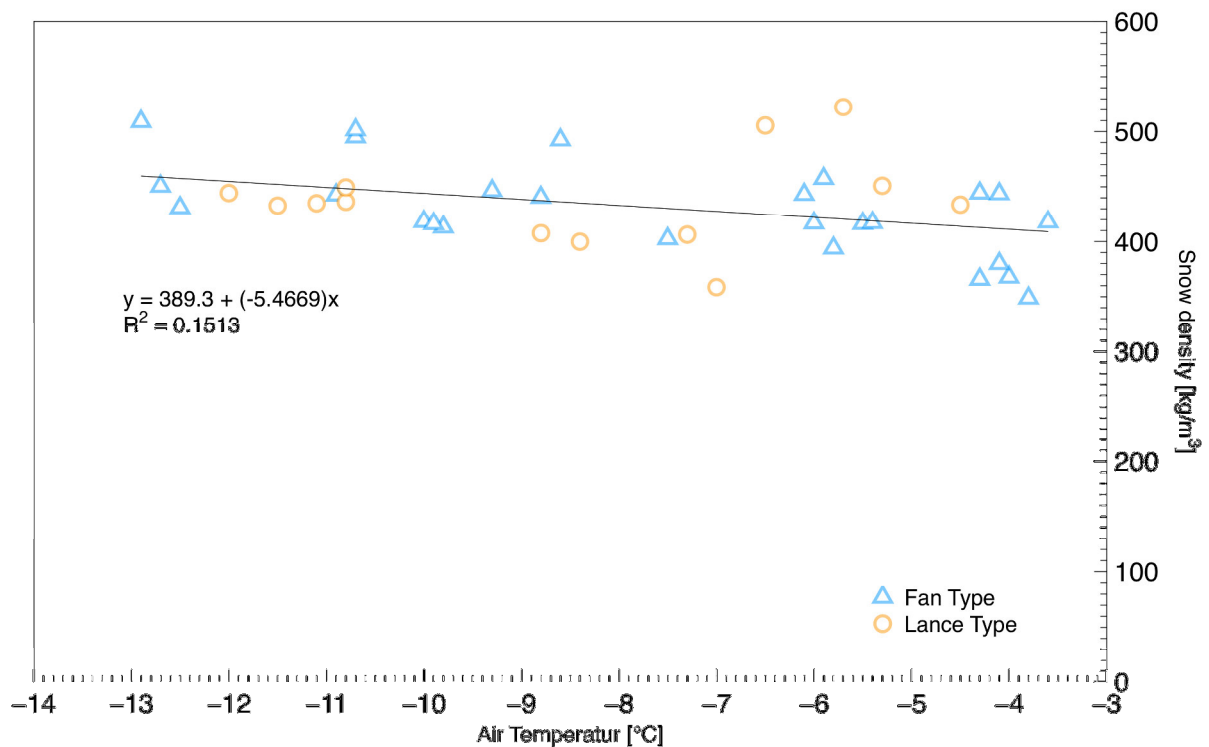


Abbildung 7: Schneedichte als Funktion der Lufttemperatur von konventionellen Schneigeräten, aufgeteilt nach Lanzen- und Propellermaschinen. Die Dichte des Schnees ändert sich mit abnehmender Temperatur nur sehr gering, nimmt dabei aber zu (Quelle: Schneitest 2009, Mountain Manager 02/2009).

4.4 Zeitliche Entwicklung der Schneekristalle

In Abbildung 8 ist die zeitliche Entwicklung der Schneekristalle in der künstlichen Wolke bei zwei verschiedenen Wolkentemperaturen dargestellt. Im ersten Fall, $T(\text{cloud}) = -14^\circ\text{C}$, bilden sich dendritische Kristalle aus, während im zweiten Fall, $T(\text{cloud}) = -6^\circ\text{C}$, säulenförmige Kristalle entstehen. Nach 11 bzw. 7min erreichen die Kristalle ihre maximale Größe. Die zeitliche Entwicklung der Kristalle, sprich die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Größe, ist ein entscheidender Parameter für die Schneeerzeugung, da sie die Produktionsrate wesentlich beeinflusst. Deshalb wurden in einem weiteren Schritt die Bedingungen für ein optimal schnelles Wachstum untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Wachstumszeit wesentlich von der Anzahl der Eiskeime abhängt bzw. von der Bereitstellung unterkühlter Wassertropfchen. Bei gleicher Nebeldichte führt eine geringere Anzahl an Eiskeimen zu einem schnelleren Wachstum (3-4min vs. 8-11min). Wird der Reaktor aber nicht kontinuierlich mit Nebel versorgt, stellt sich eine konstante und relativ geringe Kristallgröße ein ($<0.05\text{mm}$ vs 0.4mm).

00:00:00 → Hinzufügen von Eiskeimen

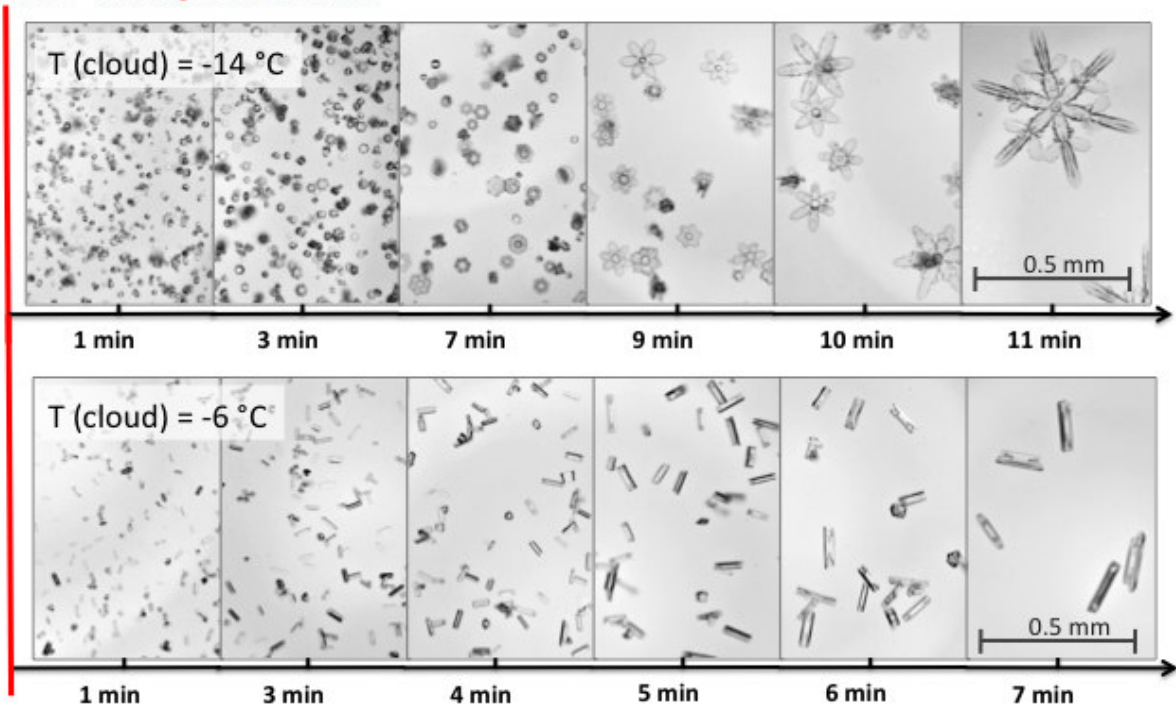


Abbildung 8: Bildfolge des Kristallwachstums bei Plättchen (dendritische Struktur) und Säulen als Funktion der Zeit.

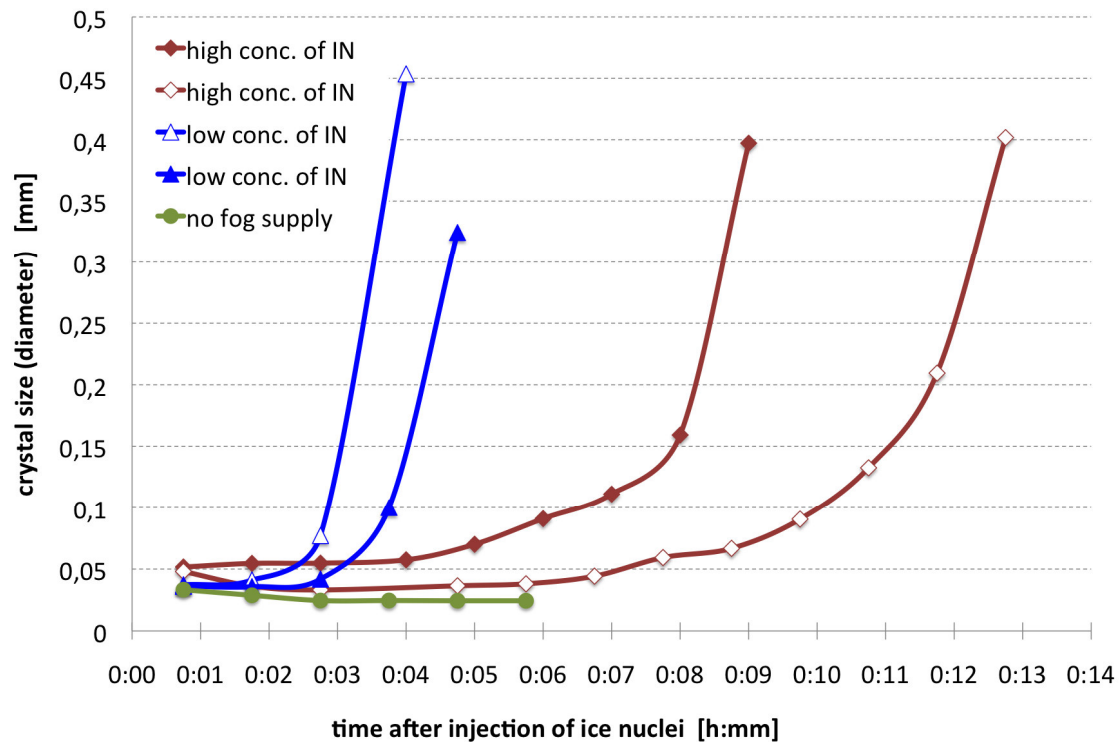


Abbildung 9: Einfluss der Anzahl der Eiskeime auf das Kristallwachstum. Unter den gegebenen Bedingungen im Behälter können mit einer geringeren Konzentrationen von Eiskeimen in kürzerer Zeit größere Eiskristalle produziert werden.

4.5 Modellbeschreibung des Kristallwachstums

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. Die Luftströmung im Behälter wird durch die Navier-Stokes-Gleichungen der Gasdynamik beschrieben. 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.

4.6 Analyse der Strömung mit Hilfe numerischer Verfahren

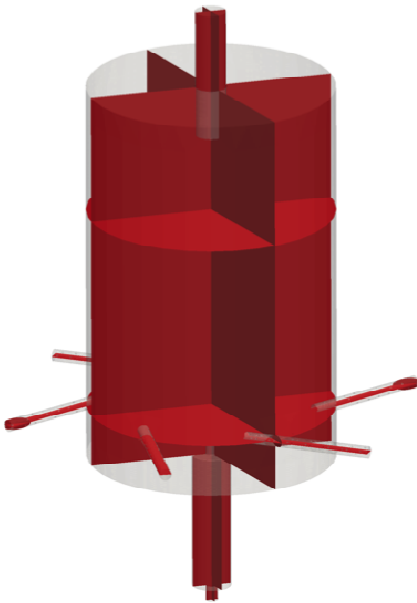


Abbildung 10: Auswerteebenen der Strömungssimulation im Versuchsbehälter, mit den Einlässen nahe am Behälterboden und einem zentralen Auslassrohr.

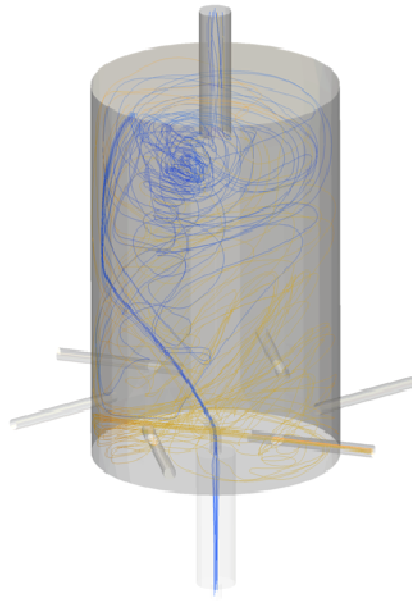


Abbildung 11: Strömungssimulation des Versuchsbehälters mit den resultierenden Strömungslinien.

Es wurde unterschiedliche Fälle der Versuchsanordnung mit Hilfe der numerischen Verfahren im Rahmen einer stationären und transienten Simulation analysiert. Entlang der Auswerteebenen wurden u.a. vertikale und tangentielle Geschwindigkeitskomponenten berechnet. Die Verweildauer im Behälter wurde berechnet sowie eine Dichteverteilung der eingeblasenen Tröpfchen. Basierend auf den Ergebnissen dieser Modellrechnungen wurden im Labor Maßnahmen zur Optimierung der Strömung im Versuchsbehälter getroffen. Augenmerk wurde auf eine Erhöhung der Verweilzeit im Zylinder gelegt, um den suspendierten Kristallen eine möglichst lange Wachstumszeit zu ermöglichen.

4.7 Einbettungsanalyse

Der Energieverbrauch der hier präsentierten Technologie kann durch die noch ausstehende technische Weiterentwicklung nur durch Näherungen mit konventionellen Beschneigungsgeräten verglichen werden. Bei einem fiktiven Marktanteil eines solchen neuen Geräts von 9% ergeben sich laut der Abschätzung 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. Es wird davon ausgegangen, dass ein späteres marktfähiges Produkt nicht sofort als Substitut zu bestehenden Technologien eingesetzt werden kann. Vielmehr wird aus den Gesprächen mit den Skigebietsbetreibern abgeleitet, dass die Technologie überall dort zum Einsatz kommt, wo leichter und weicherer Schnee benötigt wird: Kinderpisten, SnowParks, spezielle Tiefschneepisten und ähnliches.

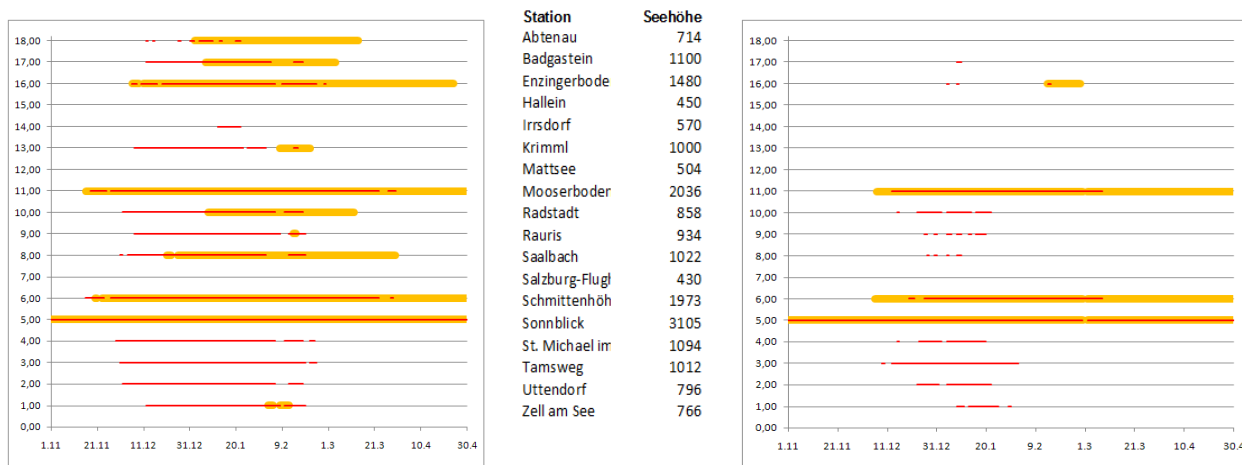


Abbildung 12: Saisonlänge (Temperatur < -2°C; rot; und Schneehöhe > 30cm; orange) für Skigebiete im Bundesland Salzburg: links Periode 1970 – 2000, rechts bei +2°C Erwärmung (Quelle: Daten der ZAMG, Breiling et al. 2008)

5 Ausblick und Empfehlungen

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.
- Optimierung der Wachstumsbedingungen. Empirische Studien zum optimalen Verhältnis von Eiskeimzahl zu Nebeldichte.
- 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 ausgetestet

und vermessen werden. In einem iterativen Prozess sollten durch empirische Tests und Messungen eine Bandbreite optimaler Düsen und Betriebsbedingungen ermittelt werden.

Eine spätere Anwendung der Technologie als Schneeerzeuger in Skigebieten ist auf Grund der bisherigen Projektergebnisse wahrscheinlich, sofern die notwendigen Mittel für die Weiterentwicklung bereitgestellt werden können.

Konventionelle Technologien zur Beschneiung zielen darauf ab, die Bedürfnisse der Skigebietsbetreiber bestmöglich zu erfüllen. Unter den gegebenen technischen sowie wirtschaftlichen Voraussetzungen bedeutet das, extrem hohe Produktionskapazitäten in einem sehr kurzen Zeitraum zur Verfügung zu stellen. Einerseits ergibt sich das auf Grund der Anforderung, die Skisaison an einem vordefinierten Datum zu starten und andererseits durch die vorhandenen meteorologischen Bedingungen im Frühwinter: tiefe Temperaturen sind selten und wenn die Temperaturen passen, muss in dieser Zeit der gesamte Schnee für das Saisonopening bereitgestellt werden. Aus dieser Sicht, und kombiniert mit den extrapolierten Ergebnissen des Projekts, ist davon auszugehen, dass die neue Technologie zur Schneeerzeugung zum potentiellen Markteintritt überall dort zum Einsatz kommt, wo qualitativ hochwertiger und weicher Schnee benötigt wird: Kinderskipisten, Snow parks, Tiefschneepisten und ähnliches.

6 Literaturverzeichnis

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

Houze, R.A. jr. (1993). Cloud Dynamics, Academic Press.

Kalchgruber, M. (2009). Schneitest 2009. Vol. 02, Mountain Manager, EuBuCo Verlag GmbH

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)

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

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

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.

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.

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

Rogers, R.R., Yau, M.K. (1989). *A Short Course in Cloud Physics*, Pergamon Press, 3rd ed..

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.

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.

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

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*.

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

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.

8 Kontaktdaten

Michael Bacher, Dipl.Ing.

Institut für Alpine Naturgefahren / Universität für Bodenkultur Wien

Peter Jordan Straße 82

A-1190 Wien

Tel: +43 1 47654 4350

Fax: +43 1 47654 4390

michael.bacher@boku.ac.at

<http://www.boku.ac.at/ian>

Technische Universität Wien (Forschungszentrum „Energie und Umwelt“ / Kooperationszentrum TTL)

Siemens AG Österreich

IMPRESSUM

Verfasser

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter Jordan Straß 82, A-1190 Wien
+43 1 47654 4350
+43 1 47654 4390
michael.bacher@boku.ac.at
www.boku.ac.at/ian

Projektpartner

Technische Universität Wien
(Forschungszentrum „Energie und Umwelt“
/ Kooperationszentrum TTL)

Siemens AG Österreich

AutorInnen

Universität für Bodenkultur Wien
Bacher Michael
Burkart Julia
Sergey Sokratov

Technische Universität Wien

Breiling Meinhard
Fred G. Best
Harasek Michael
Siegmann Tanja

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch
die Forschungsförderungsgesellschaft
(FFG) sind für die Weiternutzung der hier
enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH