



Mathias Schreink, BSc.

# **Konstruktion und experimentelle Untersuchungen einer Schneekanone für den privaten Gebrauch**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Raimund Almbauer  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Patrick Pertl  
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Mai 2017

---



Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder



# Inhaltsverzeichnis

<b>FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>IV</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>V</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>3</b>
2.1 DIE ENTSTEHUNG VON NATURSCHNEE .....	3
2.1.1 <i>Eiskristall</i> .....	4
2.1.2 <i>Schneekristall</i> .....	5
2.1.3 <i>Schneeflocke</i> .....	7
2.2 DIE TECHNISCHE SCHNEEERZEUGUNG .....	8
2.2.1 <i>Funktionsprinzip von Schneeerzeugern</i> .....	11
2.3 EXISTIERENDE ANLAGEN ZUR SCHNEEERZEUGUNG .....	14
2.3.1 <i>Die Schneekanone</i> .....	15
2.3.2 <i>Die Schneilanze</i> .....	18
<b>3 KONZEPTIONIERUNG.....</b>	<b>20</b>
3.1 ANFORDERUNGEN AN DEN PROTOTYP UND SYSTEMVORAUSSETZUNGEN .....	20
3.1.1 <i>Systemvoraussetzungen</i> .....	20
3.1.2 <i>Anforderungen</i> .....	21
3.2 THERMODYNAMISCHE VORAUSBERECHNUNG .....	22
3.3 EIGENSCHAFTEN UND KONSTRUKTIONSMERKMALE DES PROTOTYPS .....	23
<b>4 AUSFÜHRUNG UND KONSTRUKTION .....</b>	<b>29</b>
4.1 AUFBAU DES PROTOTYPS .....	29
4.1.1 <i>Schneekanonenkörper und Aufhängung</i> .....	29
4.1.2 <i>Messtechnik und Verrohrung</i> .....	40
4.1.3 <i>Verbindungs konstruktion der Schneekanone</i> .....	43
4.1.4 <i>Weitere Konstruktionselemente</i> .....	46
4.2 MESSTECHNIK .....	47
4.3 PRODUKTDATEN DER ZUGEKAUFTEN KOMPONENTEN .....	50
4.4 ZUSAMMENBAU UND INBETRIEBNAHME.....	51
<b>5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>57</b>
5.1 VERSUCHSBEDINGUNGEN.....	57
5.2 FUNKTIONSTEST AM SCHÖCKL .....	59
5.3 TESTVERSUCH IN GRAZ.....	63
5.4 ERGEBNISSE .....	68
5.5 VERBESSERUNGSPOTENTIAL .....	70
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>71</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>73</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>75</b>
<b>A.ANHANG .....</b>	<b>77</b>
A.1 LASTENHEFT .....	77

## Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
$p$	bar, Pa	Druck
$p_i$	bar, Pa	Partialdruck der Komponente i
$p_d$	bar	Dampfdruck
$p_{d'}$	bar	Dampfdruck bei Sättigung
$P$	(k)W	Leistung
$t$	°C	Celsius-Temperatur
$U$	V	elektrische Spannung
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$x = m_d/m_l$	–	absolute Feuchte

### Griechische Formelzeichen

$\varphi = p_d/p_{d'}$	–	relative Feuchte
------------------------	---	------------------

### Weitere Indices und Abkürzungen

d	Dampf
gem	Gemisch
i	Laufvariable (1, 2, ..., k), innere
k	Kilo (10 <sup>3</sup> ); Anzahl der Komponenten
l	flüssig (liquid), Luft, Längen
L	Luft
max	maximal
min	minimal
N	Normalbedingungen
r	reduziert
rel	relativ

In Anlehnung an DIN 1304-1, DIN 1345, DIN 13 345 und ISO 80 0000-5

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Mathias Schreink

Graz, Mai 2017

## Zusammenfassung

Die technische Schneeerzeugung ist in den Schigebieten bereits gängige Praxis. Es stellt sich daher die Frage, ob dieses System in verkleinerter Form auch im privaten Bereich Anwendung finden kann und welche Einflussfaktoren für eine funktionstüchtige Auslegung entscheidend sind. Am Markt existieren bereits sogenannte Heimbeschneiungsanlagen. Allerdings handelt es sich in allen bekannten Fällen um verkleinerte Schneilanzen. Miniaturisierte Propellerkanonen sind derzeit nicht am Markt erhältlich. Laut Eigenstudien wird dieser Art von Beschneiungsanlagen aufgrund der ansprechenderen Optik jedoch ein höheres Kundenpotential zugesagt. Als Zielgruppe kämen besonders Familien mit Kindern, die Gastronomie sowie auch Unternehmen im Eventbereich infrage. Ziel dieser Arbeit ist ein funktionsfähiger Prototyp einer miniaturisierten Propellerkanone. Die Entwicklungsphasen gliedern sich demnach in Auslegung und Konstruktion, Prototypenbau sowie experimentelle Funktionstests. Im Hinblick auf das endgültige Ziel eines serienreifen Produkts dient diese Arbeit somit als ein erster Schritt.

In einem Lastenheft wurden zu Beginn Anforderungen an das Produkt definiert. Wesentlich dabei ist die Funktionalität der miniaturisierten Propellerkanone mit den Gegebenheiten eines gewöhnlichen Haushalts, im Speziellen bezüglich der Wasser- und Stromversorgung. In Kombination mit weiteren Anforderungen und Randbedingungen folgten erste Überlegungen zur Vorauslegung zentraler Komponenten. Für den Gesamtaufbau wurden die Konstruktionsmerkmale einer Schneekanone analysiert, an die Anforderungen des Prototyps angepasst und konstruktiv mit Hilfe eines CAD-Programms umgesetzt. Schrittweise entstand so ein dreidimensionales Modell der verkleinerten Schneekanone. Die abweichenden Rahmenbedingungen wie zum Beispiel höhere Wassertemperaturen und geringere Wasserdurchsätze forderten gezielte Anpassungen an die Konstruktion im Vergleich zu konventionellen Propellerkanonen. Nach abgeschlossener Fertigung und dem Prototypenbau erfolgten erste experimentelle Versuche.

Neben konstruktiven Anpassungen wurden infolge der gewonnenen Erkenntnisse aus den Praxistests weitere funktionelle Änderungen direkt am Prototyp durchgeführt. Aufgrund dieser Verbesserungsmaßnahmen gelang auch die erstmalige technische Schneeerzeugung. Es konnte somit gezeigt werden, dass eine Schneeproduktion mit einer miniaturisierten Schneekanone unter den gegebenen Rahmenbedingungen funktioniert sowie die zuvor getätigten Berechnungen und Abschätzungen bezüglich der Konstruktion und Auslegung zutreffend waren. Weitere Verbesserungen am Prototyp, besonders hinsichtlich Düsenkonfiguration und Wasserdruck, sind geplant, um einerseits die Schneequalität, andererseits die produzierte Schneemenge pro Zeiteinheit noch zu steigern. Beabsichtigt werden in weiterer Folge abschließende Optimierungsmaßnahmen und vor allem Praxistests, um schlussendlich die Voraussetzungen für ein Serienprodukt zu schaffen.

## Abstract

Technical snowmaking is already common practice in ski resorts. Therefore the question arises if this system also can be applied in a downsized form for private use, and which influencing factors are decisive for a functional design. So-called home-snowmakers are already available on the market. However, in all known cases, these are small snow lances. Miniaturized fan guns are currently not available on the market. According to own studies, this type of snowmaking equipment should offer a higher customer potential due to more attractive design. Target groups could be families, the catering sector as well as companies in the event management. The aim of this paper is the design of a functional miniaturized prototype based on a fan gun. The development phases can be separated into layout and design, prototyping and experimental tests. Regarding to the final goal of a series product, this work serves as a first step.

In a target specification sheet, product requirements have been defined. The miniaturized fan gun should operate based on boundaries of an ordinary household, in particular regarding water and power supply. These different conditions, as higher water temperatures and lower water flow rates required specific adjustments to the design compared to conventional fan guns. Further, basic design features of a conventional fan gun have also been analyzed and implemented in the prototype design. After prototyping experimental tests were carried out.

Apart from design adjustments, also functional changes were made on the prototype based on results and findings during the experimental tests. Due to these optimization measures, a successful snow production was achieved and it could be shown that a snow production with a miniaturized fan gun is possible under given ambient conditions. Hence, previous thermodynamic calculations in the pre-layout phase could be confirmed. Further, optimizations to improve snow quality and snow production are also planned. Hereby, the focus is laid on the nozzle configuration and the water pressure level. In order to create requirements for a series production optimization measures and additional practical tests have to be carried out.



# 1 Einleitung

Für die Aufrechterhaltung des Betriebs ist in Schigebieten der Einsatz von technischen Schneeerzeugern nicht mehr wegzudenken. Bleibt der natürliche Niederschlag in Form von Schnee aus, muss mit den Beschneigungsgeräten nachgeholfen werden. Dank modernster Anlagen genügen einige kalte Tage am Beginn des Winters, um die notwendige Schneunterlage zu erzeugen und damit den Pistenbetrieb für die restliche Saison zu sichern.

Der ausbleibende Niederschlag betrifft aber auch den privaten Bereich. Trotz der oft ausreichend tiefen Temperaturen mangelt es zunehmend an der weißen Winterlandschaft. Egal ob der Schnee nur einen rein optischen Zweck erfüllen soll oder zum Schlittenfahren genutzt wird, würden sich diesen wahrscheinlich viele Schneebegeisterte auch für ihr Eigenheim wünschen. Genau diese Vermutung führte zu der Idee, technische Schneeerzeuger auch im privaten Bereich einzusetzen.

Ein externer Auftrag zu dieser Thematik war dabei der Anstoß für diese Masterarbeit. Im Rahmen einer durchgeführten Bachelorarbeit war bereits eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt worden. Aufbauend auf diesem Wissen stellt sich nun die Frage, ob es möglich ist, eine Miniaturschneekanone zu bauen und welche Einflussfaktoren bei einer funktionstüchtigen Auslegung entscheidend sind. Am Markt existieren bereits Heimbeschneigungsanlagen, allerdings handelt es sich in allen bekannten Fällen um Schneilanzen. Um sich von diesen Geräten, vor allem in Bezug auf marketingspezifische Aspekte, abzugrenzen, war das Ziel, die Ausführung als klassische Propellerkanone (welche vorwiegend in den Schigebieten Einsatz findet) mit den dazugehörigen Merkmalen zu gestalten. Da eine Propellerkanone im eigenen Garten auch optisch ansprechender ist als eine Schneilanze (besonders für Kinder), sollte dies einen zusätzlichen Vorteil gegenüber den bereits am Markt befindlichen Heimbeschneigungsanlagen darstellen. Die Rahmenbedingungen wurden in einem Lastenheft im Vorhinein definiert. Desweiteren sollte der entstehende Prototyp mit ausreichend Messtechnik ausgestattet sein, damit bei der Schneeproduktion Messdaten (Durchsatz, Druck, Temperatur etc.) erfasst werden können. Diese sollen in weiterer Folge dazu dienen, Verbesserungsmaßnahmen setzen zu können und auch in späteren Entwicklungsphasen die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Als endgültiges Ziel seitens des Auftraggebers sind die Markteinführung und der kommerzielle Vertrieb angestrebt. Um das zu erreichen, dient diese Arbeit als ein erster Schritt in der Entwicklungsphase einer miniaturisierten Propellerkanone für den Hausgebrauch. Anhand der Erkenntnisse, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden, soll die Weiterentwicklung und Optimierung stattfinden, um eine Serienproduktion zu ermöglichen.

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in sechs Kapitel, die gleichzeitig auch dem chronologischen Ablauf der Bearbeitung der Aufgabenstellung entsprechen. Nachfolgend auf diese kurze Einleitung folgt die Behandlung der theoretischen Grundlagen zur natürlichen Schneeentstehung und der technischen Schneeproduktion. Dabei wird auch auf die Funktionsweise der beiden gängigsten Schneeerzeuger (Schneilanze und Propellerkanone) genauer eingegangen. Diese Grundlagen stellen die Basis für das weitere Vorgehen dar. Im Kapitel „Konzeptionierung“ werden die Anforderungen und Rahmenbedingungen für den Prototyp aus dem Lastenheft definiert. Auch die angestellten Überlegungen zu den Ausführungen des Prototyps und den wesentlichen Funktionen sind an dieser Stelle dokumentiert. Besonderes Augenmerk wird sowohl auf die Variationsmöglichkeit von verschiedenen Einstellungen am Prototyp, als auch auf eine leichte Austauschbarkeit der einzelnen Komponenten gelegt. Die konstruktive Umsetzung der theoretischen Überlegungen erfolgt im darauffolgenden Kapitel. Hier werden die einzelnen Baugruppen näher betrachtet

und es wird auf die Besonderheiten eingegangen. Mit dem fertig zusammengestellten Prototyp wurden ferner Versuche durchgeführt, die im Kapitel „Experimentelle Untersuchungen“ erläutert werden. Aus den Erkenntnissen folgten kleinere Verbesserungen, bis erstmals eine Schneeproduktion gelang. Abgeschlossen wird diese schriftliche Arbeit mit einem Ausblick auf die mögliche weitere Entwicklung des Prototyps.

## 2 Theoretische Grundlagen

Um die Funktionsweise eines Schneerzeugers zu verstehen, ist es wichtig, mit den Grundkenntnissen der Schneeentstehung vertraut zu sein. Es folgt daher eine Erläuterung der Abläufe, die bei der natürlichen Entstehung von Schnee auftreten. Danach wird die Umsetzung dieser Grundlagen in der technischen Schneeerzeugung betrachtet, gefolgt von einem Überblick über konventionelle Schneerzeuger und deren Funktionsweise, wie sie in den Schigebieten eingesetzt werden.

### 2.1 Die Entstehung von Naturschnee

Zunächst gilt es auf den Unterschied zwischen Schneekristallen und gefrorenen Wassertropfen hinzuweisen. Das Wachstum von Schneekristallen in der Natur erfolgt durch Kondensation von Wasser aus der Gasphase und nicht durch das Gefrieren von Wassertropfen. Herrscht eine Luftfeuchtigkeit von 100 % und eine Temperatur von unter 0 °C, lagern sich Wassermoleküle an einem sogenannten Kondensationskeim an (Nukleation) und wachsen dann durch weiteres Anlagern von Wasserdampf langsam zu einem Schneekristall heran. Während dieses Prozesses bewegen sich die Schneekristalle durch Strömungen in höheren Luftschichten auf und ab, bis sie schlussendlich eine gewisse Masse erreicht haben und zu Boden sinken. Je nach Umgebungsbedingungen kommt es zur Ausbildung der unterschiedlichen Formen von Schneekristallen, die sich anschließend zu einer Schneeflocke zusammengruppierten. (vgl. [8], [4])

Auf diesen Prozess wird nun etwas detaillierter eingegangen. Die Entstehung von Schnee lässt sich im Wesentlichen in drei Stadien unterteilen (siehe Abbildung 2-1), die in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben werden.

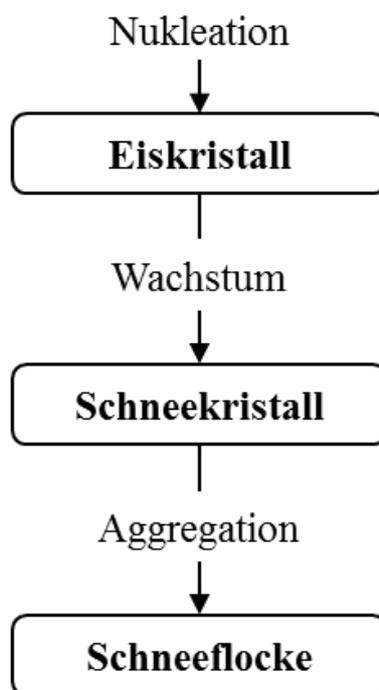


Abbildung 2-1: Stadien der Schneeflockenbildung, modifiziert [5]

### 2.1.1 Eiskristall

Die Eiskristallbildung erfolgt durch Nukleation, wobei man zwischen heterogener und homogener Nukleation unterscheidet. Unter Nukleation, oder auch Keimbildung genannt, versteht man die Entstehung von Kristallisationskeimen (Eiskeimen), an die sich anschließend feinste Tröpfchen von unterkühltem Wasser anlagern und so Eiskristalle entstehen. Diese Tröpfchen, auch Wolkentröpfchen genannt, entstehen, wenn die relative Luftfeuchtigkeit zumindest 100 % beträgt und in weiterer Folge eine Anlagerung von Wasserdampfmolekülen an vorhandene Aerosole (Kondensationskörner) erfolgt. (vgl. [5])

Hofstätter [5] beschreibt diesen Vorgang wie folgt:

Zu einem Gefrieren eines solchen Wolkentröpfchens kommt es in der Atmosphäre unter natürlichen Bedingungen, allerdings erst bei relativ tiefen Temperaturen zwischen  $-20^{\circ}$  und  $-5^{\circ}\text{C}$ . Die Entstehungstemperatur ist dabei ganz wesentlich von der Anzahl der vorhandenen Eiskeime sowie von deren Beschaffenheit (Form, Oberflächenstruktur, elektrisches Feld und chemische Zusammensetzung) abhängig. Bei einer typischen Gefriertemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$ , eignet sich nur etwa eines von  $10^9$  Aerosolen als Eiskeim. Solche Teilchen weisen eine typische Größe von 0.1 bis  $2\ \mu\text{m}$  auf. Quellen für diese sind im Wesentlichen vom Wind verfrachtete Bodenteilchen (Aluminium-Silikat-Tonminerale) sowie kleinste organische Pflanzenteile [...]. Bei noch tieferen Temperaturen sind immer mehr Aerosole als Eiskeime geeignet, zwischen  $-10^{\circ}$  und  $-30^{\circ}\text{C}$  nimmt je  $4^{\circ}$  Temperaturabnahme die Anzahl der Eiskeimpartikel um den Faktor 10 zu [...]. Diese Art der initialen Eiskristallbildung wird als heterogene Nukleation bezeichnet, da das Vorhandensein eines passenden Eiskeimes zur Auslösung des Gefriervorgangs notwendig ist. Im Gegensatz dazu wäre die homogene Nukleation zu nennen, bei der sich jeweils sechs Wassermoleküle direkt aus der Gasphase zu einem ebenen, sechseckigen Gebilde anordnen (hexagonale Form) und so selbst die Ausgangsstruktur für das weitere Kristallwachstum bilden. Diese Art der Nukleation ist allerdings erst bei sehr tiefen Temperaturen von unter  $-35^{\circ}\text{C}$  zu beobachten [...]. [5]

Innerhalb der heterogenen Nukleation gibt es laut Hofstätter [5] vier auftretende Mechanismen, die in Abbildung 2-2 dargestellt sind:

- Immersion-freezing (Immersionsgefrieren):  
Ein Eiskeim liegt in einem Wolkentropfen, welcher selbst unter  $0^{\circ}\text{C}$  abkühlt und dann gefriert. Der Gefrierzeitpunkt wird alleine durch die Natur des Eiskeims bestimmt.
- Condensation-freezing (Kondensatgefrieren):  
Wasserdampf kondensiert auf der Oberfläche eines Eisteilchens und beginnt danach zu gefrieren.
- Contact-nucleation (Kontakt-Nukleation):  
Ein Eiskeim kommt mit der Oberfläche eines Wassertropfens in Berührung und initialisiert den Gefrierprozess.
- Deposition (Deposition/ Ablagerung):  
Wasserdampf beginnt sich auf einem Eiskeim molekular anzulagern und zu gefrieren. Es bildet sich ein hauchdünner Eisüberzug durch direkte Resublimation (ohne Wasserphase).

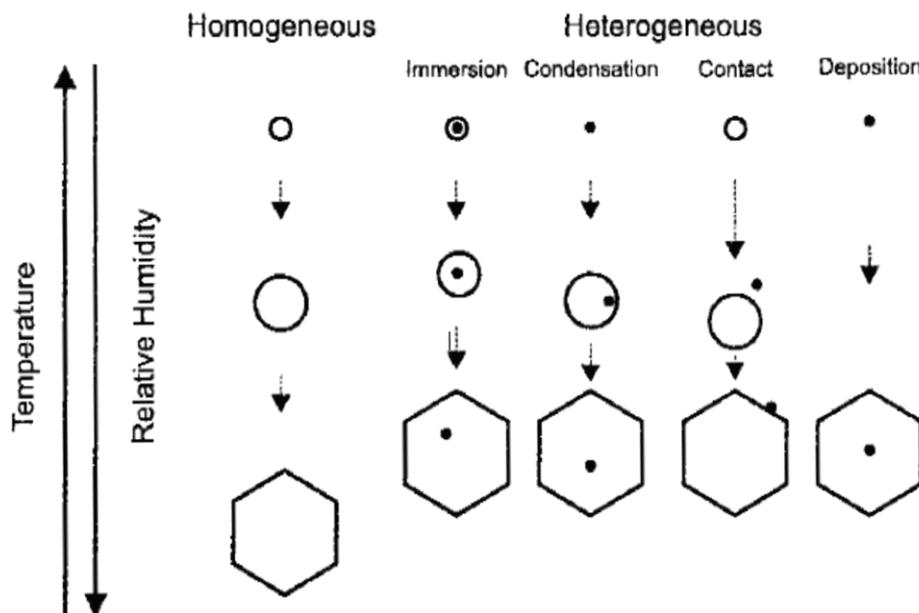


Abbildung 2-2: Homogene und heterogene Nukleation [21]

### 2.1.2 Schneekristall

Sind nun Eiskristalle vorhanden, lagert sich mit hoher Geschwindigkeit Wasserdampf an diesen an. Der Grund dafür lässt sich im Unterschied zwischen dem Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis erklären (Abbildung 2-3).

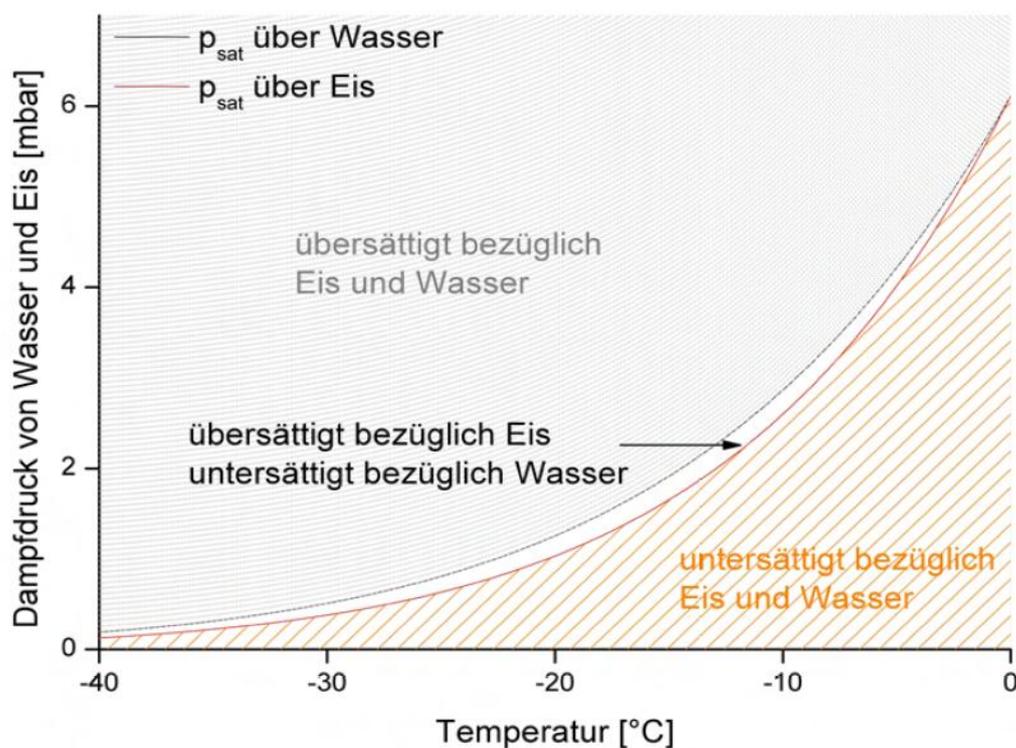


Abbildung 2-3: Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis [8]

Oberhalb beider Kurven ist die Luft bezüglich der flüssigen und der festen Phase übersättigt,

das heißt, es tritt sowohl Kondensation als auch Resublimation auf. Unterhalb der beiden Kurven hingegen ist die Luft ungesättigt und somit nimmt die Feuchtigkeit in der Luft durch Sieden und Sublimation zu. Zwischen den beiden Kurven ist die Luft bezüglich Eis übersättigt, bezüglich Wasser aber ungesättigt. Das heißt, dass die Wassermoleküle von der Wasseroberfläche verdampfen, um sich anschließend auf dem Eis abzulagern. Herrscht in einer Wolke also dieser Wasserdampfdruck, so verliert sie die Wassertropfen an die wachsenden Eiskristalle. [8]

Bedingt durch die schnelle Anlagerung von Wasserdampf, gewinnt der Eiskristall an Masse und Volumen und es bildet sich ein Schneekristall (siehe Abbildung 2-4).

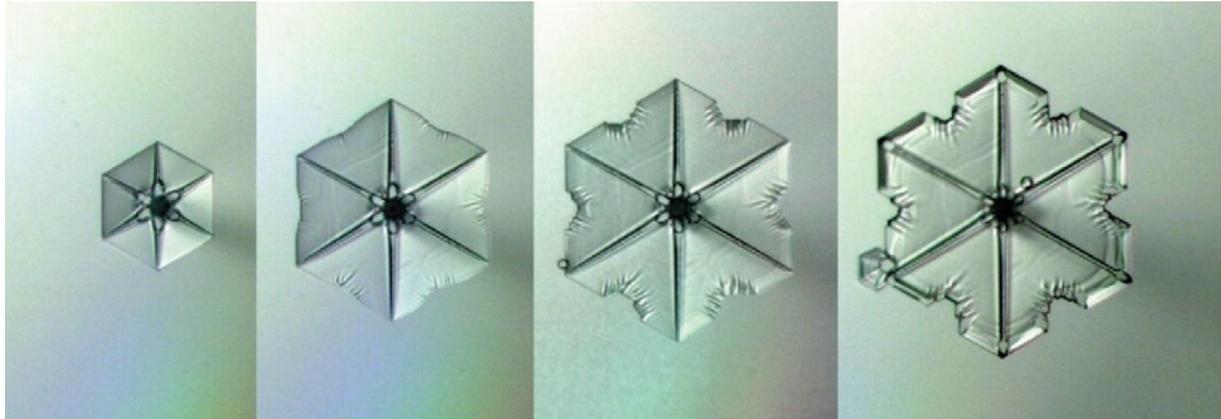


Abbildung 2-4: Wachstumsfotosequenz eines Schneekristalls [7]

Zusätzlich kann der sogenannte „Ventilation effect“ das Wachstum stark beeinflussen. Von diesem Effekt spricht man, wenn eine Luftbewegung über dem Schneekristall erfolgt. Dadurch werden viel mehr Wassermoleküle mit dem wachsenden Kristall in Kontakt gebracht, was wiederum das Wachstum stark beschleunigt. (vgl. [8])

### **Stammformen**

Die unterschiedlichen Arten und Formen der Schneekristalle sind im Morphologiediagramm in Abbildung 2-5 ersichtlich.

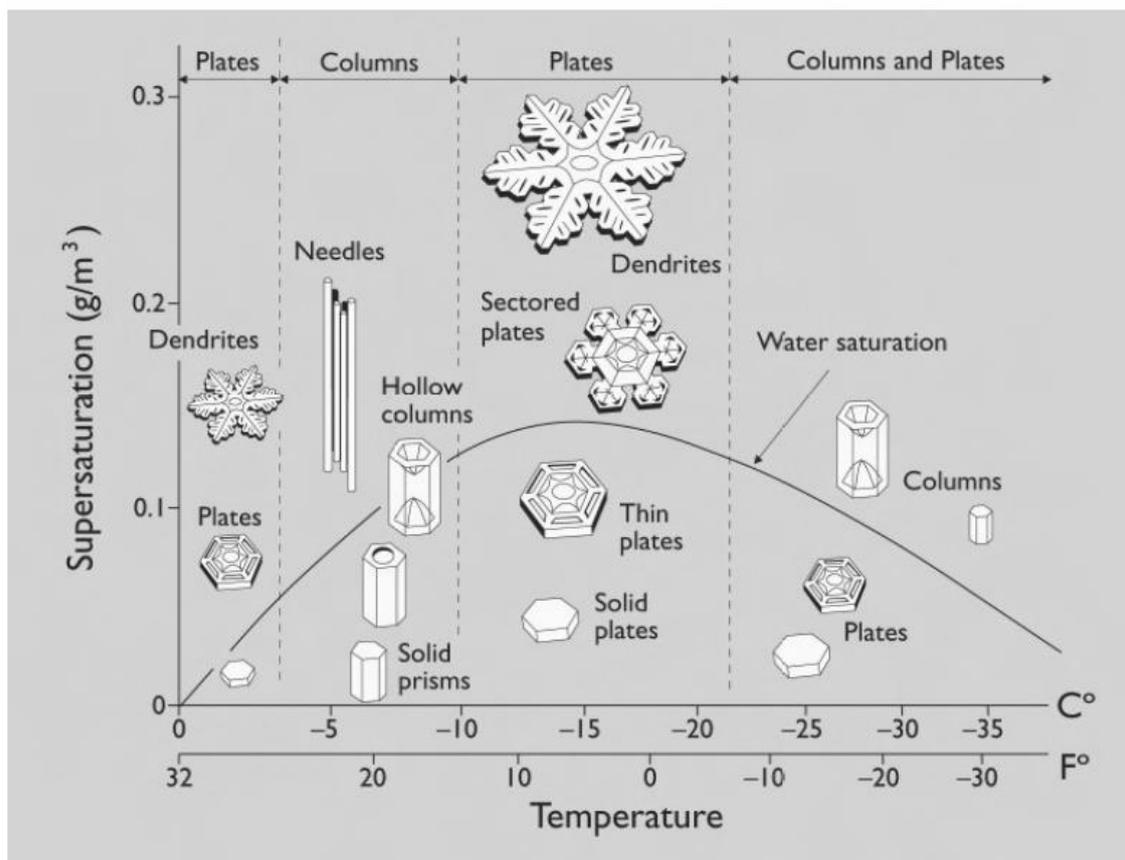


Abbildung 2-5: Morphologiediagramm von Schnee [8]

Grundsätzlich besitzt ein Schneekristall eine sechseckige (hexagonale) Struktur. Diese ist auf das Kristallgitter von Eis zurückzuführen, welches bereits auf kleinster Ebene in einer hexagonalen Form ausgebildet ist. Die Form der Schneekristalle hängt im Wesentlichen von der Temperatur ab, allerdings spielt auch die Übersättigung („supersaturation“) der Luft gegenüber Eis eine Rolle. Bei Temperaturen von  $-2\text{ °C}$  entstehen vorwiegend Platten, wird es kälter, bilden sich um  $-5\text{ °C}$  eher Becherkristalle. Ein weiteres Absinken der Temperatur bewirkt, dass sich um  $-15\text{ °C}$  wiederum Platten bilden und bei noch tieferen Temperaturen um die  $-25\text{ °C}$  formen sich Platten und Becherkristalle. Die Übersättigung beeinflusst vor allem die Struktur der Schneekristalle stark. Sie gibt vor, ob sich Prismen oder Nadeln beziehungsweise Plättchen oder Dendriten bilden. So formen sich bei hoher Übersättigung und dem damit verbundenen schnellen Wachstum die Becherkristalle zu Nadeln oder die Platten zu komplexen Dendriten. Bemerkenswert an der Morphologie des Schnees ist, dass nur durch geringe Änderung der Temperatur um wenige Grad Celsius komplett unterschiedliche Formen an Schneekristallen entstehen. Die durchschnittliche Zeit für das Wachstum, bei dem sich in der freien Atmosphäre aus einem Eiskristall ein Schneekristall bildet, beträgt etwa zehn Minuten. Nach dieser Zeit besitzt der Schneekristall bereits eine Größe von circa 1 mm. (vgl. [8])

### 2.1.3 Schneeflocke

Die „Aggregation“ ist der letzte Prozessschritt in der Schneentstehung und führt zur Schneeflocke. Hierzu gruppieren sich mehrere einzelne Schneekristalle während des Flugs beziehungsweise Falls zusammen. Besonders begünstigt wird der Prozess, wenn sich bei

hoher Luftfeuchtigkeit gleichzeitig die Temperaturen am Boden knapp unter dem Gefrierpunkt befinden. Dann verkleben die Schneekristalle in der Luft und formen stetig größer werdende Schneeflocken. Ist es jedoch kälter, fällt der Schnee zunehmend nur mehr in kleinen Schneekristallen zu Boden, da gleichzeitig auch die Luftfeuchtigkeit abnimmt. (vgl. [2])

Die Effizienz dieses Anlagerungs- und Haftprozesses wird durch das Produkt aus Adhäsion- und Kollisionseffizienz [...] und die Schneekristallform sowie deren elektrisches Feld bestimmt. Prozesse, die zu einer Adhäsion führen, sind vielfältig und können zum Beispiel ein Verzahnen der Kristalle oder das Antauen und anschließende Anfrieren an einem Zweitkristall sein. [5]

## 2.2 Die technische Schneeerzeugung

Die umgangssprachliche Bezeichnung von „Kunstschnee“ für maschinell hergestellten Schnee wurde innerhalb der Branche mittlerweile durch den Begriff „technischer Schnee“ ersetzt. Da der Schnee nichts „Künstliches“ an sich hat, sondern nur mit technischen Hilfsmitteln erzeugt wird, nahm man von dieser Bezeichnung Abstand.

Die technische Schneeerzeugung funktioniert in ihren Abläufen nur bedingt ähnlich wie die Entstehung des natürlichen Schnees und findet in wesentlich kürzerer Zeit statt. Während in der Natur der Schnee- beziehungsweise Eiskristall über mehrere Minuten langsam durch Anlagerung von Wasserdampf entstehen kann, muss dieses Prinzip bei der technischen Schneeerzeugung innerhalb weniger Sekunden ablaufen. Es erfolgt allerdings kein Wachstum durch das Anlagern von Wasserdampf, da dies viel zu lange dauern würde. Viel mehr werden Eiskeime mit kleinsten Wassertröpfchen in Kontakt gebracht, um so schnell an Masse zu gewinnen. Auf den Ablauf dieses Prozesses sowie auf die Funktionen und Komponenten eines Schneeerzeugers wird in Kapitel 2.2.1 genauer eingegangen.

Zur Erzeugung von technischem Schnee wird im Wesentlichen Wasser unter Druck in kleinen Düsen zerstäubt und in die Umgebungsluft ausgebracht. Eine weitere Düse zerstäubt ein sehr feines Wasser-Luftgemisch, in dem die Eiskeime entstehen. Ist die Lufttemperatur gering genug, gefriert der Großteil des ausgebrachten Wassers zu Eiskügelchen. Ein Teil des Wassers kann verdunsten oder auch in flüssiger Form zu Boden fallen. Durch die Verdunstung an der Oberfläche der Wassertröpfchen in die ungesättigte trockene Umgebungsluft folgt eine weitere Abkühlung des Wassers, was den Gefrierprozess zusätzlich begünstigt. Der Verdunstungsprozess und die verdunstete Wassermenge an sich sind vom Sättigungsdefizit der Luft, der vorhandenen Wassermenge und der Zeit, in der eine Verdunstung möglich ist, abhängig. Im Wesentlichen kann man aber für die Produktion von technischem Schnee folgende Aussage treffen: Je trockener und kälter die umgebende Luft ist, umso mehr technischer Schnee kann in einem Zeitintervall produziert werden. Bei der natürlichen Entstehung von Schnee wird feuchte Luft benötigt, damit sich aus dieser Wasserdampfmoleküle an den Eiskristall anlagern können. Im Unterschied dazu dient bei der technischen Schneeerzeugung die trockene Luft zur Verdunstung und damit zur Abkühlung. Die Wasserdüsen sorgen für den nötigen Zuwachs an Masse des Eiskristalls. Der Luftdruck spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle. (vgl. [5])

### Feuchtkugeltemperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Da für gute Bedingungen zur technischen Schneeproduktion sowohl die Lufttemperatur als auch die relative Feuchte der Luft entscheidend sind, ist die Feuchtkugeltemperatur (oder nur Feuchttemperatur) ein nützliches Werkzeug, weil es beide Parameter in einem Wert vereint.

Die relative Feuchte kennzeichnet den Abstand von der Sättigung und ist über das Verhältnis vom Partialdruck des Wasserdampfes zum Partialdruck des Wasserdampfes bei Sättigung bei gleicher Temperatur definiert (vgl. [3]). Dieser Wert gibt im Wesentlichen an, zu wie viel Prozent die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Das Verhältnis entspricht also der Masse an Wasserdampf, der in der Luft vorhanden ist, zu jener Masse an Wasserdampf, die die Luft maximal aufnehmen kann. Da die Aufnahmekapazität der Luft mit der Temperatur steigt, ist dies nur ein relativer Wert bei gegebener Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck.

In der Feuchttemperatur wird der durch Verdunstung zusätzlich mögliche Wärmeentzug aus der Luft (gleichbedeutend mit einer Abkühlung der Luft) berücksichtigt.

Definiert ist die Feuchttemperatur als jene Temperatur, die ein Luftpaket annimmt, wenn bei konstantem Druck Wasser bis zur Sättigung in das Luftvolumen hinein verdunstet wird. Die vom Wasser zum Verdunsten aufgebrauchte Verdampfungsenthalpie wird dabei der Luft entzogen [...]. Wichtig dabei ist, dass mit Abnahme der Temperatur das Vermögen der Luft Wasserdampf aufzunehmen, ebenfalls abnimmt, das Mischungsverhältnis also nicht konstant bleibt. [5]

Daraus folgt, dass die Feuchtkugeltemperatur stets einen kleineren Wert als die Umgebungslufttemperatur annimmt. Einzig bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% haben beide Temperaturen den gleichen Wert, da die Sättigung erreicht ist und so keine weitere Abkühlung durch Verdunstung möglich ist. Die Feuchtkugeltemperatur kann entweder durch Formeln oder mit Hilfe von Tabellen bei gegebener Temperatur und Luftfeuchtigkeit, wie in Abbildung 2-6 zu sehen, abgelesen werden.

Rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Lufttemperatur [°C]							
	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3
100	-10.0	-9.0	-8.0	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0
90	-10.3	-9.3	-8.4	-7.4	-6.4	-5.4	-4.5	-3.5
80	-10.6	-9.7	-8.7	-7.8	-6.8	-5.9	-4.9	-4.0
70	-11.0	-10.0	-9.1	-8.2	-7.3	-6.3	-5.4	-4.5
60	-11.3	-10.4	-9.5	-8.6	-7.7	-6.8	-5.9	-5.0
50	-11.6	-10.7	-9.9	-9.0	-8.1	-7.3	-6.4	-5.6
40	-12.0	-11.1	-10.2	-9.4	-8.6	-7.7	-6.9	-6.1
30	-12.3	-11.5	-10.6	-9.8	-9.0	-8.2	-7.4	-6.6
20	-12.6	-11.8	-11.0	-10.2	-9.5	-8.7	-7.9	-7.2
10	-13.0	-12.2	-11.4	-10.7	-9.9	-9.2	-8.4	-7.7

Rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Lufttemperatur [°C]							
	-2	-1	0	1	2	3	4	5
100	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
90	-2.5	-1.6	-0.6	0.4	1.4	2.3	3.3	4.3
80	-3.1	-2.1	-1.2	-0.3	0.7	1.6	2.6	3.5
70	-3.6	-2.7	-1.8	-0.9	0.0	0.9	1.8	2.7
60	-4.2	-3.3	-2.4	-1.5	-0.7	0.2	1.0	1.9
50	-4.7	-3.9	-3.0	-2.2	-1.4	-0.6	0.3	1.1
40	-5.3	-4.5	-3.7	-2.9	-2.1	-1.3	-0.5	0.3
30	-5.8	-5.1	-4.3	-3.6	-2.8	-2.1	-1.3	-0.6
20	-6.4	-5.7	-5.0	-4.3	-3.5	-2.8	-2.1	-1.5
10	-7.0	-6.3	-5.6	-5.0	-4.3	-3.6	-3.0	-2.3

Abbildung 2-6: Feuchtkugeltemperatur aus Lufttemperatur und-feuchtigkeit [19]

Um eine grobe Übersicht über die passenden Umgebungsbedingungen für die technische Schneeerzeugung zu erhalten, dient Abbildung 2-7. Aus dieser Grafik ist der Zusammenhang zwischen Feuchttemperatur (aus der Lufttemperatur und der relativen Feuchte der Luft) und den geeigneten Bedingungen zur Beschneigung sehr gut ersichtlich.

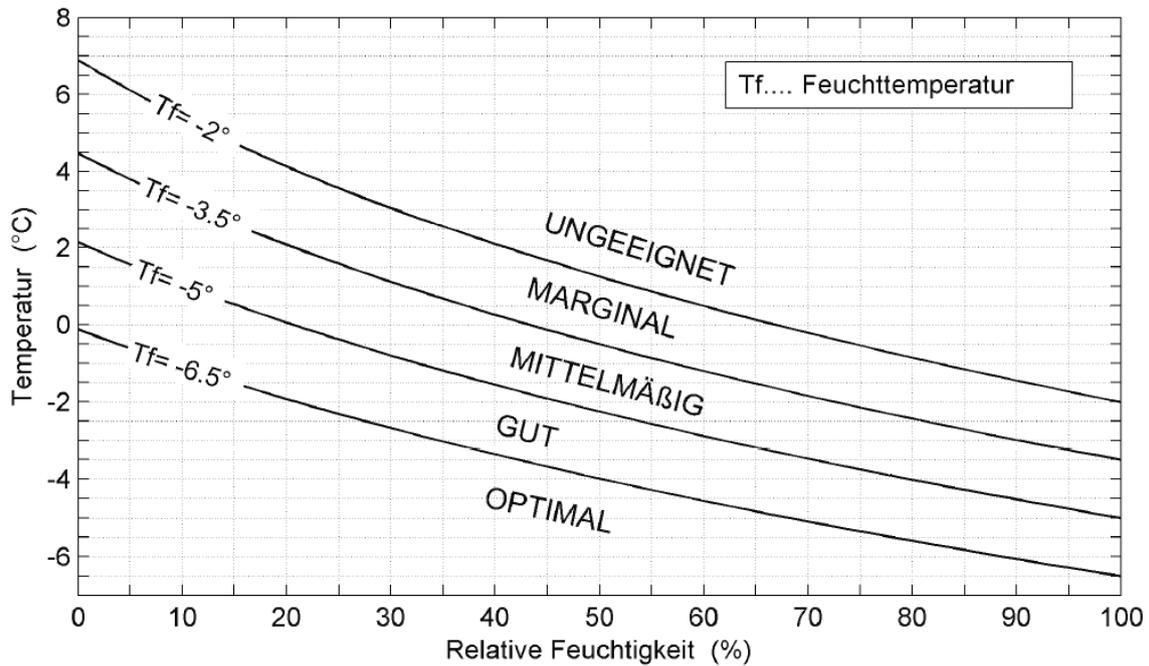


Abbildung 2-7: Umgebungsbedingungen für die Schneeproduktion [5]

Der wirtschaftlich sinnvolle Grenzwert der künstlichen Schneeerzeugung (ohne Zusatzstoffe) für Skipisten liegt zurzeit bei einer Feuchttemperatur ( $T_f$ ) von  $-2\text{ °C}$  (entspricht je nach relativer Luftfeuchte  $-2$  bis  $+2\text{ °C}$  Trockentemperatur), qualitativ hochwertiger Kunstschnee kann in großen Mengen jedoch erst unter einer Feuchttemperatur von  $-5\text{ °C}$  ( $-5.0$  bis  $0\text{ °C}$  Trockentemperatur) erzeugt werden. Für mittlere Feuchtigkeitsverhältnisse ist daher eine maximale Lufttemperatur von  $-3.0\text{ °C}$  als ein guter Richtwert für eine wirtschaftliche Beschneigung anzusehen. [5]

### Optimierung des Gefriervorgangs nach Hofstätter [5]

Analysiert man den Prozess der technischen Schneeproduktion, können folgende Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz und der erreichten Schneequalität identifiziert werden:

- Kühlen des Schneiwassers bis knapp an den Gefrierpunkt. Damit kann der Energiebetrag, der aus der Verdunstungskälte gewonnen oder den Wassertröpfchen durch Wärmeleitung an die Umgebung entzogen werden muss, minimiert werden.
- Komprimiertes Wasser-Luftgemisch, das beim Ausblasen aus eigenen, sogenannten Nukleatordüsen expandiert und so den Luftstrom vorweg mit Eiskeimen anreichert. Kurz dahinter werden dann die reinen Wassertröpfchen in den Luftstrom eingebracht, um an den vorhandenen Eiskeimen rascher zu gefrieren.
- Verwendung von Schneezusätzen im Schneiwasser. Diese fungieren als zusätzliche Eiskeime und beschleunigen die Eiskristallbildung. Dadurch kann die Nukleationstemperatur beim Beschneien um  $3\text{ °C}$  angehoben werden.
- Erhöhen der Wurfweite. Eiskristalle und Schneekristalle haben je nach Flugzeit des Wassers/Eises länger Zeit, sich auszubilden. Zudem wird ein größeres Luftvolumen aus der Umgebung in den Verdunstungsprozess miteinbezogen. Dies kann durch eine

Montage der Düsen auf erhöhten Punkten (Liftstützen) oder Masten beziehungsweise Stangen erreicht werden.

- Steuerung der Tropfengröße über den Wasserdruck sowie der Größe und Geometrie der Wasserdüsen. Dadurch kann einerseits ein ausreichendes Ausfrieren der Tropfen und andererseits eine optimale Verdunstungswirkung durch Änderung der Tröpfchenoberfläche erreicht werden.

Das Prinzip der Schneeerzeugung mit Nukleatordüsen wird in Kapitel 2.2.1 näher erläutert. Schneezusätze (Zusatzstoffe wie Snomax<sup>1</sup>) sind sowohl in Österreich als auch in Deutschland aufgrund von Umweltbedenken nicht erlaubt. Die Erhöhung der Wurfweite und die Variation von verschiedenen Düsenkonfigurationen sind meistens in der Praxis nicht möglich, da diese bereits bei der Anschaffung fixiert werden. Mittlerweile können aber bei vielen Schneeerzeugern bei geeigneten Bedingungen mehr Düsen zugeschaltet werden, um die Schneeproduktion zu erhöhen. Im normalen Betrieb stellt die Steuerung der Tröpfchengröße über unterschiedliche Wasserdrücke eine der wirkungsvollsten Methoden dar, um sich bestmöglich auf die verschiedenen Umgebungsbedingungen einstellen zu können und in weiterer Folge die gewünschte Schneequalität zu erhalten. (vgl.[5])

### 2.2.1 Funktionsprinzip von Schneeerzeugern

Wie schon in Kapitel 2.1 erläutert, entsteht Naturschnee durch sogenannte Eiskeime, an denen sich Wasserdampf aus der feuchten Umgebungsluft anlagert und sich so am Ende durch die Gruppierung einzelner Schneekristalle eine Schneeflocke bildet. Bei den Schneeerzeugern gibt es hierfür zwei verschiedene Düsen: die Wasserdüsen und die Nukleatordüsen. Die Funktion und das Zusammenwirken der beiden Düsen sind in Abbildung 2-8 veranschaulicht.

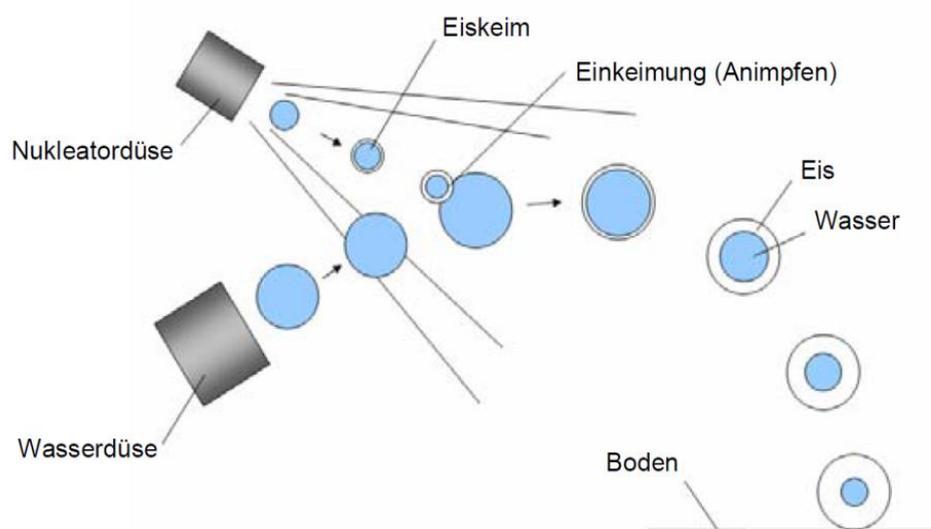


Abbildung 2-8: Zusammenwirken Nukleatordüse und Wasserdüse [13]

<sup>1</sup> Bei Snomax handelt es sich um durch Bestrahlung abgetötete und anschließend gefriergetrocknete Zellen von Bakterien. Dabei wird eine Dosierung von einem Milligramm pro Liter Schneiwasser empfohlen. Diese wirken als zusätzliche Eiskeime und verbessern so die Eiskristallbildung. (vgl. [1]).

## Nukleatordüse

Nukleatordüsen sorgen für die Erzeugung der Eiskeime, indem Wasser mit Druckluft fein zerstäubt wird. Diese Zerstäubung kann intern in einer Mischkammer oder extern als Außenmischung erfolgen (vgl. Abbildung 2-9). Bei der internen Mischung wird Luft mit Wasser in einer Mischkammer vermischt und durch eine Düse ausgesprüht. In dieser Konstellation sind die beiden Fluide voneinander abhängig: Ändert man den Druck des einen Fluids, hat das unmittelbare Auswirkungen auf den Durchsatz des anderen. Die Regulierungsmöglichkeit ist daher bei interner Mischung in einer Mischkammer eingeschränkt. Bei einer externen Mischung ist dies nicht der Fall. Die beiden Fluide gelangen durch unterschiedliche Düsen in die Umgebung und werden infolge der Expansion und des Zusammentreffens fein zerstäubt. Da eine gegenseitige Beeinflussung nicht gegeben ist, ist eine genaue und stabile Regulierung der einzelnen Fluide erreichbar.

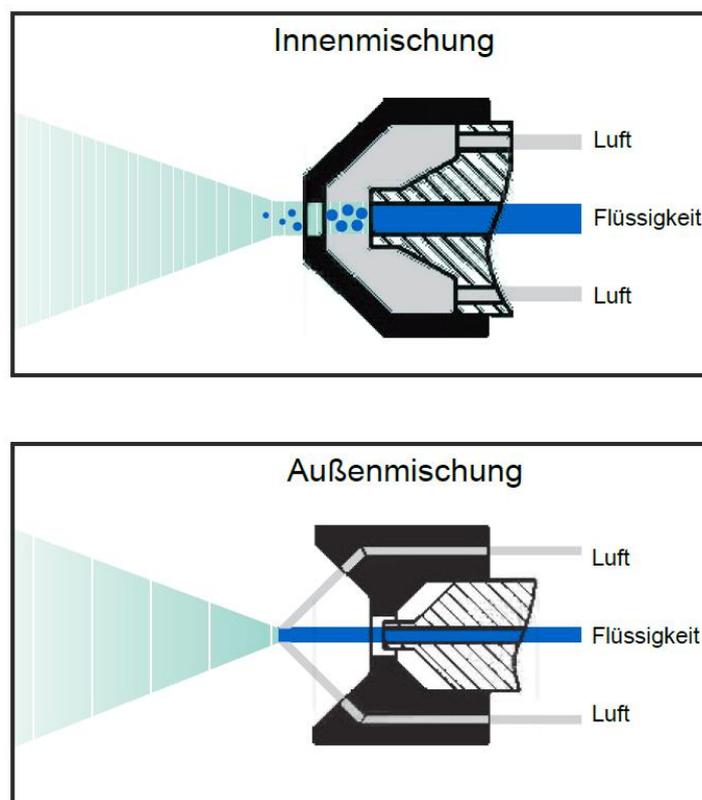


Abbildung 2-9: Nukleatordüse – interne und externe Mischung [12]

Im Anwendungsbereich der technischen Schneeerzeugung liegt der Druck beider Medien laut Mörth [9] bei circa 5 bis 10 bar. Das Mischverhältnis Wasser zu Luft ist je nach Düsenspezifikation und Umgebungsbedingungen unterschiedlich. Durch die Expansion auf den Umgebungsdruck unmittelbar nach dem Düsenaustritt tritt ein starker Kühlungseffekt (Joule-Thompson-Effekt) ein. Nach dem Austritt kommt die weitere Abkühlung durch Verdunstung zu tragen. Dadurch kann der fein zerstäubte Wasserdampf gefrieren. Sind keine Kristallisationskeime (Verunreinigungen, Staub etc.), durch die die Eiskristallbildung initiiert wird, in der Luft vorhanden, müsste das Wasser, da dieses in seiner reinen Form erst bei unter  $-39\text{ °C}$  gefriert [4], nach dem Austritt unter eben genannter Grenztemperatur liegen (vgl. [4]). Nukleatordüsen sind bei handelsüblichen Propellerkanonen gleichmäßig am Umfang verteilt. Die Eiskeime einer Nukleatordüse reichen aus, um mehrere Wasserdüsen zu versorgen.

## Wasserdüsen

Durch die Wasserdüsen erfolgt die eigentliche Schneeproduktion. Die Wassertröpfchen kommen mit den Eiskeimen aus den Nukleatordüsen in Kontakt und gefrieren. Die ideale Größe der Wassertröpfchen hängt von den Umgebungsbedingungen ab. In der Praxis ist es meist so, dass unterschiedliche Düsen an der Beschneiungsanlage angebracht sind, die verschiedenen Düsenaustrittsquerschnitte und somit auch abweichende Wasserdurchsätze aufweisen.

Ist die Lufttemperatur und die Luftfeuchte sehr niedrig, können mehrere Düsen zugeschaltet werden, um den Wasserdurchsatz zu erhöhen und die Schneeproduktion zu maximieren. Bei diesen Bedingungen gefrieren auch größere Tröpfchen schnell und sorgen für den nötigen Massendurchsatz bei der Schneeproduktion. Liegt jedoch eine etwas wärmere Lufttemperatur vor, so sind sehr kleine Tröpfchen nötig, um zu garantieren, dass diese auch richtig ausfrieren. Tun sie das nicht, befindet sich ein erhöhter Flüssigwasseranteil in dem technisch erzeugten Schnee und es kommt später vermehrt zu einer Vereisung der Piste oder die Tröpfchen gefrieren erst gar nicht und es bleibt bei reinen Wassertröpfchen, die zu Boden fallen. Beim Ausfrieren ist das geometrische Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Tröpfchen entscheidend. Kleinere Tröpfchen haben im Vergleich zu ihrem Volumen eine große Oberfläche. Diese Tatsache begünstigt die Abkühlung und das Ausfrieren der Tröpfchen enorm. Der Effekt kann zwar durch die Erzeugung von immer kleineren Tröpfchen weiter gesteigert werden, allerdings führt es zwangsläufig dazu, dass ab einer gewissen Grenze die verdunstete Wassermenge zu groß ist, um die Wirtschaftlichkeit der Produktion zu bewahren. Ein weiteres Problem, das bei zu kleinen Tröpfchen auftritt beziehungsweise sich verstärkt, ist die Windverfrachtung. Kleine Tröpfchen sind anfälliger auf Wind als größere, was dazu führen kann, dass sie über die gewünschte Schneefläche hinaus verfrachtet werden. Dies reduziert abermals die Wirtschaftlichkeit, außerdem wird unnötig Wasser verschwendet. (vgl. [8])

Allgemein gilt, dass die Tropfen mit steigendem Wasserdruck und kleiner werdendem Querschnitt der Düsenaustrittsöffnung feiner zerstäubt werden. Typische Tropfengrößenbereiche, die in der Praxis bei der technischen Schneeerzeugung üblicherweise zu tragen kommen, sind (vgl. [5]):

- Nukleatortropfen: 10 - 50  $\mu\text{m}$
- kleine Tropfen: 50 - 150  $\mu\text{m}$
- mittlere Tropfen: 150 - 500  $\mu\text{m}$
- Primär-Wasserstrom: 500  $\mu\text{m}$  - 2 mm

## Eigenschaften von technischem Schnee

Die Unterschiede sind im Einzelnen sehr von den Umgebungsbedingungen bei der Erzeugung abhängig, es lassen sich aber folgende Durchschnittswerte feststellen (vgl. [9], [5]):

Technischer Schnee:

- Durchmesser: 30 - 350  $\mu\text{m}$
- Dichte: 300 - 500  $\text{kg}/\text{m}^3$
- Form: kugelige Form

Im Vergleich dazu weist der Naturschnee folgende Durchschnittswerte auf:

- Durchmesser: 50 - 100  $\mu\text{m}$
- Dichte: 20 - 100  $\text{kg}/\text{m}^3$
- Form: hexagonale Form

Im Gegensatz zum Naturschnee entsteht der technische Schnee in wesentlich kürzerer Zeit. Durch das Prinzip der Schneeerzeugung und die fehlende Zeit kann sich beim technischen Schnee keine symmetrische Verästelung ausbilden, wie es beim Naturschnee während des langen Flugs zu Boden der Fall ist. Deshalb ist die Form der Schneekörner des technischen Schnees kugelig.

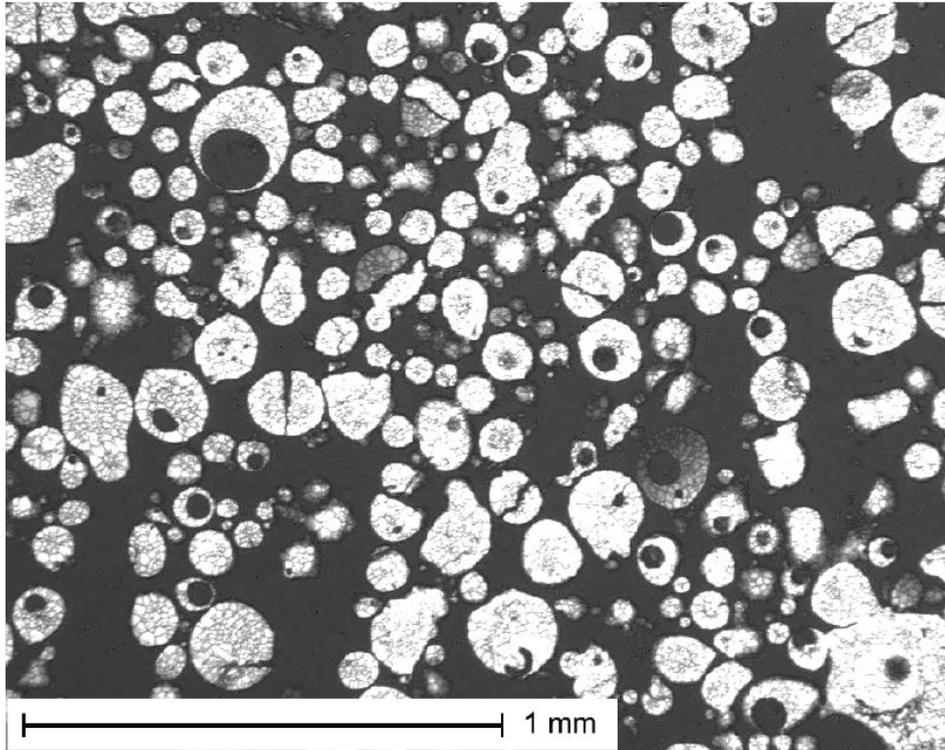


Abbildung 2-10: Schneekörner aus künstlicher Beschneigung [5]

Bei guten Bedingungen kann hochwertiger technischer Schnee mit einer Dichte von  $300 \text{ kg/m}^3$  und einem freien Wassergehalt von weniger als 15 % produziert werden. In Abbildung 2-10 sind die kugelige Form und das eingeschlossene Flüssigwasser deutlich zu erkennen. Maschinell erzeugter Schnee lässt sich durch Pistengeräte leichter präparieren, er neigt weniger zur Vereisung der Schipiste und schmilzt durch die hohe Isolationsfähigkeit langsamer. Wird Naturschnee allerdings wiederholt durch Pistengeräte bearbeitet, können, verglichen mit Kunstschnee, nur mehr geringe Unterschiede bezüglich der Dichte festgestellt werden. (vgl. [5])

### 2.3 Existierende Anlagen zur Schneeerzeugung

Die technische Beschneigung an sich wurde durch einen Zufall entdeckt. Im Rahmen eines Experiments gegen Ende des zweiten Weltkriegs sprühten Forscher in einem Niedrigtemperatur-Windkanal kleine Wassertropfchen in eine Turbine. Sinn des Versuchs war es, die Vereisung von Jet-Turbinen zu untersuchen. Im hinteren Teil des Windkanals kam es dabei zu einer Ansammlung von Schneekristallen, die laufend entfernt werden mussten und im Bericht nur als unerwünschter Nebeneffekt protokolliert wurden. Somit war die eigentliche Methode zur Produktion von technischem Schnee erfunden. Die Entwicklung zur kommerziellen Nutzung der Schneeerzeugung fand erst später durch die Firma „The Tey Manufacturing Company“ statt, die diese Technologie im Jahr 1954 patentierte. (vgl. [5])

Weitere Entwicklungen der Beschneigungsanlagen führten dazu, dass mittlerweile mehrere verschiedene Systeme existieren. Neben den klassischen Schneekanonen (auch Propellerkanonen) etablierten sich die sogenannten Schneilanzen. Abgesehen davon gibt es noch einige Exoten (vgl. [9]), auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Abhängig von Gefälle und Ausrichtung des Hanges, Pistenbreite, durchschnittlichen Temperaturen, Windsituation, benötigter Schneemenge etc. wird in den Schigebieten das geeignete Beschneigungssystem gewählt.

Neben dem eigentlichen Beschneigungsgerät an sich sind noch weitere Bestandteile einer Beschneigungsanlage (siehe Abbildung 2-11) zu nennen (vgl. [5]):

- Wasserreservoir und Pumpstation (eventuell Entkeimungsanlage und Kühlung)
- Wasserleitungen und Wasserentnahmestellen (Hydranten)
- zentrale Energieversorgung und Trafostation
- Stromleitungen mit Stromanschlussstellen und Steuerleitungen
- Druckluftleitungen und Kompressorstationen (Lanzensysteme)
- Gebäude zum Lagern der Schneeerzeuger (Schneilanzen, Schneekanonen und Zubehör)
- Wetterstation sowie elektronische Steuereinheit (mittlerweile meist direkt am Schneeerzeuger)

Die meisten dieser Systeme sind nicht sichtbar, weil sie abseits der Pisten installiert oder unterirdisch verlegt sind. Der Kostenanteil dieser versteckten Systeme beträgt allerdings 80 bis 95 % von den gesamten Investitionskosten einer Anlage. (vgl. [5])

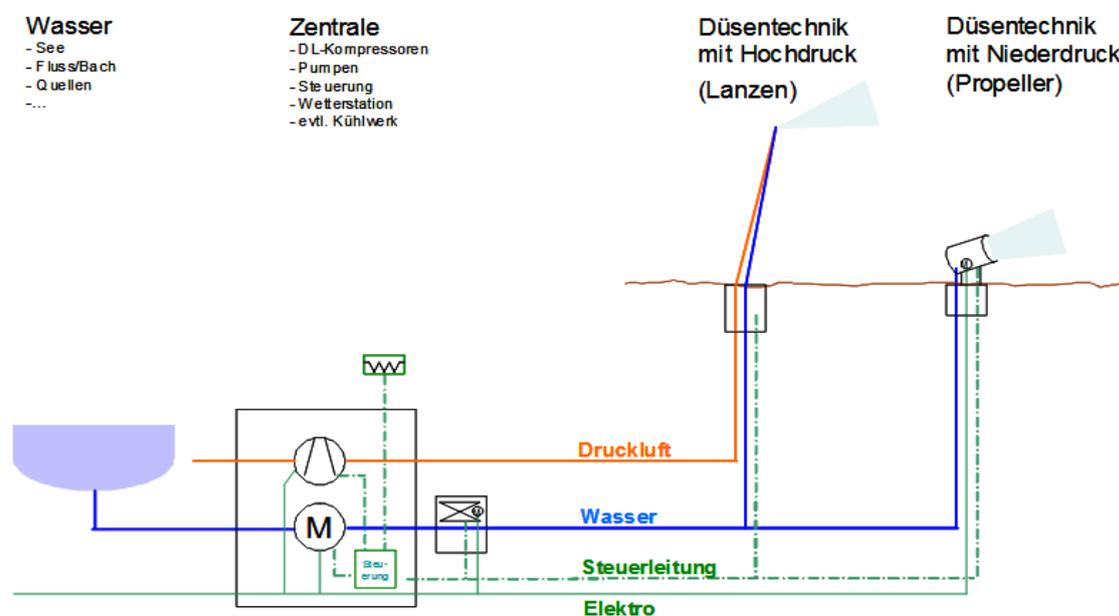


Abbildung 2-11: Schematische Übersicht einer Beschneigungsanlage [6]

### 2.3.1 Die Schneekanone

Die Propellerkanone (vgl. Abbildung 2-12) ist der am weitesten verbreitete Schneeerzeuger und hat ferner die höchste Schneileistung, sie weist jedoch auch den größten Bedarf an Strom und Wasser auf. Als Hauptmerkmal gilt das zylindrische Gehäuse, an dessen Eintritt ein

leistungsstarker Ventilator sitzt, der den Zylinder mit Luft durchströmt. Am Umfang des Zylinderaustritts befinden sich die Wasser- und Nukleatordüsen. Wegen des starken Luftstroms erreichen diese Geräte eine Wurfweite von bis zu 70 m. Die Druckluft für die Nukleatordüsen wird in der Regel durch einen Kompressor direkt am Gerät bereitgestellt. Außerdem sind die Beschneigungsgeräte größtenteils mit einer Heizung ausgestattet, um ein Einfrieren der Düsen bei sehr kalten Temperaturen zu verhindern. Die Wasserversorgung erfolgt über Druckschläuche aus einer Zentrale, in der das Wasser zuvor meist noch aufbereitet wird (Entkeimung, Filterung, Kühlung etc.). (vgl. [9])

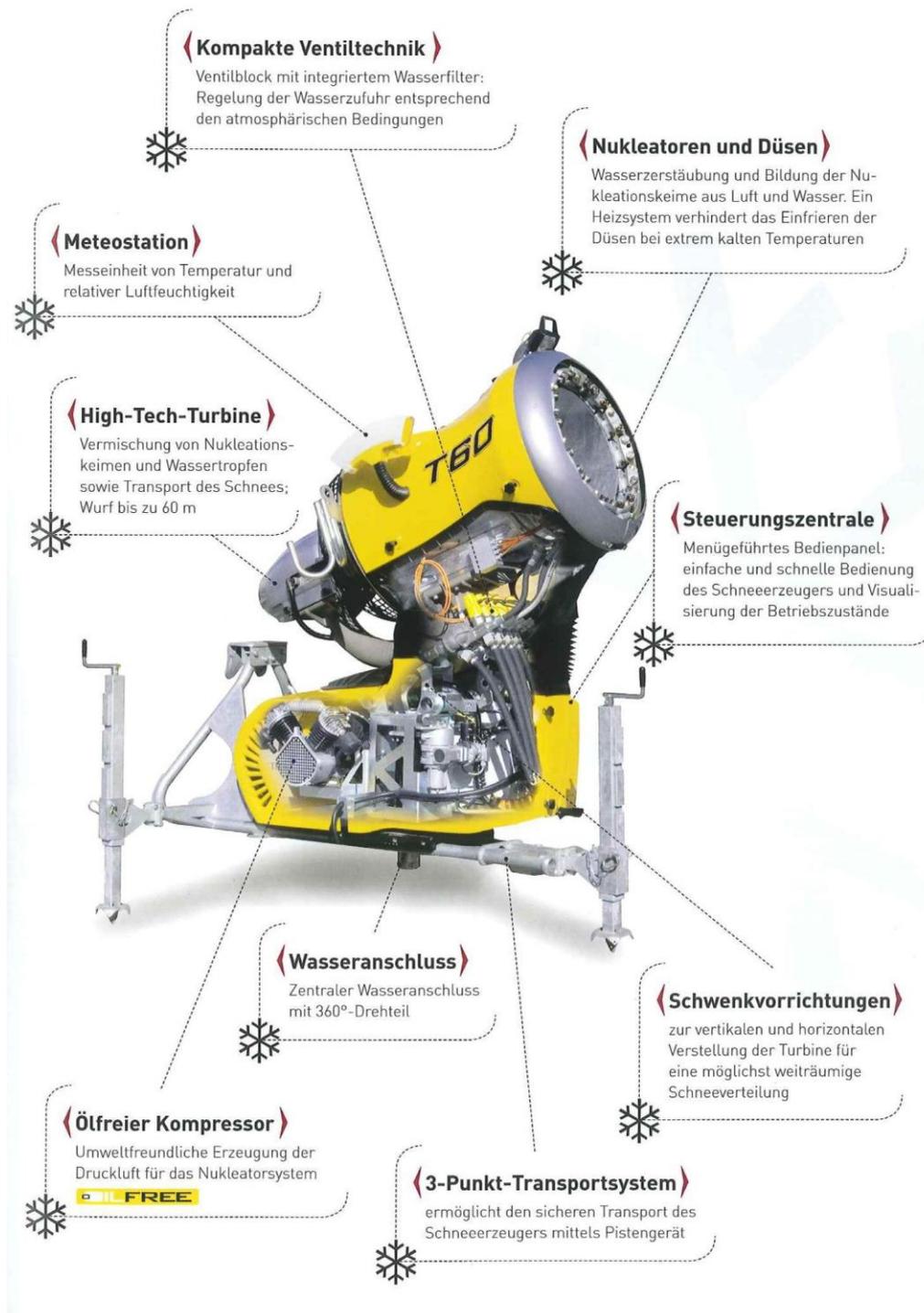


Abbildung 2-12: Komponenten einer Propellerkanone [16]

Die Schneeerzeugung funktioniert wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert. Aus den Nukleatordüsen tritt das fein vernebelte Wasser- Luftgemisch, welches durch die Expansion am Düsenaustritt und die Verdunstung stark abkühlt und zu Eiskeimen gefriert. Diese Eiskeime werden durch den erzeugten Luftstrom verwirbelt, gelangen in Kontakt mit den Wassertröpfchen aus den Wasserdüsen und initiieren dort die Kristallisation. Der starke Luftstrom begünstigt diesen Vorgang und sorgt durch eine hohe Wurfweite für eine lange Fallzeit zum Ausfrieren des Schnees. Die meisten Schneekanonen sind mittlerweile mit einer eigenen Wetterstation ausgerüstet, welche die Daten an die Zentrale schickt. In der Zentrale werden dann, den Umgebungsbedingungen entsprechend, die optimalen Einstellungen für eine gute Schneequalität vorgenommen.

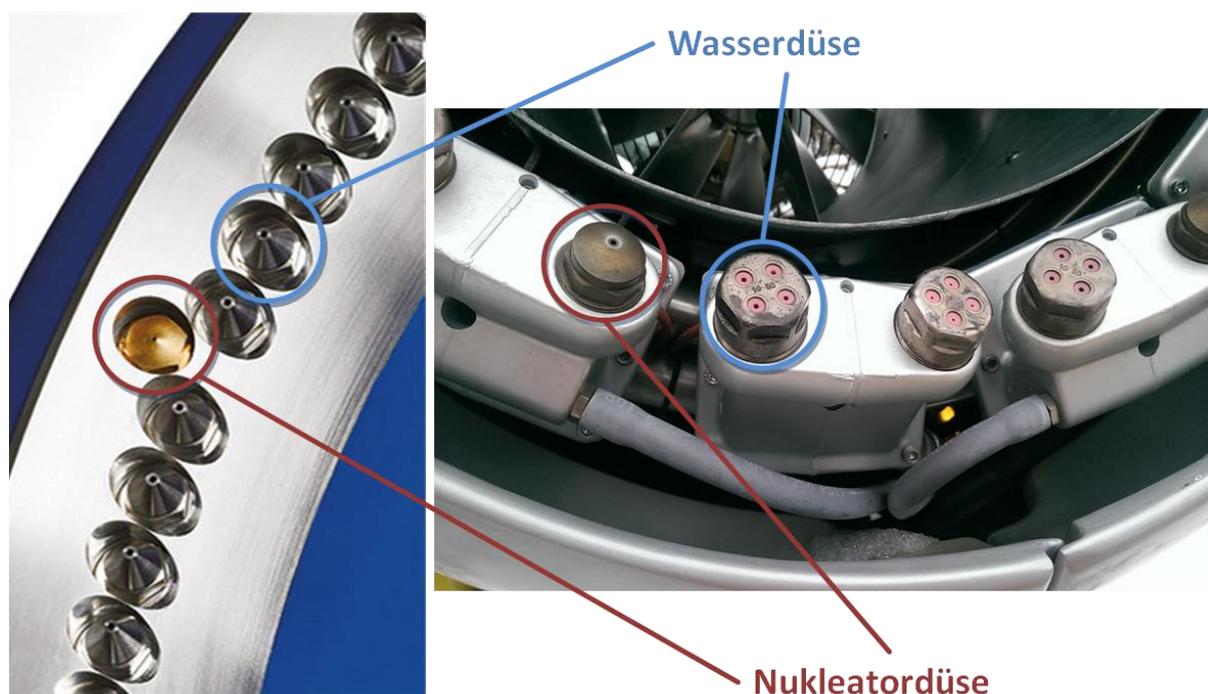


Abbildung 2-13: Propellerkanonen mit unterschiedlichen Düsenarten, modifiziert [9]

Die einzelnen Ausführungen der Propellerkanonen sind je nach Hersteller und Model unterschiedlich und variieren sehr stark hinsichtlich Leistungsaufnahme, Düsenanzahl, Wasserverbrauch etc. (siehe Abbildung 2-13). Typische Daten für eine leistungsstarke Propellerkanone sind folgende (vgl. [9]):

Gewicht (inkl. Beine und Kabel):	750 kg	Nukleatordüsen:	12
Versorgungsspannung:	400 V	Wasserdüsen:	90
Gebälsemotor:	18 kW	Wasserdruck:	7 - 50 bar
Kompressor:	4 kW	Wasserdurchsatz (max.):	660 l/min
Heizung:	3 kW	Luftdruck:	5 - 10 bar
Leistungsaufnahme:	25 kW	Luftverbrauch (max.):	1200 l/min
Wurfweite:	70 m	Schneeproduktion (max.):	105 m <sup>3</sup> /h

Eine umfangreiche Aufzählung verschiedener Modelle mit deren Leistungsdaten findet sich in der vorhergegangenen Literaturrecherche von Mörth [9].

### 2.3.2 Die Schneilanze

Bei einer Schneilanze, oder auch Schneelanze genannt, sind die Düsen auf einem Lanzenkopf angebracht, der wiederum auf einer bis zu 14 Meter langen Stange sitzt (siehe Abbildung 2-14).



Abbildung 2-14: Schneilanze (1 Lanzenkopf, 2 Wasser-/Nukleatordüsen, 3 Bedienpanel, 4 Anschlüsse, 5 Wetterstation) [14]

Das Lanzensystem benötigt im Allgemeinen einen höheren Wasserdruck als die Schneekanonen und die Druckluftversorgung für das Wasser-Luftgemisch in den Nukleatordüsen wird zusätzlich zur Wasserversorgung zentral über Schläuche bereitgestellt. Die Schneeproduktion ist im Vergleich zu einer Propellerkanone wesentlich geringer, aber gleichzeitig ist dieses System äußerst effizient, da die Leistungsaufnahme weit weniger hoch ausfällt. Die großen Nachteile von Schneilanzensystemen sind die starke Windanfälligkeit und die geringe Wurfweite. Da die Schneilanze ohne den Trägerluftstrom eines Propellers auskommen muss, sind große Fallhöhen nötig, um das Auskristallisieren des Schnees während des zu Boden Sinkens zu ermöglichen. Der herabfallende Schnee ist deshalb erheblich windanfälliger als der einer Propellerkanone.

Typische Daten für eine leistungsstarke Schneilanze sind (vgl. [9]):

Gewicht:	150 kg	Wasserdruck:	16 - 100 bar
Leistungsaufnahme:	5 kW	Wasserdurchsatz (max.):	6 l/s
Nukleatordüsen:	5	Luftdruck:	5 - 10 bar
Wasserdüsen:	15	Luftverbrauch:	500 l/min
Schneeproduktion (max.):	55 m <sup>3</sup> /h		

Eine umfangreiche Aufzählung verschiedener Modelle mit deren Leistungsdaten findet sich in der vorhergegangenen Literaturrecherche von Mörth [9].

### 3 Konzeptionierung

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen der Schneeeinstellung und den Kenntnissen über die Funktion von Schneeerzeugern wurden erste Überlegungen zum Bau des Prototyps angestellt. Dieser Prozess kann in folgende Etappen unterteilt werden:

- Abklären und Präzisieren der Aufgabenstellung
- Ermittlung der wichtigsten Funktionen
- Suche nach geeigneten Lösungsprinzipien und deren Umsetzung

Im Rahmen dieser Überlegungen wurde anfangs ein Lastenheft erstellt (siehe A.1 Lastenheft), in dem sowohl die wichtigsten Anforderungen an das fertige Serienprodukt, aber auch die notwendigen Systemvoraussetzungen beim Endbenutzer definiert wurden. Ausgehend von einem bereits vorhandenen Berechnungsmodell aus der Arbeit von Mörth [9] erfolgte in Kombination mit den Anforderungen aus dem Lastenheft eine Vorauslegung, um eine grobe Abschätzung der einzelnen Komponenten zu erhalten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kam es zur Teilebeschaffung und parallel dazu zur CAD-Konstruktion. Aufgrund der Tatsache, dass einige am Markt verfügbare Zukaufteile nicht exakt den Anforderungen entsprachen, wurden laufend Anpassungen in der Schneekanonenauslegung vorgenommen.

#### 3.1 Anforderungen an den Prototyp und Systemvoraussetzungen

In Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber werden Ideen und Anforderungen der möglichen und notwendigen Funktionen des Schneeerzeugers als Serienprodukt gesammelt und definiert. Zuerst werden die Systemvoraussetzungen festgelegt, die beim Endbenutzer zum Betrieb des fertigen Geräts vorhanden sein müssen. Darunter fallen Strom- und Wasseranschluss sowie die Umgebungsgrenzbedingungen, bei der eine Schneeproduktion theoretisch möglich ist. Unter diesen Voraussetzungen soll das Endprodukt in der Lage sein, Schnee zu produzieren. Im nächsten Schritt werden die Anforderungen an das Gerät und in weiterer Folge auch mögliche Zusatzfunktionen definiert. Eine Anforderung ist beispielsweise die Schneeproduktion (Schneemenge) pro Zeiteinheit, die horizontale und vertikale Schwenkbarkeit der Schneekanone oder eine automatische Wasserentleerung des Geräts nach dem Abschalten, um Frostschäden durch das Gefrieren des Wassers in den Leitungen zu verhindern. Eine mögliche Zusatzfunktion wäre zum Beispiel eine automatische Erfassung und Anzeige der Umgebungsbedingungen auf einem Display am Gerät. Im Rahmen des Prototypenbaus wird versucht, möglichst viele der aufgezählten Anforderungen umzusetzen, wenngleich eine vollständige Umsetzung aller Punkte aufgrund des momentanen Entwicklungsstandes und der beschränkten Zeit nicht möglich war. Der Prototyp soll in erster Linie dazu dienen, zu erfahren, ob eine Schneeproduktion unter gegebenen Umgebungsbedingungen überhaupt möglich ist. Im Falle positiver Primärtests am Prototyp sollen anschließend Verbesserungen durchgeführt werden, um die Schneequalität weiter zu steigern, wobei die aufgezeichneten Messdaten zur weiteren Entwicklung herangezogen werden.

##### 3.1.1 Systemvoraussetzungen

Unter den Systemvoraussetzungen sind jene Bedingungen aufgelistet, die seitens des Anwenders beziehungsweise Endnutzers für den Betrieb des Geräts zur Verfügung stehen müssen. Diese Voraussetzungen beziehen sich auf die Anschlussdaten in Bezug auf Strom- und Wasserversorgung eines typischen österreichischen Haushalts. Darüber hinaus sind unter

diesem Punkt auch die Umgebungsbedingungen definiert, die vorherrschen müssen, um eine Schneeproduktion möglich zu machen.

Zu diesen Voraussetzungen zählen:

- Wasseranschluss
  - Wassertemperatur:  $< 10\text{ °C}$
  - Wasserdruck:  $\sim 4\text{ bar}$
  - Wasserdurchsatz:  $\sim 8\text{ l/min}$
- Lichtstromanschluss
  - effektive Spannung:  $230\text{ V}$
  - maximaler Strom:  $16\text{ A}$
- Umgebungsluftdruck:  $\sim 1\text{ bar}$
- Umgebungslufttemperatur:  $< 0\text{ °C}$
- relative Feuchtigkeit der Luft:  $< 100\text{ %}$

### 3.1.2 Anforderungen

Die Anforderungen an das serienfertige Produkt werden in zwei Kategorien geteilt, den zu erfüllenden (Pflichtanforderungen) und den zusätzlichen Funktionen (optionale Anforderungen), die in dieser Arbeit aber nicht weiter verfolgt werden. Dies könnte jedoch in darauffolgenden Untersuchungen und Ausführungen erfolgen.

Aus der Systemvoraussetzung der Stromversorgung mit  $230\text{ V}$  und  $16\text{ A}$ , ergibt sich in logischer Konsequenz, dass die Leistungsabnahme der miniaturisierten Schneekanone auf maximal  $3680\text{ W}$  begrenzt ist. Da aber bei einer derartig großen Leistungsabnahme keine weiteren Verbraucher im Haushalt angeschlossen sein dürfen, um die ausreichende Versorgung zu gewährleisten, wird dieser Wert auf  $2500\text{ W}$  reduziert. Außerdem wird der untere Grenzwert der Schneeproduktion auf mindestens  $0,8\text{ m}^3/\text{h}$  (bei einer Schneedichte von  $300\text{ bis }550\text{ kg/m}^3$ ) festgelegt. Eine zentrale Anforderung betrifft die Bauart des Schneeerzeugers in Form einer Schneekanone. Dies hat einerseits optische Gründe, da der Wiedererkennungswert einer Schneekanone typischerweise höher als bei einer vergleichbaren Schneilanzenausführung ist. Andererseits befinden sich bereits einige Schneilanzen-Schneeerzeuger am Markt, wodurch einer Schneekanone auch diesbezüglich Marketingvorteile zugeschrieben werden können. Der Grenzwert für eine erfolgreiche Schneeproduktion ist in der Vorauslegung auf  $-3,5\text{ °C}$  Umgebungslufttemperatur fixiert worden, da ab dieser Temperatur laut Abbildung 2-7 eine Schneeproduktion auch trotz einer äußerst hohen Luftfeuchtigkeit prinzipiell möglich sein sollte. Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass dieses Diagramm lediglich einen Richtwert für die ausgereifte technische Schneeerzeugung darstellt und deshalb nicht unbedingt als Ansatz für den Prototyp verwendet werden kann. Ein wesentlicher Punkt, in dem sich der miniaturisierte Prototyp von den am Markt befindlichen Geräten unterscheidet, ist zum Beispiel die Temperatur des zugeführten Wassers. In Kapitel 2.3 wird darauf hingewiesen, dass im Rahmen der professionellen technischen Schneeerzeugung durchaus auch Kühlanlagen zum Einsatz kommen, um das Wasser möglichst nahe am Gefrierpunkt abzukühlen, damit eine effizientere Schneeproduktion erfolgen kann. Durch die experimentellen Versuche zeigte sich, dass die Wassertemperatur, mit der der Prototyp versorgt wird, bis zu  $12\text{ °C}$  betragen kann. Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen dient dieses Diagramm nur als Orientierung. Weitere Punkte betreffen das maximal zulässige Gesamtgewicht von unter  $25\text{ kg}$ , den wartungsfreien Betrieb, die Möglichkeit eines unbeaufsichtigten Betriebs und den dazugehörigen Sicherheitsmechanismen, die Witterungsbeständigkeit, das Bauvolumen sowie einige andere Kriterien, die bei dem serienfertigen Endprodukt erfüllt sein sollten.

### 3.2 Thermodynamische Vorausberechnung

Vor dieser Arbeit wurden bereits eine Literaturstudie und ein Modell für die thermodynamische Auslegung einer Schneekanone im Rahmen einer Bachelorarbeit erarbeitet (vgl. [9]). Dieses Berechnungsmodell wurde unter Verwendung zahlreicher vereinfachter Annahmen und Schätzungen (zum Beispiel Berechnung des Wasser-Luftgemisches als feuchte Luft, Nukleatordüse als Lavaldüse, keine Berücksichtigung von Druckverlusten etc.) erstellt. Deshalb dient die Berechnung im Allgemeinen als erste Vorauslegung der relevanten Bauteile (Gebläse, Wasserpumpe, Kompressor etc.) der Schneekanone. Das vereinfachte Anlagenschema ist in Abbildung 3-1 zu sehen. Das Modell basiert auf dem System einer Schneekanone mit interner Gemischbildung in der Nukleatordüse und besteht im Wesentlichen aus einem Luft- und einem Wasserpfad. Die Luft wird aus der Umgebung angesaugt und von einem Kompressor verdichtet. Das Wasser wird durch eine Pumpe auf ein höheres Druckniveau gebracht und anschließend in den Wasserdüsen zerstäubt. Ein kleiner Teil des Wassers wird zuvor abgezweigt, geht in den Luftpfad und bildet dort das Wasser-Luftgemisch, das anschließend durch die Nukleatordüse in die Umgebung expandiert.

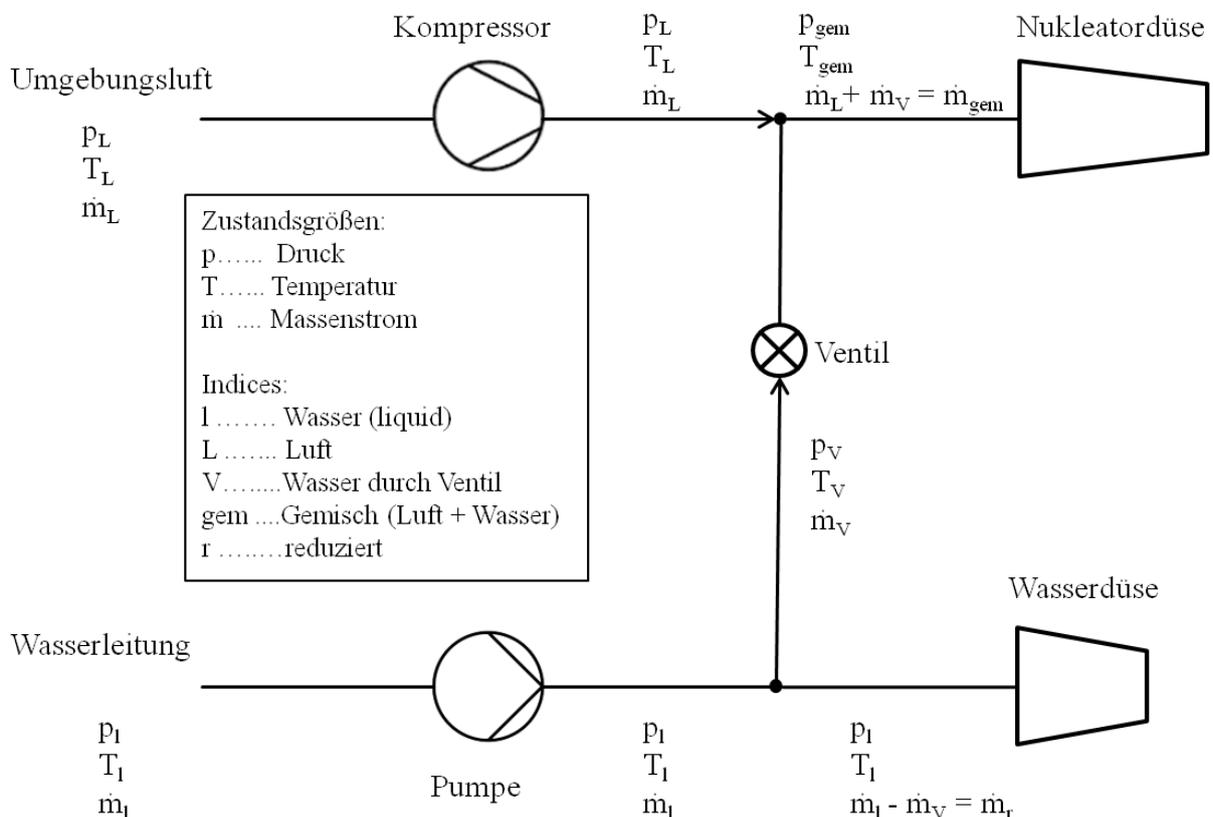


Abbildung 3-1: Anlagenschema für das Berechnungsmodell

Durch die getroffenen Vereinfachungen ist dieses Modell nicht zur vollständigen Auslegung des Prototyps geeignet. Jedoch können mit den Randbedingungen aus den zuvor definierten Anforderungen des Lastenhefts überschlägige Berechnungen für die Auslegung der einzelnen Komponenten erfolgen. Der minimale Durchfluss, der sich durch die geforderte Schneeproduktion bei mittlerer Schneedichte ergibt, und die unteren Grenzwerte der Mediendrucke von Luft und Wasser aus den Herstellerangaben dienen als erste Ausgangswerte für die Berechnung. Dies geschieht auch hinsichtlich der Überlegung, durch

geringere Arbeit von Kompressor und Pumpe die Kosten und den Leistungsbedarf niedrig zu halten. Als kritischer Punkt bei der Berechnung erweist sich sowohl das geeignete Mischungsverhältnis von Luft und Wasser ( $\dot{m}_L$  zu  $\dot{m}_V$ ) in der Nukleatordüse sowie das Verhältnis von Wasser in der Nukleatordüse zum gesamten Wasser ( $\dot{m}_V$  zu  $\dot{m}_I$ ). Da diese Verhältnisse sehr von den Umgebungsbedingungen abhängen und es auch diesbezüglich keine genauen Werte diverser Serienhersteller gibt, wird eine Variationsrechnung durchgeführt. Durch Veränderung oben genannter Mischungsverhältnisse sowie Variationen der Systemdrücke (insbesondere auf der Luftseite) ergeben sich Gebiete, in denen zum Beispiel der Luftdurchsatz bei entsprechendem Druck und Mischungsbereich liegen muss. Mithilfe dieser Ergebnisse erfolgt anschließend die Auslegung der einzelnen Komponenten wie Kompressor oder Pumpe. Da nun die Bereiche, in denen sich die einzelnen Massenströme und Drücke befinden, ungefähr bekannt sind, können in weiterer Folge auch die benötigten Messbereiche der Messtechnik aus der Berechnung bestimmt werden.

### 3.3 Eigenschaften und Konstruktionsmerkmale des Prototyps

Im nächsten Schritt gilt es, die konstruktiven Merkmale und Eigenschaften einer Schneekanone zu erfassen und beim Prototyp umzusetzen. Im Rahmen der ersten Überlegungen zur Gestaltung des Prototyps werden folgende konstruktive Merkmale einer Schneekanone gesammelt:

- Geometrie des Innenzylinders
- Anzahl der Wasserdüsen am Düsenkranz
- Sprühwinkel der Wasserdüsen am Düsenkranz zur Ventilatorachse
- Sprühbild der Wasserdüsen am Düsenkranz
- Durchmesser des Düsenkranzes
- Position des Düsenkranzes
- Anzahl der Nukleatordüsen
- Position der Nukleatordüsen
- Luftdurchsatz des Ventilators
- Neigungswinkel der Schneekanone zur Horizontalen
- Position des Kompressors
- Position der Pumpe
- Verstellmöglichkeiten bezüglich Wasser- und Luftzufuhr

Da keinerlei Erfahrungen zum Bau von Schneekanonen in dieser Größe vorhanden sind, gilt es, den Prototyp möglichst variabel zu gestalten, um leicht Änderungen oder Adaptionen vornehmen zu können. Aus diesem Grund wird die Entscheidung getroffen, den Prototyp in einzelne Baugruppen aufzuteilen, um eine spätere Modifikation von einzelnen Komponenten leichter realisieren zu können. Diese Einteilung erfolgt in folgende Baugruppen:

- a) Messtechnik und Verrohrung inklusive Pumpe
- b) Schneekanonenkörper
- c) Aufhängung des Schneekanonenkörpers
- d) Vorrichtung zur Aufstellung der Schneekanone
- e) Kompressor

ad a)

Um die Schneeszeugung der Prototypenschneekanone möglichst reproduzierbar zu gestalten, ist es notwendig, messtechnische Einrichtungen für die Erfassung der einzelnen Messgrößen zu installieren. Dies soll in weiterer Folge auch Rückschlüsse ermöglichen, um bei veränderten Umgebungsbedingungen eine zufriedenstellende Schneeszeugung zu gewährleisten und diese auch reproduzieren zu können. Die Verrohrung mit der Messtechnik wird dem Anlagenschema des Berechnungsmodells (Abbildung 3-1) nachempfunden. Außerdem muss es möglich sein, die Prozessparameter (Drücke, Durchflüsse, Mischverhältnisse) zu variieren. Folgende Prozessgrößen gilt es zu erfassen und auch zu verändern:

- Luftdruck
- Luftmassenstrom
- Lufttemperatur (keine Variation nötig/möglich)
- Wassertemperatur (keine Variation nötig/möglich)
- Wassermassenstrom im Nukleator
- Wasserdruck im Nukleator
- Wassermassenstrom der Wasserdüsen (Variation nicht unbedingt nötig)
- Wasserdruck in den Wasserdüsen

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, gestaltet sich der Aufbau wie in Abbildung 3-2.

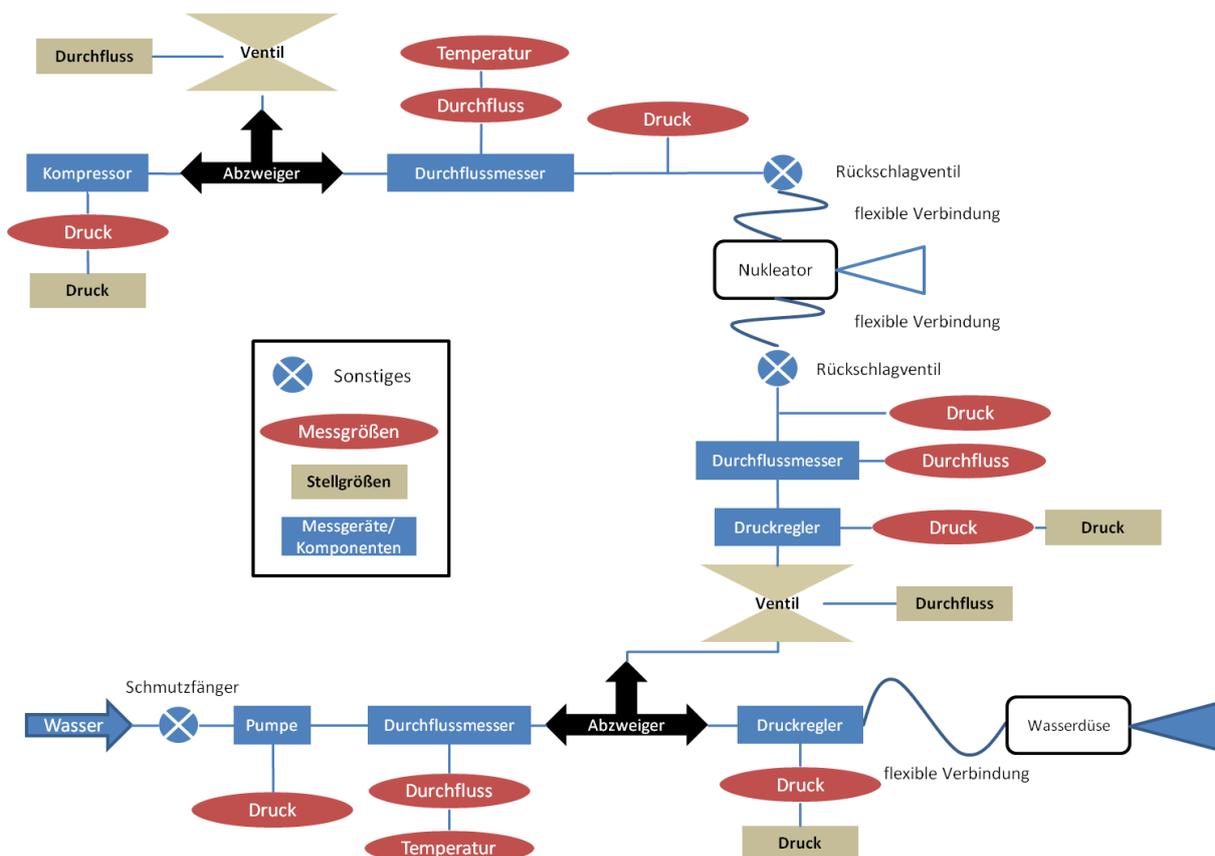


Abbildung 3-2: Aufbau der Verrohrung und Messtechnik

An dem Kompressor soll der Abgabedruck der Luft einstellbar sein. Durch diesen ergibt sich ferner in Abhängigkeit der Ansaugtemperatur der Massenstrom der Luft. Um den Massenstrom in weiterer Folge drosseln zu können, dient ein Nadelventil, mit dem Luft in die Umgebung abgelassen werden kann. Ein nachfolgender Durchflussmesser soll den Massenstrom sowie die Temperatur der Luft messen. Falls parallel keine Druckmessung durch das Gerät vorgenommen werden kann, ist eine Druckmessung mit einem Manometer vorgesehen. Abgesehen davon berücksichtigt eine nachfolgende Druckmessung den Druckabfall, der gegebenenfalls durch das Durchflussmessgerät verursacht wird. Ein darauffolgendes Rückschlagventil verhindert im Ernstfall bei einer Fehlfunktion das Eindringen von Wasser über die Mischkammer der Nukleatordüse in den Luftpfad und schützt somit die Messtechnik.

Das Wasser aus dem Hauswasseranschluss durchläuft zuerst einen feinmaschigen Filter, um einerseits die Messtechnik vor Schäden durch größere Partikel zu bewahren, andererseits ein Verstopfen der Düsen durch selbige zu verhindern. In der Pumpe erfolgt die Druckerhöhung des Wassers. Der Durchflussmesser nach der Pumpe erfasst den Massenstrom und die Temperatur des Wassers. Ein zweites Nadelventil regelt hier den Durchfluss zur Nukleatordüse. Im Pfad zur Nukleatordüse besteht die Möglichkeit einer Druckregelung über einen kleinen Druckminderer, anschließend erfolgt die Messung des Durchflusses mit einem Messgerät. Ähnlich wie beim Luftpfad wird nach der Durchflussmessung der Druck mittels Manometer erfasst, um auch den Druckabfall durch das Messgerät zu berücksichtigen. Das folgende Rückschlagventil verhindert das Eindringen von Luft in den Wasserpfad. Verfolgt man den Hauptstrom des Wassers weiter, besteht noch die Möglichkeit, den Druck mittels Druckregler vor den Wasserdüsen zu verändern. Eine Druckanzeige ist im Druckregler ebenfalls integriert.

ad b)

Der eigentliche Schneekanonenkörper beziehungsweise der Zylinder der Schneekanone soll möglichst variabel im Bezug auf schnell durchzuführende Geometrieänderungen am Prototyp aufgebaut sein. Es erwies sich als sinnvoll, die Geometrie des Zylinders auf den Rohrventilator aufzubauen, der ein Zukaufteil darstellt. Der Rohrventilator kann durch einen vorhandenen Flansch konstruktiv leicht mit weiteren Komponenten verbunden werden und es besteht bei einigen Ausführungsvarianten außerdem die Möglichkeit, die Drehzahl des Ventilators zu variieren, was im Hinblick auf den noch nicht fixierten Luftdurchsatz von Vorteil ist. Der Düsenkranz soll ebenfalls variabel aufgebaut sein und als einzelne Komponente angebracht werden. Damit ist sichergestellt, dass verschiedenste Düsenkonfigurationen getestet werden können, in dem der komplette Düsenkranz ausgetauscht wird. Außerdem sollen die Wasserdüsen am Düsenkranz austauschbar sein, um gegebenenfalls andere Düsen einzuschrauben und am gleichen Düsenkranz zu testen. Eine Variation der Düsenanzahl, indem man einzelne Düsen verschließen kann, ist ebenso von Vorteil.

ad c)

Für die Flexibilität der Wurfweite und der Fallzeit des Schnees soll neben der Drehzahl des Ventilators auch der Abwurfwinkel der Schneekanone verstellbar sein. Diese Eigenschaft soll in der Aufhängung der Schneekanone realisiert werden. Des Weiteren soll eine einfache Drehung der Schneekanone um 360 Grad möglich sein, um auf veränderte Windrichtungen optimal reagieren zu können.

ad d)

Für die Mobilität und Handlichkeit des gesamten Prototyps ist es wichtig, eine kompakte Bauart zu verwirklichen. Dies führt zu der Idee, die Baugruppe „Messtechnik und Verrohrung“ unterhalb der Kanone zu positionieren, damit diese gleichzeitig als Stand der ganzen Anlage dient. Außerdem sollen die Verbindungen leicht und schnell lösbar sein, um die Schneekanone rasch auf- und abbauen zu können.

ad e)

Da der erforderliche Durchsatz des Kompressors nur ungefähr abgeschätzt werden kann, wird der Entschluss getroffen, den Kompressor nicht fix zu verbauen, sondern in Form eines Standard-Druckluft-Kompressors mit Druckbehälter zuzukaufen. Ein Vorteil dieser Anordnung liegt insbesondere im einfachen Austausch des Aggregats, falls die abgegebene Luftmenge zu gering sein sollte. Des Weiteren ist eine integrierte Verstellung des Abgabedruckes der komprimierten Luft bei den meisten Modellen vorhanden.

Weitere Überlegungen betreffen die verwendeten Materialien des Prototyps. Aus Gründen der Verarbeitung und Korrosionsbeständigkeit lassen sich die Werkstoffe auf Aluminium oder Edelstahl eingrenzen.

### **Düsenkonfiguration**

Ein entscheidendes Konstruktionsmerkmal, das in dieser Planungsphase festgelegt wird, betrifft die Ausführung der Nukleatordüsen. Ein eigener Düsenkranz für diese erscheint zu komplex und zu aufwendig. Angesichts der Düsenverhältnisse (Anzahl der Nukleatordüsen zur Anzahl der Wasserdüsen) von existierenden Propellerkanonen und dem Größenverhältnis zum Prototyp sollten auch mit einer einzelnen Nukleatordüse genügend Eiskeime für den reduzierten Wasserdurchsatz produziert werden können. Da die Anzahl der Nukleatordüse(n) nun auf eine einzelne fixiert wird, muss die optimale Position dafür gefunden werden. Dies geschieht unter besonderer Beachtung der üblichen Wassertemperatur eines Hauswasseranschlusses (in Versuchen wurde ein Wert von ungefähr 11 °C ermittelt (vgl. [9])). Bei herkömmlichen Schneekanonen in Schigebieten wird vergleichsweise dazu Wasser mit weitaus geringeren Temperaturen (circa 0,5 bis 4 °C) verwendet. In Abbildung 3-3 ist zu sehen, dass sich das fein zerstäubte Wasser aus den Nukleatordüsen nach wenigen Zentimetern bereits mit den Tröpfchen aus dem Primärwasserstrom der reinen Wasserdüsen mischt.

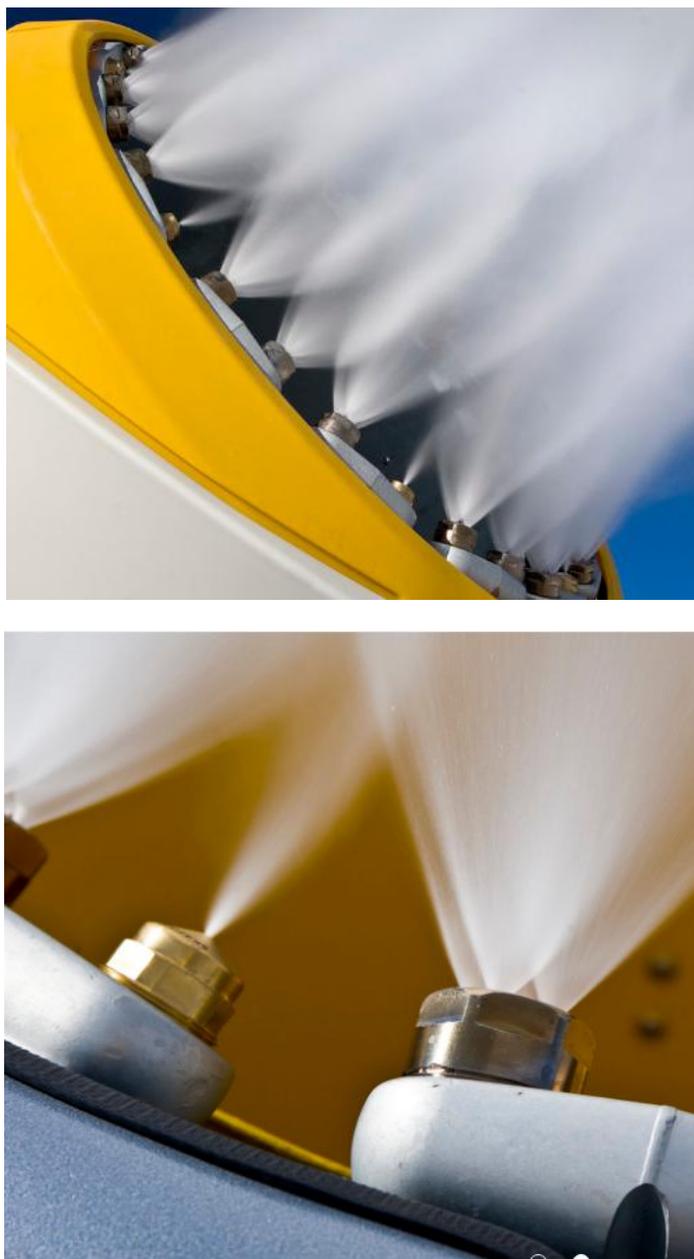


Abbildung 3-3: Düsenkonfiguration [9]

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der geringen Wassertemperatur von knapp über  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  das Wasser-Luftgemisch der Nukleatordüsen bei der Expansion schlagartig gefriert und so unmittelbar nach dem Düsenaustritt aus dem Nukleator die Eiskeime entstehen. Deshalb ist bei diesen Schneigeräten eine Mischung nach wenigen Zentimetern zulässig. Aufgrund der Wasserversorgung durch einen gewöhnlichen Hauswasseranschluss könnten sich mit dieser Zusammenstellung einige Probleme ergeben. Da die Temperatur des zur Verfügung stehenden Wassers in diesem Fall wesentlich höher ist, würde eine simultane Anordnung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht funktionieren. Durch die erhöhte Wassertemperatur ist nicht sichergestellt, dass die Tröpfchen aus dem Nukleator so schnell gefrieren und somit ihre Funktion als Eiskeime erfüllen. Der Abstand zwischen Nukleatordüse und Wasserdüsen muss deshalb vergrößert werden, um die nötige Abkühlung zu garantieren. Da der Prototyp nur eine Nukleatordüse besitzt, befindet sich die optimale Position auf der Mittelachse des Zylinders, um eine gleichmäßige Verteilung der Eiskeime garantieren zu können. Am Düsenkranz (am

Zylinderaustritt) befinden sich infolgedessen nur die reinen Wasserdüsen. Eine zu frühe Mischung von Nukleatortröpfchen und Wasserdüsenröpfchen gilt als problematisch, da nicht sicher ist, ab wann die Nukleatortröpfchen zu Eiskeimen gefrieren und ob die Wassertröpfchen der Wasserdüsen beim Zusammentreffen bereits ausreichend abgekühlt sind. Hat das Wasser aber Zeit zu verdunsten und kann ein längerer Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft stattfinden, sollte die nötige Abkühlung der Tröpfchen möglich sein, bevor der Kontakt mit den Wassertröpfchen aus den anderen Düsen erfolgt. Deshalb ist es notwendig, die Nukleatordüse schon einige Zentimeter nach dem Ventilator (in Auswurfriechung) zu positionieren. Diese Position soll gewährleisten, dass dem austretenden Wasser-Luftgemisch genügend Zeit zur weiteren Abkühlung bleibt (durch Verdunstung und Austausch mit der Umgebungstemperatur) und es garantiert zur Bildung von Eiskeimen kommt. Dieser positive Effekt gilt natürlich auch für die Wassertröpfchen aus den Wasserdüsen. Durch diese konstruktive Anordnung haben sie ebenso länger Zeit zum Abkühlen, bevor der Kontakt mit den Eiskeimen und die sogenannte Animpfung (siehe Abbildung 2-8) erfolgt. Somit basiert die Konstruktion der Düsenanordnung auf der Form einer einzelnen, zentralen Nukleatordüse und einem separaten Düsenkranz, der aus reinen Wasserdüsen besteht. Es sei noch erwähnt, dass eine Vorkühlung des Wassers für den ersten Bau eines Prototyps nicht in Frage kommt, da der erste Prototyp möglichst einfach aufgebaut sein soll. Erst wenn es mit diesem Aufbau nicht gelingen sollte, Schnee zu produzieren, würde der Einbau von zusätzlichen Komponenten eventuell in Erwägung gezogen werden.

Nach dieser ersten Planung und der Identifizierung der umzusetzenden Konstruktionsmerkmale erfolgen die Teilebeschaffung sowie die CAD-Konstruktion.

## 4 Ausführung und Konstruktion

Bei der konstruktiven Gestaltung der Schneekanone sollen die in Kapitel 3 erfolgten Überlegungen nun umgesetzt werden. Besondere Beachtung gilt dem flexiblen Aufbau und der dadurch begünstigten Austauschbarkeit einzelner Komponenten beziehungsweise den verschiedenen Einstellmöglichkeiten dieser Komponenten. Die Konstruktion erfolgt parallel zur Teilebeschaffung, wobei die Problematik darin besteht, die einzelnen Komponenten aufeinander abzustimmen. Ausgehend von den Abschätzungen aus den Berechnungen, ist der erste Schritt die Suche nach geeigneten Komponenten. Da diese als Zukaufteile nicht den exakten Auslegungsbereichen der Berechnung entsprechen, müssen Kompromisse eingegangen und die Konstruktion dahingehend stetig angepasst werden. Beispiele dafür sind unter anderem:

- Wasserdruck am Ausgang der Pumpe – maximaler Betriebsdruck der Druckregler
- Durchflussvariation des Wassers – Messbereich der Durchflussmesser
- Umgebungstemperaturen – Einsatztemperaturen der Messtechnik

### 4.1 Aufbau des Prototyps

Der gesamte Prototyp ist im Wesentlichen aus drei einzelnen Baugruppen aufgebaut (vgl. Kapitel 3.3):

- Schneekanonenkörper und Aufhängung
- Messtechnik und Verrohrung inklusive Pumpe
- Vorrichtung zur Aufstellung der Schneekanone

Hinzu kommt die Komponente „Kompressor“ als einzelnes Zukaufteil.

#### 4.1.1 Schneekanonenkörper und Aufhängung

Da diese Baugruppe am umfangreichsten ausgefällt, erfolgt die Beschreibung anhand der einzelnen Unterbaugruppen, um die Übersichtlichkeit zu bewahren.

##### Schneekanonenkörper

Der Aufbau beginnt mit der Suche nach einem geeigneten Ventilator als fertiges Zukaufteil. Mit diesem Ventilator als Basis wird die Geometrie des Zylinders der Schneekanone vorgegeben. Um den Anforderungen aus dem Lastenheft, welche die Handlichkeit und die kompakte Größe der Schneekanone betreffen, gerecht zu werden, wird nach einem Ventilator mit einem Innendurchmesser von circa 300 bis 400 mm gesucht. Weitere Kriterien sind ein angemessener Luftdurchsatz, der im besten Fall noch regelbar ist, und die Möglichkeit zum einfachen Anbau weiterer Teile auf diesem Ventilator. Unter Beachtung dieser Eigenschaften fällt die Wahl auf einen Rohrventilator mit integriertem Flansch und einem Innendurchmesser von 310 mm (vgl. Abbildung 4-1). Der Hersteller bietet außerdem ein Modul zur Drehzahlregelung an, welches leicht eingebaut werden kann. Der Ventilator wiegt laut Hersteller 6,5 kg, hat einen Stromverbrauch von 145 W und liefert einen maximalen Luftdurchsatz von 2230 m<sup>3</sup>/h. Dies entspricht bei gegebenem Innendurchmesser einer Geschwindigkeit von ungefähr 8 m/s, mit der die Luft durch den Zylinder strömt.



Abbildung 4-1: Rohrventilator [11]

An dem Flansch wird ein zylindrisches Zwischenstück befestigt, in welches später die Nukleatordüse eingebaut werden soll. Auf dieses Zwischenstück folgt das Endstück des Schneekanonenkörpers (vgl. Abbildung 4-2). Dieses Endstück wird konisch ausgeführt (Durchmesserreduktion von 310 auf 260 mm über eine Länge von 200 mm), um einerseits die Geschwindigkeit der durchströmenden Ventilatorluft zu erhöhen und andererseits radial am Umfang Platz für den Düsenkranz mit den Wasserdüsen zu schaffen.

Als Material kommt dafür nur Edelstahl infrage, da es sowohl leicht zu bearbeiten ist und auch die nötige Festigkeit aufweist, um als tragendes Element für weitere Anbauteile zu dienen.

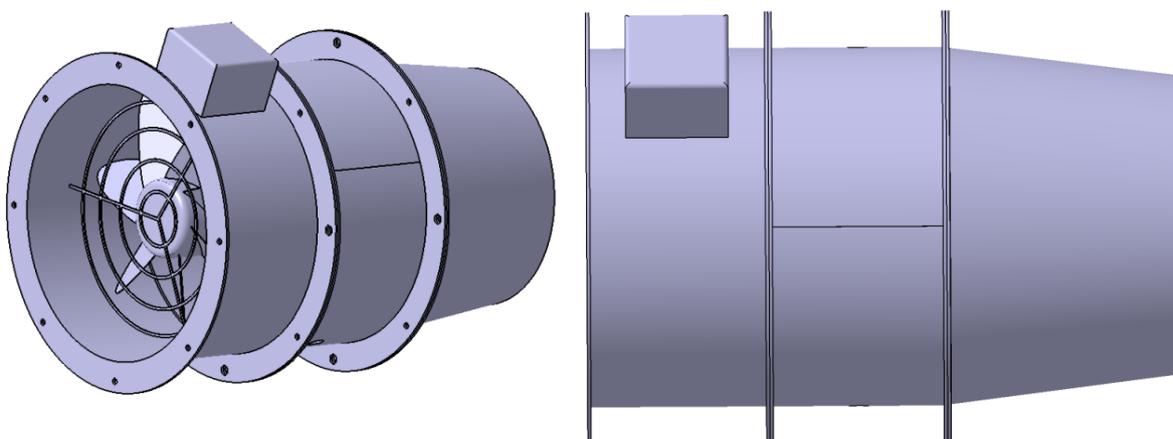


Abbildung 4-2: Schneekanonenkörper

## Nukleatordüse

Die Positionierung der Nukleatordüse wurde bereits im Rahmen der Erstplanung festgelegt. Da diese Düse zwei Zuleitungen benötigt (eine für die Luft und eine für das Wasser), gelang die konstruktive Umsetzung wie in Abbildung 4-3 dargestellt.

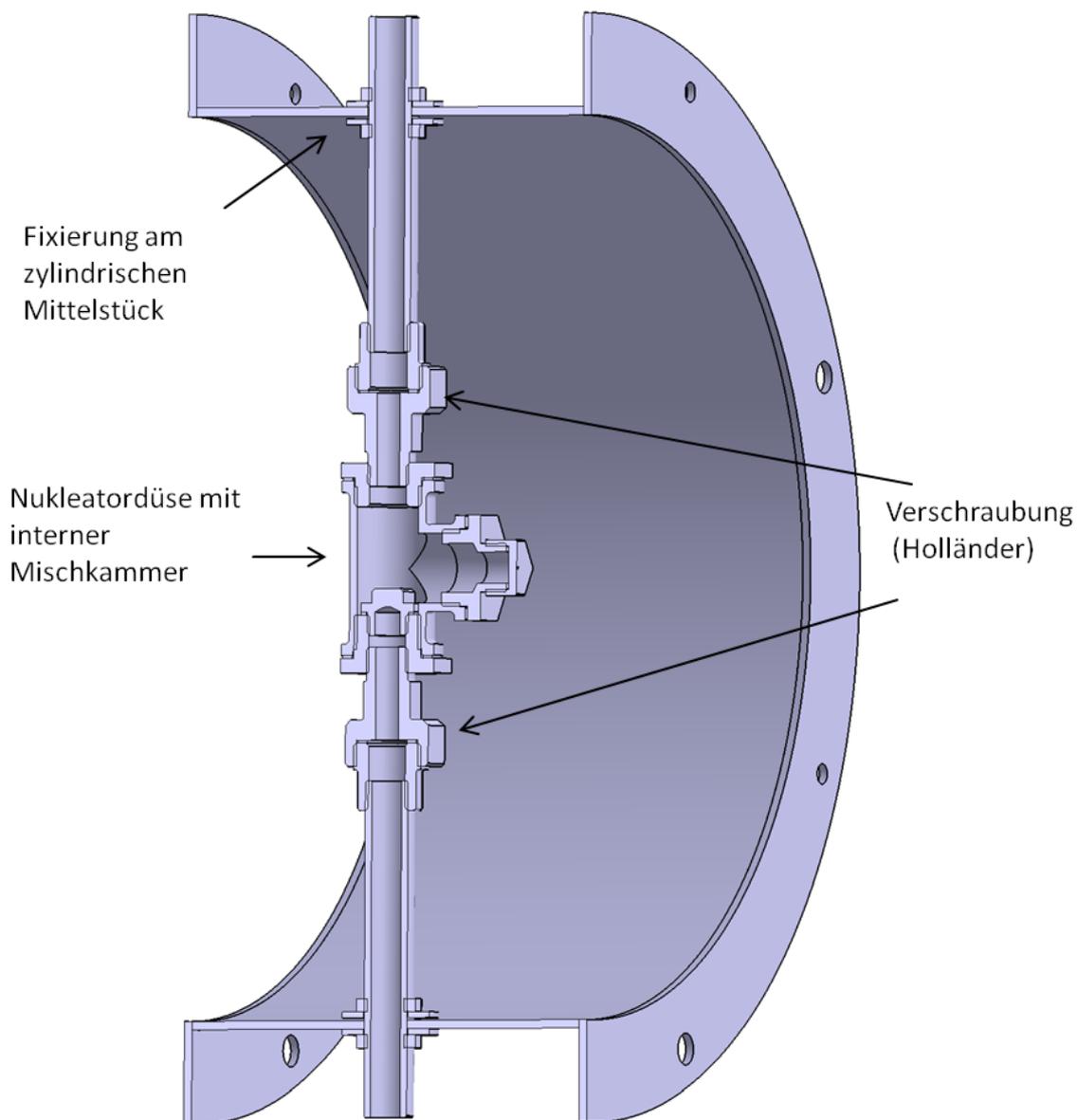


Abbildung 4-3: Einbau Nukleatordüse

Für die Zuleitungen werden 3/8-Zoll-Rohre gewählt, die an der Zylinderoberfläche des Mittelstücks des Schneekanonenkörpers mit Muttern verschraubt werden und so die Nukleatordüse fixieren. Zum raschen und einfachen Austausch der Düse werden noch Verschraubungen (sogenannte Holländer) integriert.

Die Nukleatordüse an sich, in der die Mischung von Luft und Wasser erfolgen soll, wird für den ersten Versuch aus einem T-Stück und wechselbarer Verschlusskappe mit einfacher Düsengeometrie (kreisrunde Bohrung) zusammgebaut (siehe Abbildung 4-4).

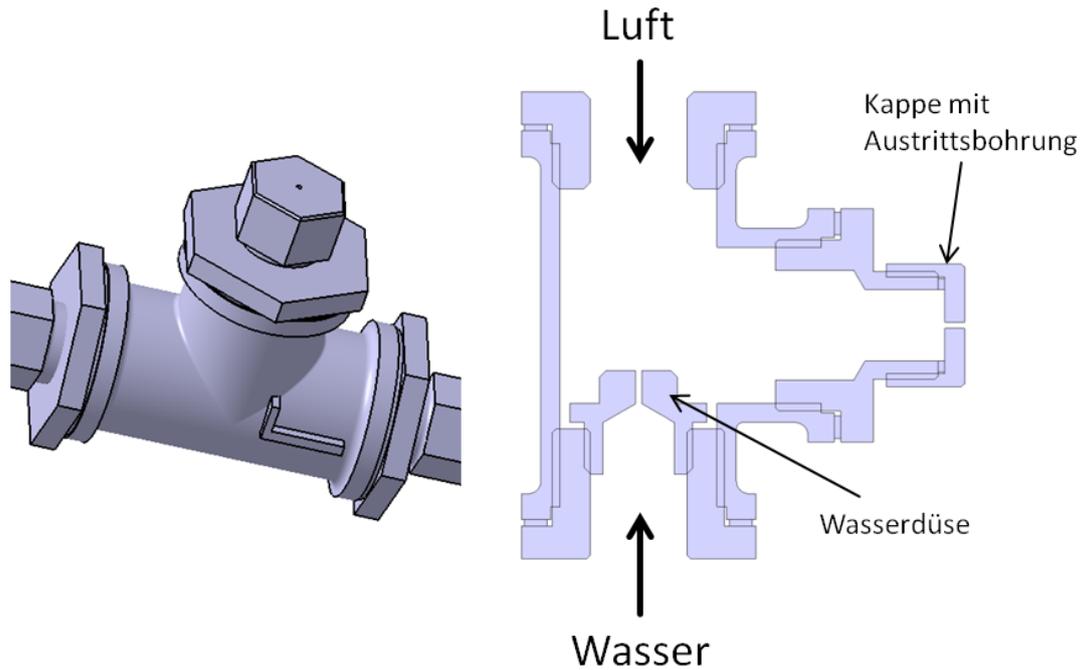


Abbildung 4-4: Nukleatordüse Eigenbau

In der dargestellten Nukleatordüse erfolgt in Einbaulage die Einströmung der Luft von oben, die des Wassers von unten. Verwendet wird dazu ein handelsübliches T-Stück mit 3/4-Zoll-Innengewinde. In der Einschraubung auf der Wasserseite ist zusätzlich eine selbstgefertigte Düse angebracht. Durch diese Düse soll das Wasser zerstäubt in die Mischkammer gelangen, sich dann mit der Luft vermischen und mit dieser nach außen befördert werden. Durch die Öffnung der aufgeschraubten Kappe soll das Gemisch in die Umgebung expandieren. Um die Düsenkonfiguration des Nukleators zu verändern, werden mehrere dieser Düsen, die untereinander leicht ausgetauscht werden können, mit unterschiedlich großen Bohrungen angefertigt. Die Einschraubungen der Luft- und Wasserzufuhr werden ebenfalls selbst gefertigt, damit eine Abdichtung mit einem Dichtring zum T-Stück realisierbar ist und ein schnelles Ein- und Ausschrauben ermöglicht wird, um die im Inneren befindliche Wasserdüse bei Bedarf zu wechseln.

Diese Nukleatordüse erwies sich in den ersten Tests als ungeeignet, worauf die selbstgebaute Nukleatordüse durch einen zugekauften Düsenkörper mit wechselbaren Aufsätzen ersetzt wurde. Eine detailliertere Erläuterung hierzu findet sich in Kapitel 5.2. Der zugekaufte Düsenkörper hat zudem den Vorteil, dass sowohl Düsen mit Innenmischung, als auch Düsen mit Außenmischung angebaut werden können.

### Düsenkranz

Am Düsenkranz sind die eigentlichen Wasserdüsen angebracht. In diesem Bauteil werden einige Variationsmöglichkeiten realisiert. Die Gestaltung erfolgt in Form einer Schweißkonstruktion. Auf einem Kreisring mit integriertem Flanschbild ist ein U-Profil aufgeschweißt, in dem das Wasser zu den Düsen strömt (siehe Abbildung 4-5).

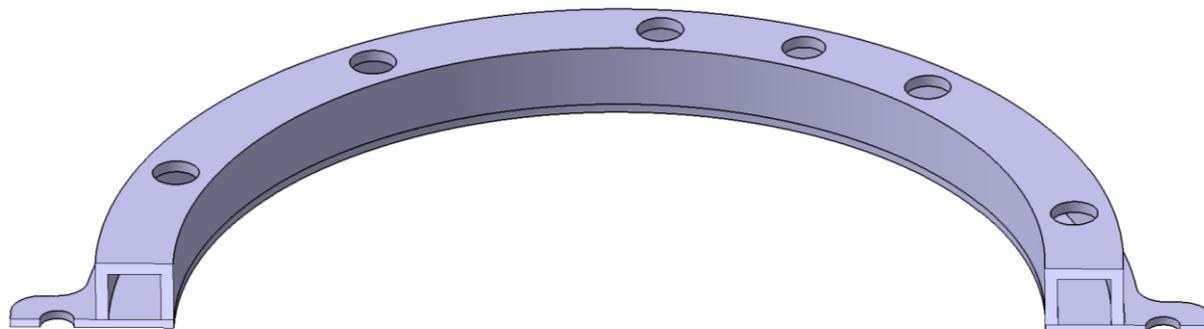


Abbildung 4-5: Schweißkonstruktion Düsenkranz

Der Düsenkranz wird in weiterer Folge mit Schweißnippel versehen, auf denen die Wasserdüsen mit Überwurfmutter befestigt werden können. Als Düsenausführung werden Kugeldüsen (siehe Abbildung 4-6) gewählt und die Anzahl der Wasserdüsen wird in einer ersten Auslegung auf zehn Stück festgelegt.

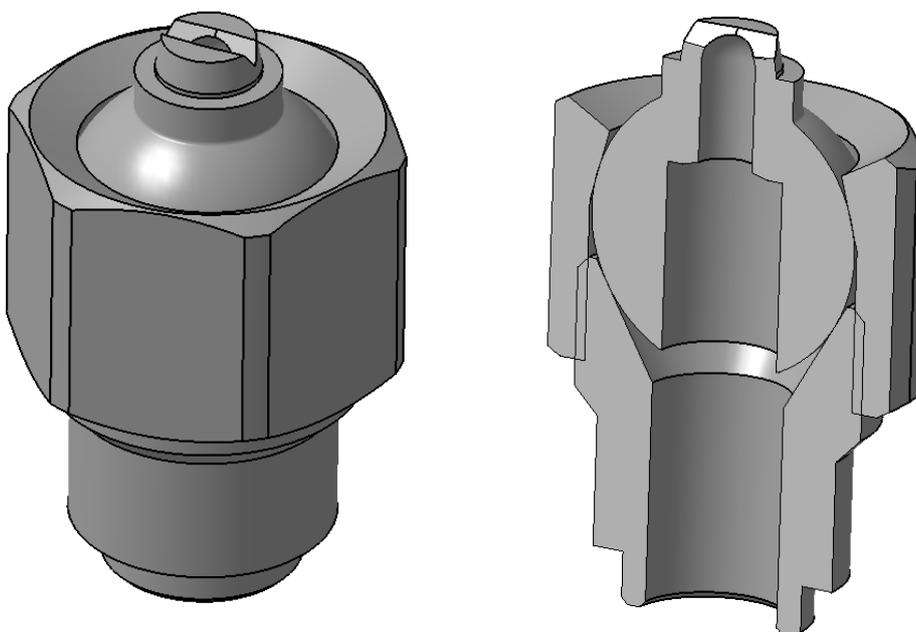


Abbildung 4-6: Kugeldüse mit Schweißnippel und Überwurfmutter

Eine größere Düsenanzahl als zehn wäre problematisch, weil sich bei einer zu engen Aneinanderreihung der Düsen die einzelnen Wasserstrahlen innerhalb einer kürzeren Distanz schon überlappen würden, was unweigerlich zur Bildung von größeren Tröpfchen führt. Falls sich im Betrieb herausstellen sollte, dass zehn Wasserdüsen zu viel sind, können durch die Anordnung mit Überwurfmutter einzelne Düsen leicht verschlossen werden. Über einen weiteren Schweißnippel erfolgt der Wasserzulauf in den Düsenkranz mit einem angebrachten Schnellverschluss (siehe Abbildung 4-7).

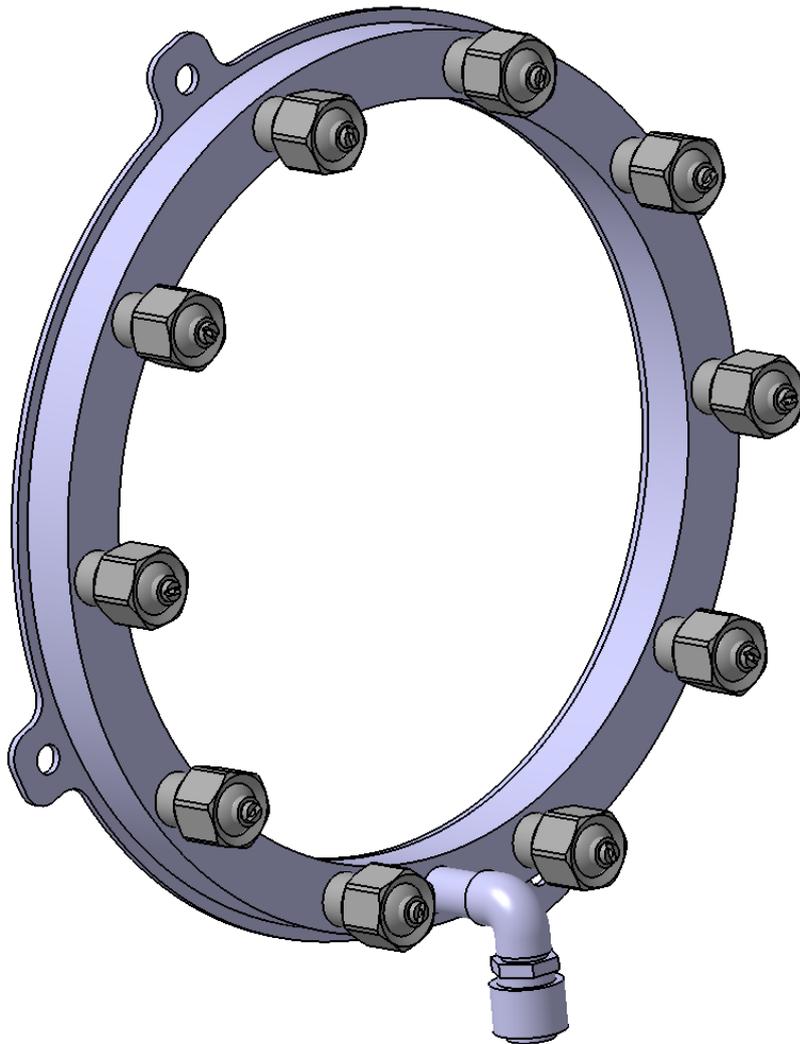


Abbildung 4-7: Düsenkranz

Als Halterung für den Düsenkranz, der leicht austauschbar und axial verschiebbar sein sollte, erscheint eine Befestigung über Gewindestangen am Flansch als sinnvoll. Die vier Gewindestangen werden mit dem Zwischenstück des Schneekanonenkörpers mit Muttern verschraubt und verfügen so über die nötige Stabilität, um den Düsenkranz zu tragen (siehe Abbildung 4-8). Mit dieser Anordnung kann in den experimentellen Untersuchungen der Düsenkranz in Achsrichtung an verschiedenen Positionen variabel fixiert werden, um die am besten geeignete Position für den Mischungspunkt der Eiskeime aus den Nukleatordüsen und dem Wasserstrom aus den Wasserdüsen zu finden. Um den Abstand vom Flansch zu definieren, werden einfache Hülsen auf die Gewindestangen geschoben und der Düsenkranz anschließend angeschraubt. Alternativ kann der Düsenkranz auch nur mit Muttern an den

Gewindestangen (ohne Hülsen) verschraubt werden.

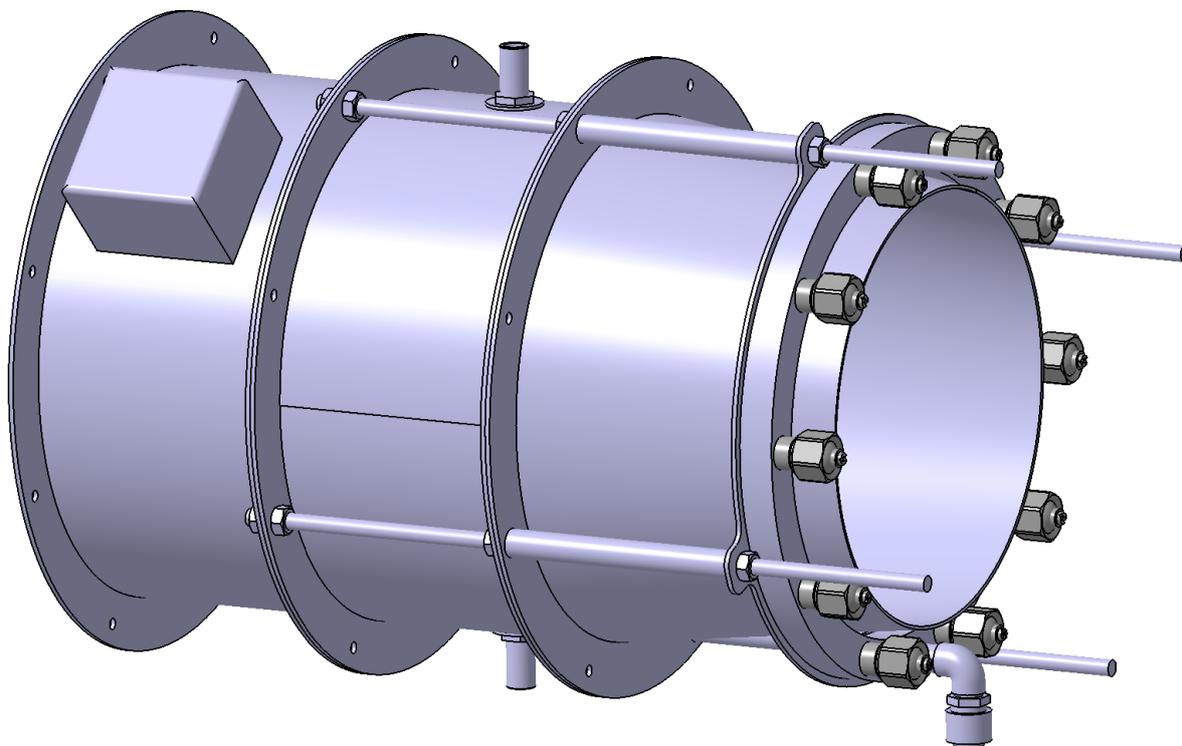


Abbildung 4-8: Anbringung Düsenkranz

Der Durchmesser des Düsenkranzes ist durch die bereits angebauten Komponenten fixiert. Der minimale Durchmesser kann nicht kleiner als das konische Endstück des Schneekanonenkörpers ausgeführt werden, und der maximale Durchmesser ist vom Lochbild am Flansch durch die Befestigungslösung mit Gewindestangen begrenzt (siehe Abbildung 4-9). Bei einer umgekehrten Anbindung (Laschen für die Befestigung radial innenliegend und Düsenkranz radial außenliegend) wäre der Düsenkranz zu groß und damit wahrscheinlich auch das Gewicht für eine mittige Position zu schwer.

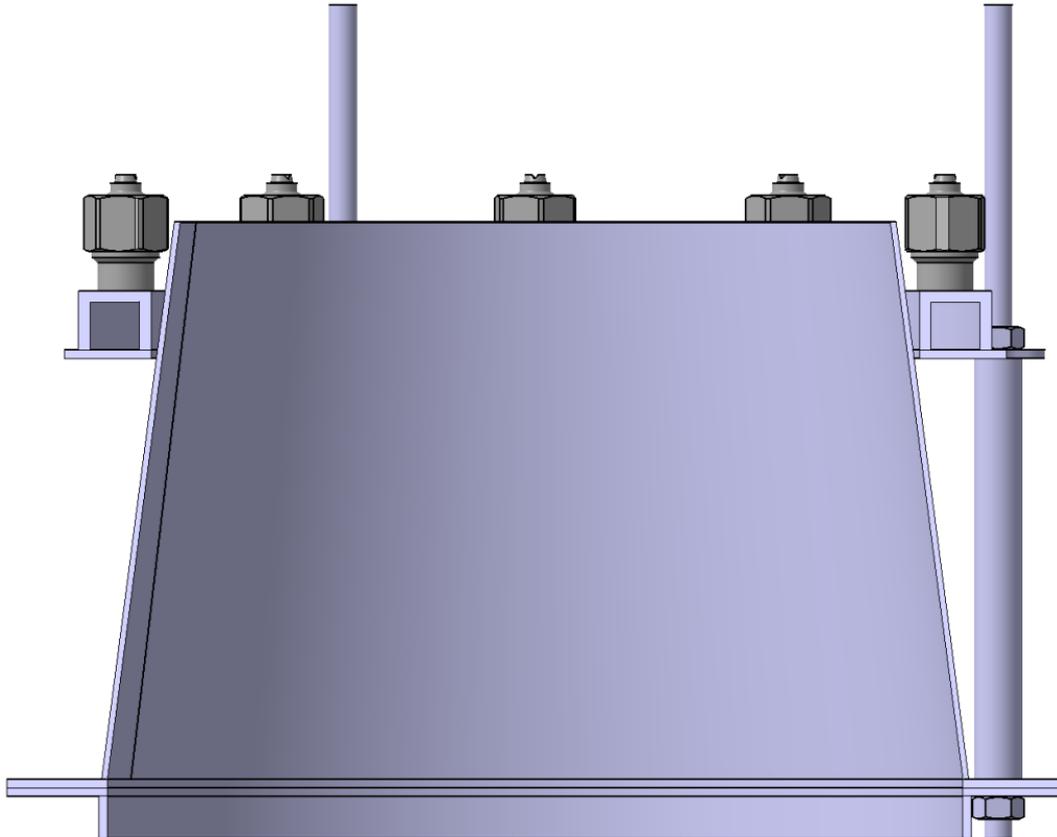


Abbildung 4-9: Düsenkranz und Konus

Diese Konstruktion bringt folgende Vorteile mit sich:

- Der gesamte Düsenkranz ist im Ganzen leicht austauschbar.
- Der gesamte Düsenkranz kann in seiner axialen Position durch die Befestigung mit den Gewindestangen über Abstandshülsen oder Muttern einfach variiert werden.
- Eine einfache Variation der Düsenanzahl ist möglich, weil einzelne Düsen durch die Verschraubung mit Überwurfmutter leicht mit Stahlkugeln (anstatt der Kugeldüsen) verschlossen werden können (siehe Abbildung 4-10).
- Durch die Kugeldüsen lässt sich der Winkel des austretenden Wasserstrahls individuell einstellen.
- Durch die Befestigung der Kugeldüsen mit Überwurfmutter können die Düsen leicht ausgetauscht werden und durch andere Modelle (Querschnittsfläche der Düsenöffnung, Sprühwinkel, Sprühbild etc.) ersetzt werden.

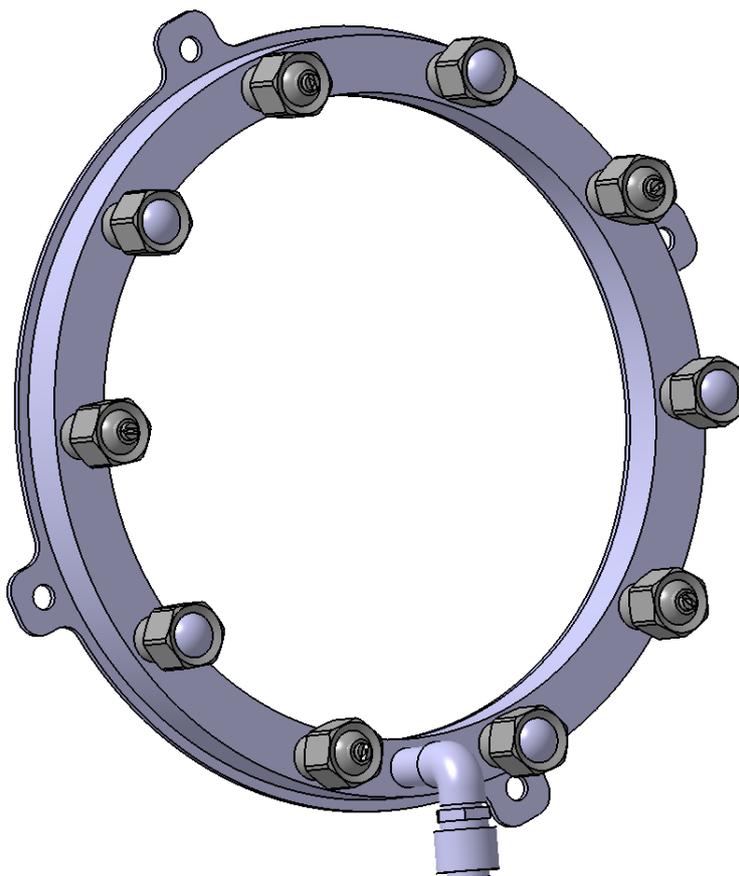


Abbildung 4-10: Düsenkranz mit teilweise verschlossenen Düsen

### **Aufhängung**

Die Aufhängung der Schneekanone sollte so gestaltet sein, dass sich der Abwurfwinkel der Kanone leicht verändern lässt. Es erweist sich als günstig den bereits am Ventilator vorhandenen Flansch abermals zu nutzen. An den Flansch des Ventilators (am Lufteintritt der Schneekanone) werden Laschen mit angeschweißten Hülsen angeschraubt, um so die Kanone in diesem Punkt drehbar lagern zu können. Der zweite Punkt der Aufhängung erfolgt abermals über zwei Hülsen mit Innengewinde, die radial am Umfang des zylindrischen Mittelstücks des Schneekanonenkörpers angeschweißt werden (siehe Abbildung 4-11).

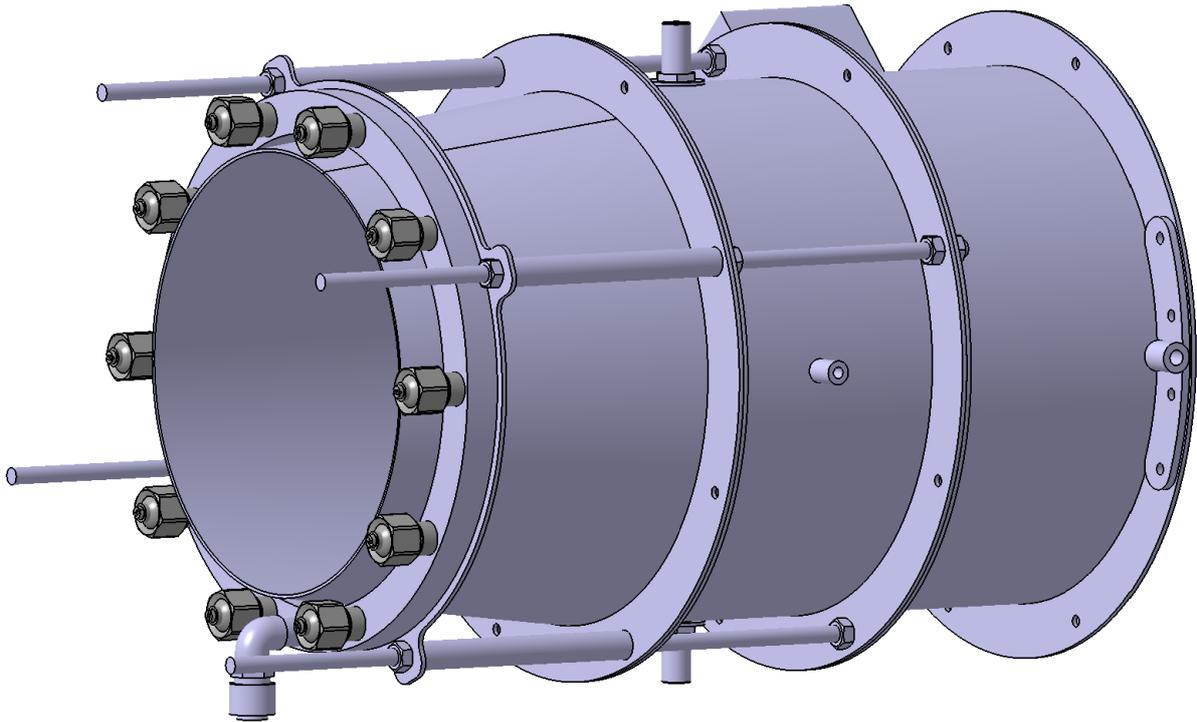


Abbildung 4-11: Aufhängung des Schneekanonenkörpers mit Hülsen

Zur Aufnahme dient ein Rahmen, der aus quadratischen Aluminiumprofilen aufgebaut ist (siehe Abbildung 4-12). In diesem Fall fällt die Werkstoffwahl auf Aluminium, um im Vergleich zu einer Edelstahlkonstruktion das Gesamtgewicht geringer zu halten. Aluminiumprofile sind zudem kostengünstiger und weisen die nötige Stabilität sowie eine gute Schweißbeignung auf.

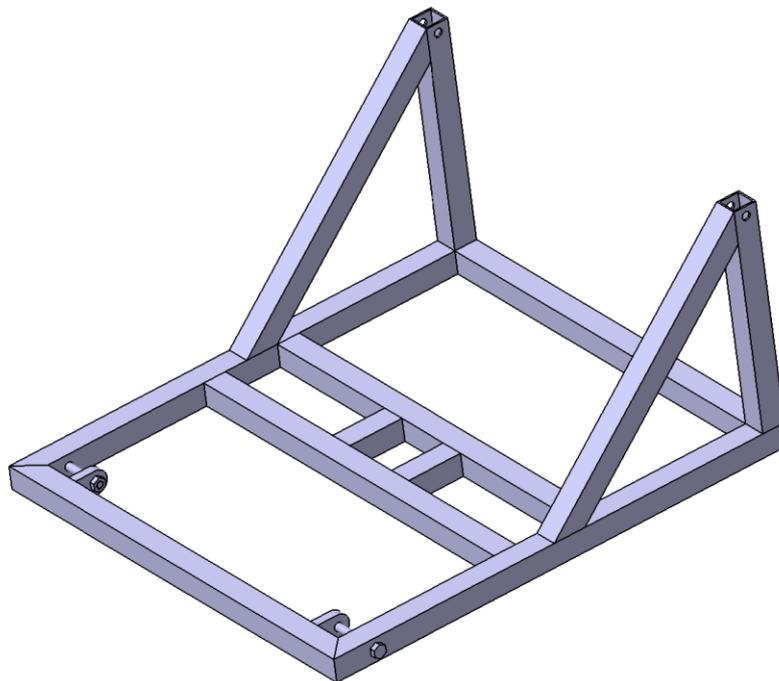


Abbildung 4-12: Rahmen für den Schneekanonenkörper

Um eine Variation der Neigung zuzulassen, werden verstellbare Gasdruckfedern eingesetzt und mit dem Rahmen und dem Schneekanonenkörper über die angeschweißten Hülsen am Mittelstück verbunden. Die Gasdruckfedern sind über einen Handschalter zu betätigen. Durch diese Konstruktion ist eine Neigung von 0 bis etwa  $30^\circ$  möglich (siehe Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14).

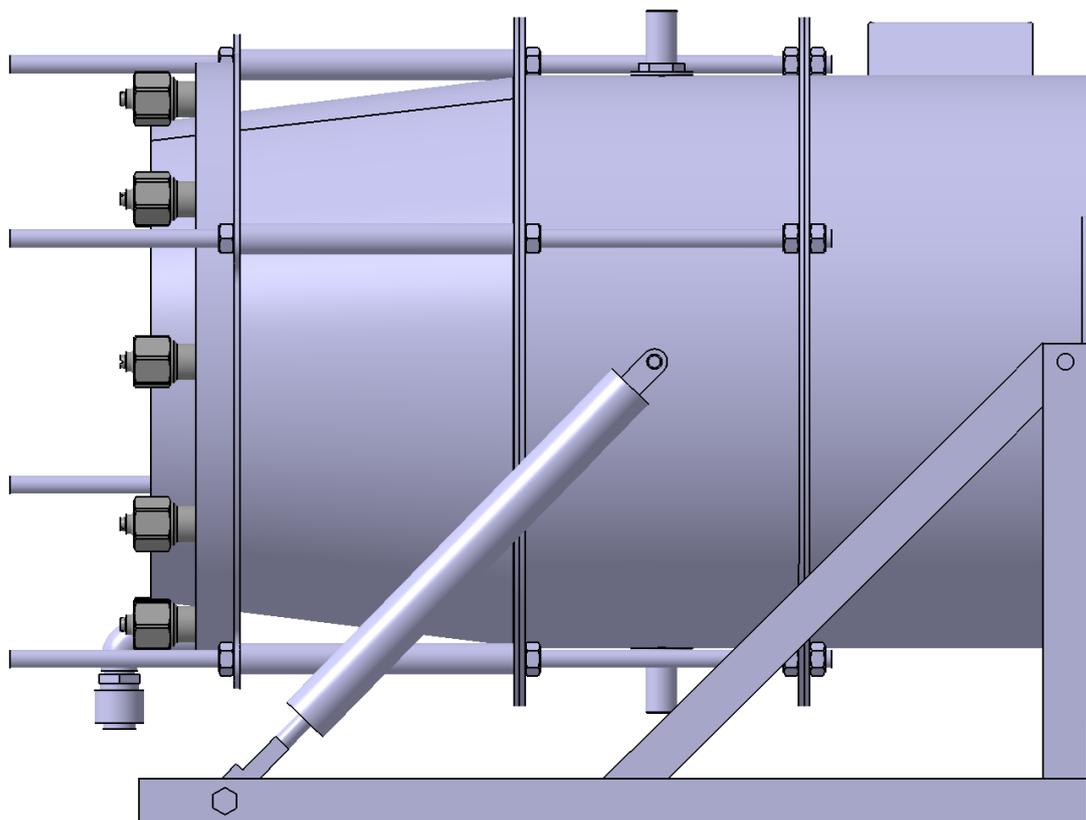


Abbildung 4-13: Eingefahrene Gasdruckfedern – waagrechte Position

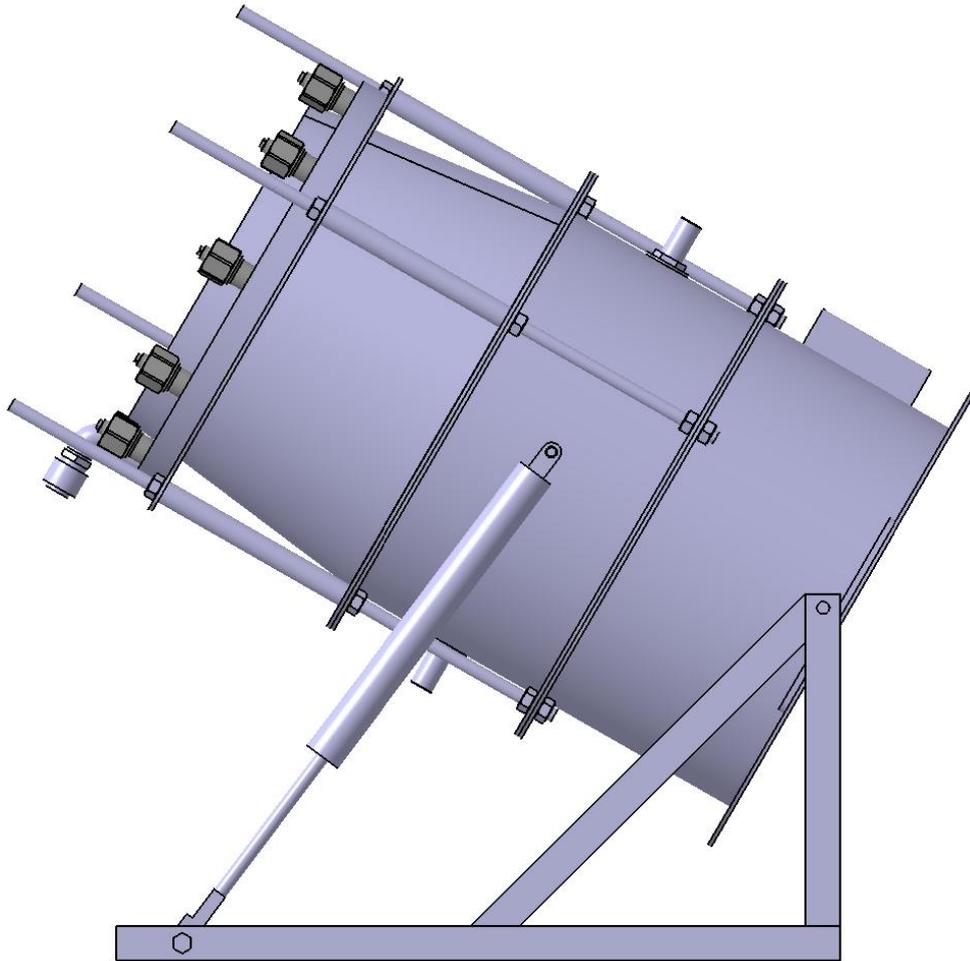


Abbildung 4-14: Ausgefahrene Gasdruckfedern – Neigung etwa 30 °

Die finale Konstruktion des Rahmens wird in Kombination mit der Konstruktion der gesamten Aufstellung erstellt („Messtechnik und Verrohrung“ inklusive Pumpe und „Vorrichtung zur Aufstellung der Schneekanone“). Eine Abstimmung der einzelnen Bauteile aufeinander ist nötig, um eine einfache und solide Verbindung der einzelnen Baugruppen und einen stabilen Stand (besonders hinsichtlich der Schwerpunkte) zu gewährleisten. Deshalb wurden während der Konstruktion laufend kleine Änderungen der Geometrie vorgenommen.

#### 4.1.2 Messtechnik und Verrohrung

Der Aufbau der Verrohrung und der Messtechnik ist der Abbildung 3-2 aus der ersten Planungsphase nachempfunden. Die gesamte Verrohrung inklusive der Messtechnik und der Pumpe werden auf einem Rahmen aus quadratischen Aluminiumprofilen aufgebaut (siehe Abbildung 4-15). Als Material wird wiederum Aluminium gewählt, um eine möglichst leichte Konstruktion zu erhalten. Damit Umbauarbeiten und spätere Adaptionen an der Verrohrung einfacher durchzuführen sind, werden hier ebenfalls Verschraubungen (Holländer) eingebaut.

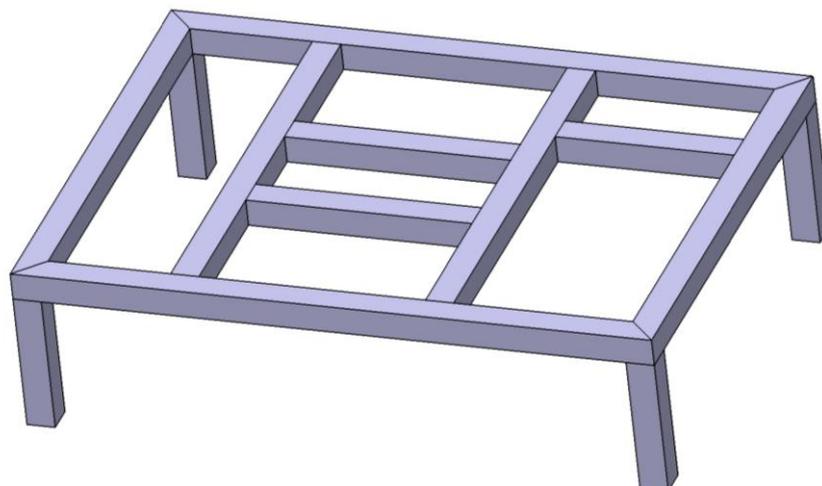


Abbildung 4-15: Rahmen für die Verrohrung

Der gesamte Aufbau der Baugruppe „Messtechnik und Verrohrung“ ist in Abbildung 4-16 und in Abbildung 4-17 zu sehen.

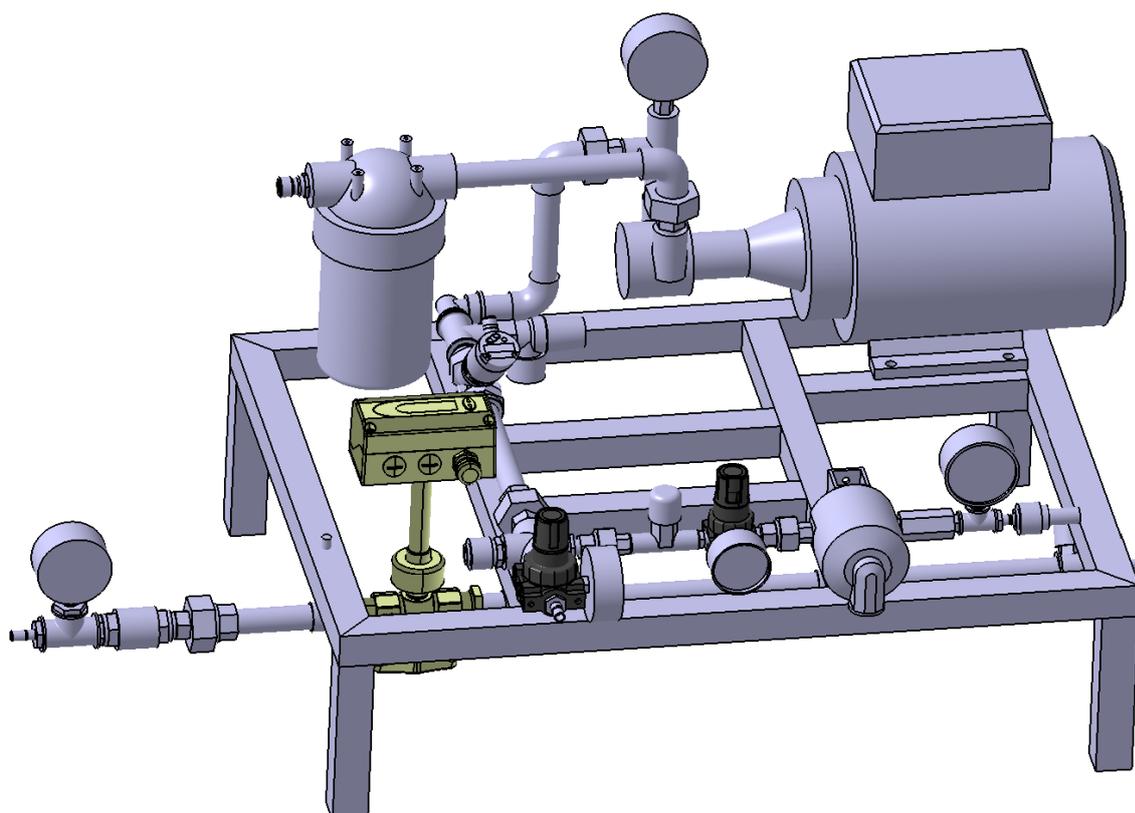


Abbildung 4-16: Verrohrung

Die Pumpe ist zuständig für die Druckerhöhung im Wasserpfad und liefert je nach Durchfluss einen Druck von bis zu 18 bar. Hierbei handelt es sich um eine Drehschieberpumpe mit einem

550 W starken Elektromotor als Antrieb. Der Vorteil dieser Pumpenart ist, dass sie im Gegensatz zu einer Kolbenpumpe nur geringe Volumenstrompulsationen in den Leitungen verursacht. Eine Kreiselpumpe wiederum, die auch einen konstanten Volumenstrom ohne Pulsationen liefern würde, bewältigt bei gegebenem Durchfluss die benötigte Druckerhöhung nicht.

Der Wasseranschluss erfolgt über eine handelsübliche Steckverbindung an einem Gartenschlauch. Bevor das Wasser in die Pumpe gelangt, durchströmt es einen feinmaschigen Filter mit 50  $\mu\text{m}$ , in dem kleinste Teilchen und Partikel zurückgehalten werden, damit weder Düsen verstopft, noch die Messtechnik beschädigt werden kann. Auf der Pumpe befindet sich ein Manometer, an dem der Eingangsdruck des Wassers gemessen wird.

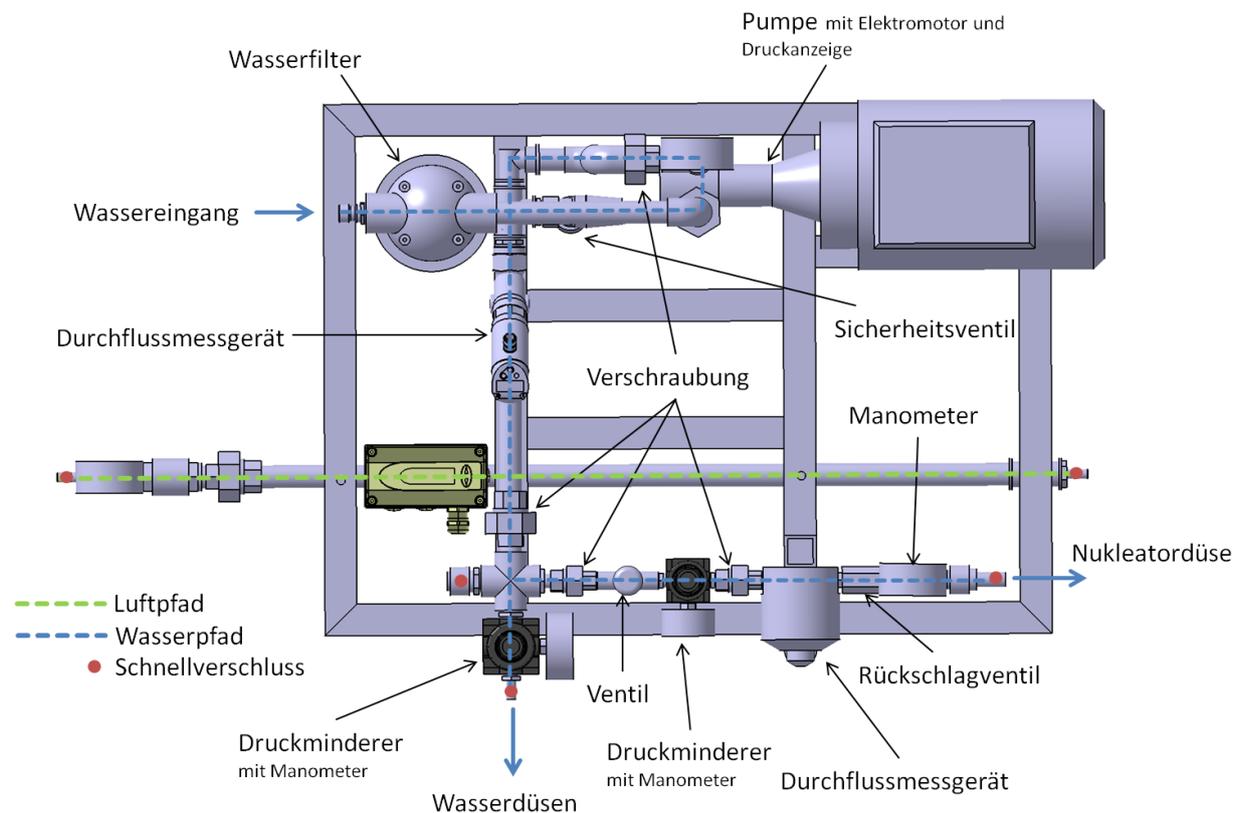


Abbildung 4-17: Verrohrung von oben

Da die Druckminderer bei den vorliegenden Wasserdurchsätzen einen maximalen Betriebsdruck von lediglich 10 bar zulassen, wurde zusätzlich ein Sicherheitsventil (vor der Durchflussmessung) installiert, um Beschädigungen der Druckminderer zu vermeiden. Aufgrund dieser Anordnung ist der maximale Wasserdruck der Anlage auf 10 bar begrenzt. Durch die beiden Druckminderer kann anschließend der Wasserdruck in den einzelnen Pfaden zum Nukleator beziehungsweise zum Düsenkranz nach Bedarf reduziert werden. Mit dem angebrachten Manometer wird die Einstellung erleichtert. Die durch den Nukleator fließende Wassermenge ist direkt durch das Ventil und indirekt über den kleineren Druckminderer einstellbar. Die Messtechnik, zu der ein Durchflussmesser für den gesamten Wasservolumenstrom und ein eigener Durchflussmesser für den Wasservolumenstrom im Nukleatorpfad gehören, wird im Kapitel 4.2 genauer behandelt.

Am Luftpfad (siehe Abbildung 4-18) ist als Einstellmöglichkeit neben dem Kompressionsenddruck nur eine Reduzierung des Luftdurchsatzes möglich. Durch das angebrachte Nadelventil kann nach Bedarf Luft in die Umgebung abgelassen werden, um so den Massenstrom zu reduzieren. Weiter im Luftpfad sind das Messgerät für den Luftdurchsatz und die Lufttemperatur sowie anschließend ein Manometer integriert. Das Manometer erfasst den Luftdruck, mit der die Luft in die Nukleatordüse strömt. Wegen der benötigten Ein- und Auslaufstrecke des Messgeräts beträgt die Gesamtlänge des Luftpfads etwa 1 m. Um diese für den Transport zu reduzieren, wird hier eine Verschraubung eingebaut. Im zerlegten Zustand verkürzt sich die maximale Länge um circa 20 cm. Zudem ist es möglich, den gesamten Luftpfad vom Rahmen zu lösen.

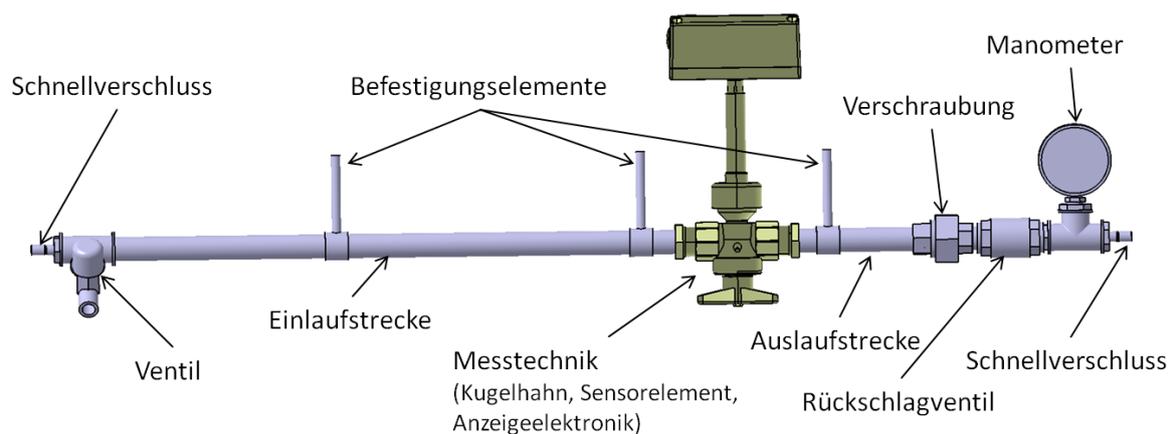


Abbildung 4-18: Luftpfad

#### 4.1.3 Verbindungskonstruktion der Schneekanone

Zur Koppelung der einzelnen Baugruppen werden Verbindungselemente konstruiert (siehe Abbildung 4-19). Der obere Teil der Baugruppe dient als Verbindungselement zum Rahmen, der den Schneekanonenkörper trägt. Das untere Ende der Konstruktion ist als Käfig ausgeführt und wird mit dem Rahmen der „Messtechnik und Verrohrung“ verschraubt.

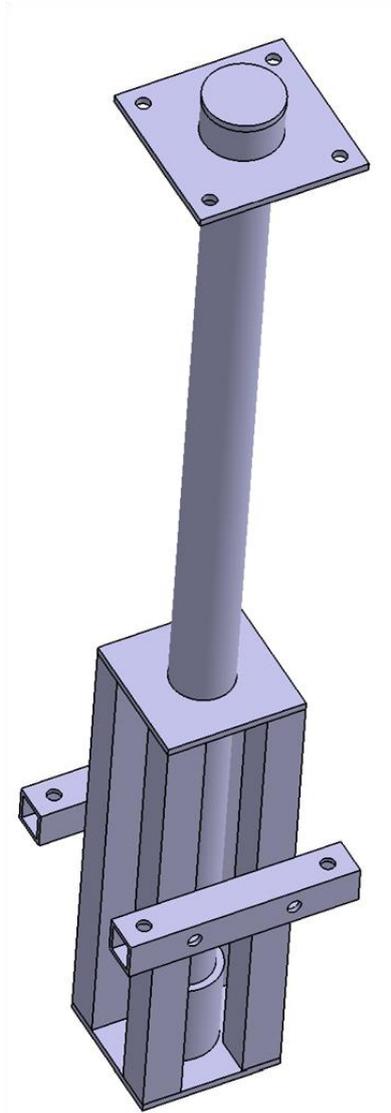


Abbildung 4-19: Verbindungselemente

Der Käfig dient in Folge als Aufnahme für ein Aluminiumrohr. Auf das Aluminiumrohr wird das Verbindungselement zum Rahmen des Schneekanonenkörpers gesteckt und mit selbigem verschraubt (siehe Abbildung 4-20).

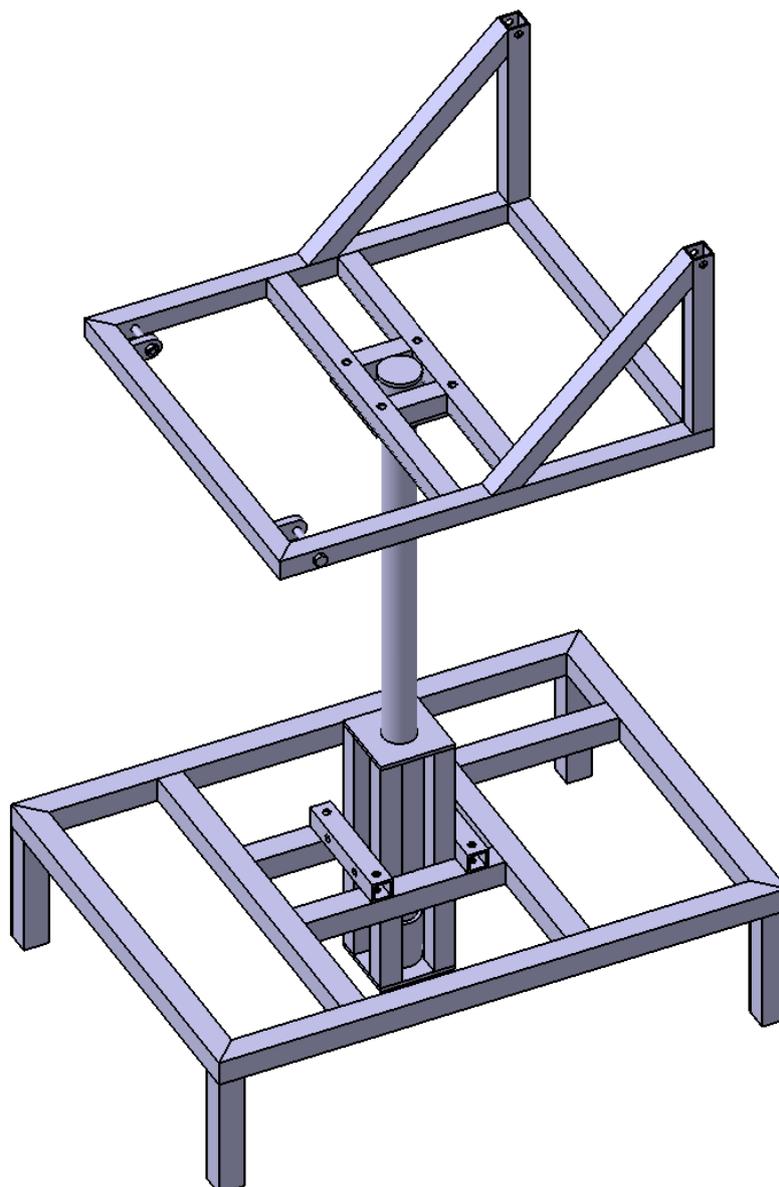


Abbildung 4-20: Verbindung der Baugruppen

Die einfache Steck- beziehungsweise Schraubverbindung ermöglicht neben der problemlosen Zerlegung der Anlage gleichzeitig eine Drehung der Schneekanone um  $360^\circ$ , um nach dem Aufstellen je nach optimaler Windrichtung beschneien zu können.

In den Rahmen der Messtechnik und Verrohrung können FüÙe eingeschoben werden, die aus Aluminiumprofilen bestehen. Diese sollen einen stabilen Stand garantieren. Der Kompressor findet unterhalb des Rahmens Platz.

Abbildung 4-21 zeigt den gesamten Zusammenbau der Schneekanone. Als Größenvergleich ist ein menschlicher Dummy mit einer KörpergröÙe von 180 cm dargestellt.

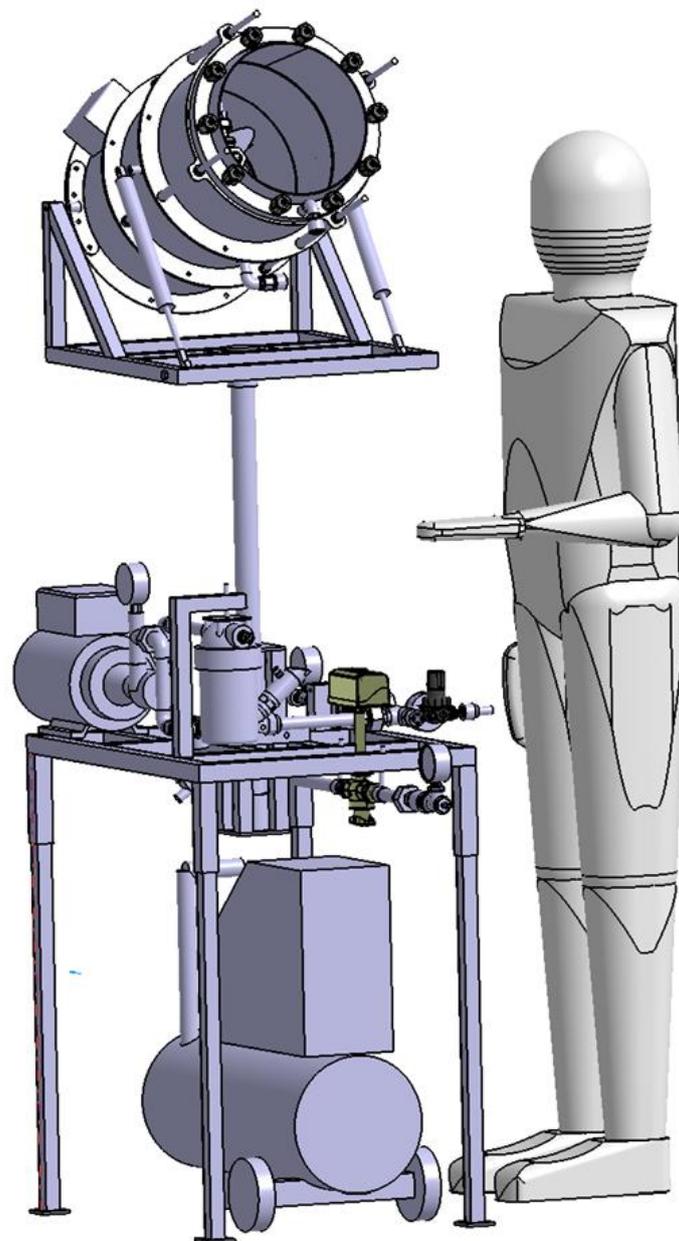


Abbildung 4-21: Gesamtzusammenbau

#### 4.1.4 Weitere Konstruktionselemente

Die Verbindung zwischen dem Wasser- und Luftpfad der Baugruppe „Messtechnik und Verrohrung“ mit dem Schneekanonenkörper erfolgt über einfache Wasser- und Druckluftschläuche, die mit Schnellverschlusskupplungen ausgestattet sind. Dementsprechende Gegenstücke befinden sich an den 3/8-Zoll-Rohren, mit denen der Nukleator im zylindrischen Mittelstück des Schneekanonenkörpers verschraubt wurde.

Um Frostschäden durch gefrorenes Wasser in den Leitungen vorzubeugen, werden Maßnahmen für eine Entleerung der Wasserleitungen in der Konstruktion berücksichtigt. Zwar erfolgt die Entleerung nicht automatisch, wie im Lastenheft für das spätere Serienprodukt gefordert, dennoch ist sie ohne größeren Aufwand möglich. Durch das Umstecken des Luftschlauchs an die Wasserpfade ist gewährleistet, dass nach dem Betrieb die

Wasserleitungen der Verrohrung, die Wasserleitung zum Nukleator und der Düsenkranz mit reiner Luft ausgeblasen werden können (siehe Abbildung 4-17).

## 4.2 Messtechnik

Das angestrebte Ziel dieser Arbeit beinhaltet neben der Konstruktion einer miniaturisierten Schneekanone auch das Erfassen der wesentlichen Prozessparameter, um eine Reproduzierbarkeit und Auswertungen aus den experimentellen Untersuchungen zu ermöglichen. Deshalb spielt hierbei die Messtechnik eine wichtige Rolle. Speziell die drei benötigten Durchflussmessgeräte sollen unter besonderer Berücksichtigung der auftretenden Prozessgrößen ausgewählt werden. Diese Messgeräte müssen für die auftretenden Drücke, Durchflüsse und Temperaturen des jeweiligen Mediums geeignet sein und eine je nach Messgröße genügend hohe Genauigkeit aufweisen. Da die experimentellen Untersuchungen an der Schneekanone im Freien stattfinden, sind sowohl die Eignung bezüglich widriger Umgebungsbedingungen (hohe Luftfeuchtigkeit, geringe Temperaturen, Nässe) als auch eine kompakte Größe und die Mobilität der jeweiligen Messtechnik für die endgültige Auswahl entscheidend. Der Punkt „Mobilität“ beinhaltet in diesem Fall das Ablesen vom aktuellen Messwert möglichst direkt am Gerät, eine Messtechnik ohne weitere Messverstärker, Singalwandler etc. und eine unkomplizierte Stromversorgung mit einem einfachen Netzteil, einem Akku oder einer Batterie. Die Eigenschaften, Funktionen und Einsatzbereiche der verwendeten Messtechnik werden nachfolgend erläutert.

### Durchflussmessgerät für Wasser – Gesamtdurchfluss

Mit diesem Durchflussmesser soll der gesamte, zur Schneeproduktion verwendete Wasserdurchfluss gemessen werden, weshalb diese messtechnische Einrichtung auch nach dem Sicherheitsventil positioniert wird, um eine gegebenenfalls austretende Wassermenge nicht fälschlicherweise mit einzubeziehen.



Abbildung 4-22: Durchflusssensor [17]

Verbaut wird ein mechatronischer Durchflusssensor der Firma „IFM“ (siehe Abbildung 4-22). Das Messgerät verfügt über eine vierstelligen alphanumerische Anzeige, ist mit einem

Rückflussverhinderer ausgestattet und misst neben dem aktuellen Durchfluss auch die Temperatur des Mediums. Zur Stromversorgung genügt ein einfaches, mitgeliefertes Netzteil. Ein weiterer Vorteil dieses Messgeräts ist, dass es aufgrund des Messprinzips weder Ein- noch Auslaufstrecke benötigt und somit platzsparend eingebaut werden kann.

Produktdaten:

Einsatzbereich:	flüssige Medien
Druckfestigkeit:	40 bar
Mediumstemperatur:	-10 °C bis +100 °C
Messbereich:	0,3 bis 15 l/min

### Durchflussmessgerät für Wasser – Durchfluss in der Nukleatordüse

Bei der Erfassung des Wasserdurchflusses, der durch die Nukleatordüse strömt, ist von den zuvor genannten Kriterien besonders eine hohe Messgenauigkeit gefordert. Die Wahl fällt auf einen Ovalrad-Durchflussmesser der Firma „Kobold“ (siehe Abbildung 4-23).



Abbildung 4-23: Ovalrad-Durchflussmessgerät mit Anzeigeelektronik [18]

Das Messprinzip dieses Durchflussmessers beruht darauf, dass sich durch das strömende Fluid in einer Präzisionsmesskammer zwei Ovalräder drehen. Diese Drehung wird durch integrierte Magneten in Impulse umgewandelt und kann mit einer zusätzlichen Auswerteelektronik und einer darin eingebauten, digitalen Anzeige ausgewertet werden. Die Auswerteelektronik mit Display ermöglicht einen direkten Anbau an das eigentliche Messgerät. Ebenso wie der andere verbaute Durchflussmesser für Wasser benötigt diese Messeinrichtung keine definierte Ein- und Auslaufstrecke. Außerdem ist eine Stromversorgung durch eine Batterie für die erforderlichen Funktionen ausreichend.

Produktdaten:

Einsatzbereich:	viskose, nicht scheuernde, reine Flüssigkeiten
Druckfestigkeit:	64 bar
Mediumstemperatur:	-20 °C bis +80 °C
Messbereich:	2 bis 100 l/h
Umgebungstemperatur:	-20 °C bis +80 °C

### Durchflussmessgerät für Luft – Durchfluss in der Nukleatordüse

Um die Werte für den Luftdurchsatz in der Nukleatordüse ermitteln zu können, wird mit einer entsprechenden Einrichtung im Luftpfad der Durchfluss der Luft gemessen. Hierfür wird ein Durchflussmesser der Firma „E+E Elektronik“ verwendet (siehe Abbildung 4-24). Dieser ist für das Messen von Druckluft und Gasen geeignet und bietet auch die Möglichkeit, die Temperatur des Mediums zu erfassen. Die Messung beruht auf dem Prinzip des Heißfilmanemometers.



Abbildung 4-24: Thermischer Durchflussmesser für Luft [15]

Der Messwert für den Massenstrom wird unter Einbeziehung der durch einen Draht eingeleiteten Wärme, dem Druck und der Temperatur des durchströmenden Mediums ermittelt und mit Hilfe der Rohrgeometrie auf den Volumenstrom umgerechnet. Der Mediendruck kann mit der mitgelieferten Software über eine USB-Schnittstelle voreingestellt werden, wobei die Auswirkung von geringen Abweichungen des Drucks in sehr kleinen Fehlern der Messwtergebnisse resultiert ( $\pm 1$  bar Druckabweichung vom voreingestellten Wert führt zu einer Abweichung vom Messwert um  $\pm 0,5$  %). Die Messwertanzeige erfolgt auf dem Display der Auswerteelektronik, die über ein Kabel mit dem Messfühler verbunden ist. An der Auswerteelektronik befindet sich der Stromanschluss über ein einfaches Netzteil. Im Gegensatz zu den Durchflussmessern für Wasser werden hier definierte Ein- und Auslaufstrecken (25-fache beziehungsweise 5-fache Rohrnennweite) benötigt, um eine korrekte Messung an dem ausgebildeten, beruhigten Strömungsprofil zu ermöglichen. Die Messwertausgabe erfolgt in Normkubikmetern pro Stunde bei Normbedingungen.

#### Produktdaten:

Einsatzbereich:	Druckluft oder nicht korrosive und nicht brennbare Gase
Druckfestigkeit:	16 bar
Mediumtemperatur :	-20 °C bis +80 °C
Messbereich:	0,32 bis 63 Nm <sup>3</sup> /h

### 4.3 Produktdaten der zugekauften Komponenten

An dieser Stelle sind die wichtigsten technischen Daten von Kompressor, Pumpe und Ventilator zusammenfassend aus den Produktdatenblättern beziehungsweise aus den Betriebsleitungen aufgelistet:

#### Kompressor:

- Typ: Kolbenkompressor (1 Zylinder)
- maximaler Betriebsdruck: 8 bar
- Ansaugleistung: 140 l/min
- Kesselinhalt: 24 l
- Schalldruckpegel: 94 dB
- ölgeschmiert: nein
- Motorleistung: 1100 W
- Nennanschluss: 230 V, 50 Hz
- Abgabeleistung: 4 bar: 70 l/min; 7 bar: 45 l/min
- Gewicht: 19,5 kg

#### Pumpe:

- Typ: Drehschieberpumpe
- Druckbereich: 0 - 18 bar
- Förderleistung: bis zu 600 l/h
- Nennanschluss: 230 V
- Motorleistung: 550 W
- ölgeschmiert: nein
- Gewicht: 6,5 kg

#### Ventilator:

- Typ: Axialventilator
- Motorleistung: 145 W
- Innendurchmesser: 310 mm
- maximale Fördermenge: 2230 m<sup>3</sup>/h
- Gewicht: 6,5 kg

#### **4.4 Zusammenbau und Inbetriebnahme**

Die CAD-Konstruktion und der eigentliche Zusammenbau der Komponenten erfolgten nicht strikt chronologisch getrennt, sondern über weite Bereiche parallel oder sogar in umgekehrter Reihenfolge. Besonders betraf das die Baugruppe „Messtechnik und Verrohrung“. Zuerst wurde für den in der Theorie aufgestellten Anschlussplan nach geeigneten Komponenten gesucht. Nach der Anschaffung wurden diese vermessen und in das Modell am Computer integriert, da von den Herstellern die genauen Abmessungen nur selten angegeben und auch die exakten Einschraubtiefen der Gewindeverbindungen nicht bekannt waren. Basierend auf dem aktualisierten, dreidimensionalen Modell erfolgten die weiteren Konstruktionen, wie zum Beispiel die benötigten Abmessungen des Rahmens zur Befestigung der Messtechnik und Verrohrung.

Nach dem Zusammenbau folgte die erste Inbetriebnahme des Prototyps. Dabei wurden Dichtigkeitsprüfungen der Verrohrungen durchgeführt und die einwandfreie Funktion der Messtechnik und der störungsfreie Betrieb von Pumpe, Kompressor und Ventilator überprüft.

Der fertig zusammengebaute Prototyp ist in Abbildung 4-25 bis Abbildung 4-32 zu sehen.



Abbildung 4-25: Gesamtaufbau mit Schlauchverbindungen



Abbildung 4-26: Schneekanonenkörper und Aufhängung angeschlossen



Abbildung 4-27: Messtechnik und Verrohrung



Abbildung 4-28: Schneekanone - Abwurfwinkel  $\sim 30^\circ$



Abbildung 4-29: Schneekanonen in waagrechter Position

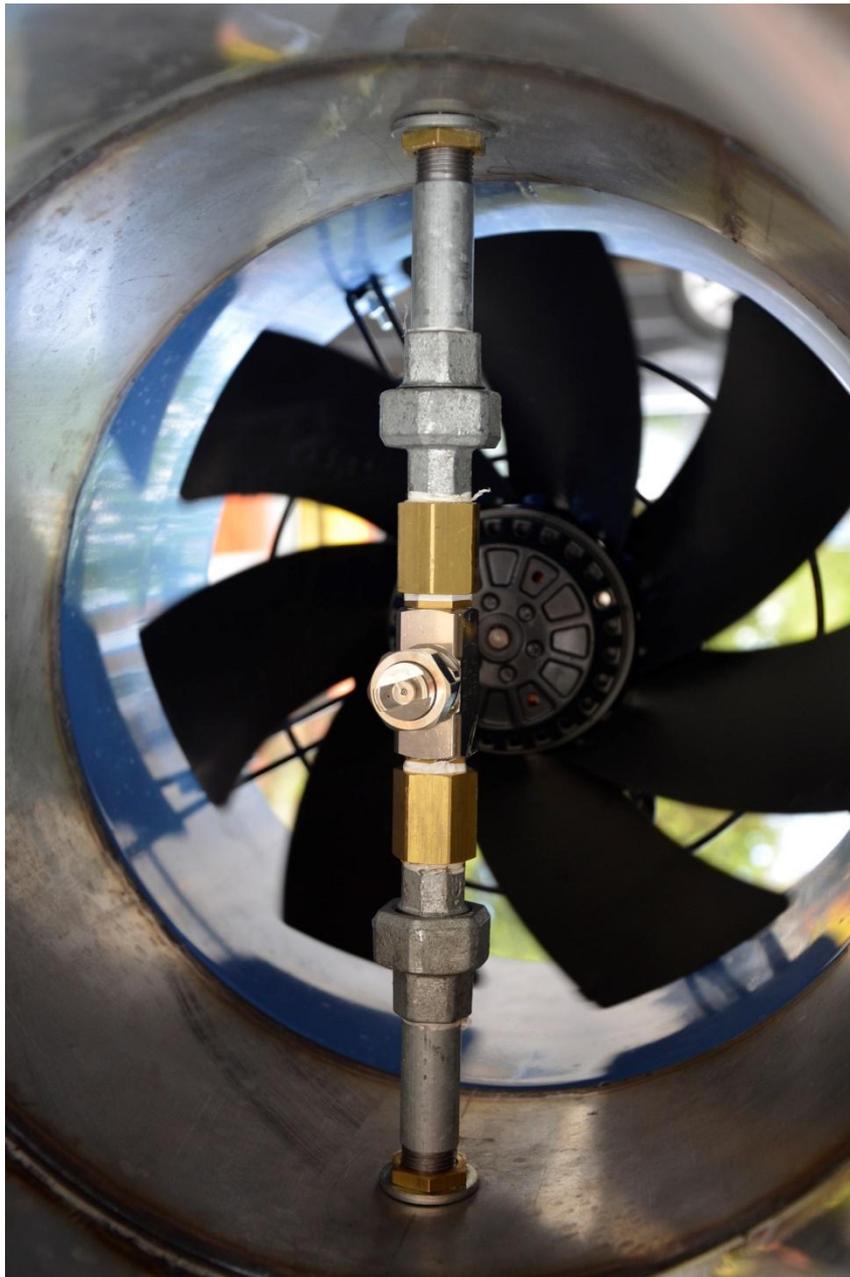


Abbildung 4-30: Eingebaute, zugekaufte Nukleatordüse

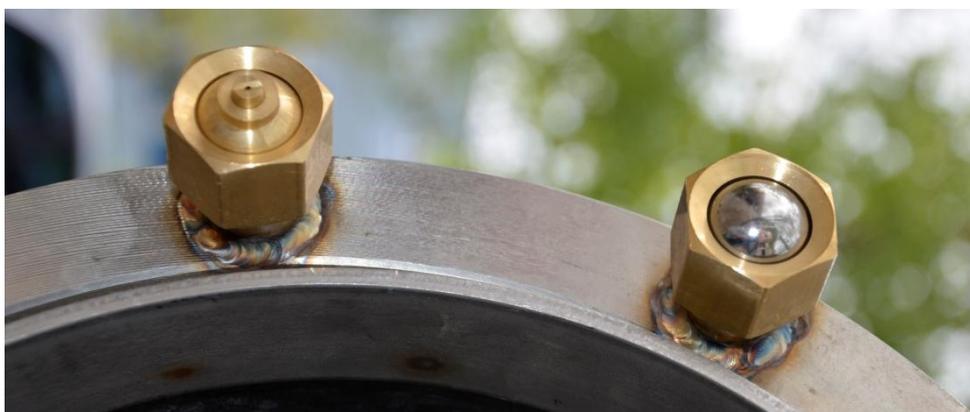


Abbildung 4-31: Wasserdüsen am Düsenkranz



Abbildung 4-32: Gesamtaufbau ohne Schlauchverbindungen

## 5 Experimentelle Untersuchungen

Die Versuche, die mit dem Prototyp durchgeführt wurden, dienten in erster Linie dazu, um herauszufinden, ob eine Schneeproduktion in dieser Form unter den gegebenen Bedingungen überhaupt möglich ist. Darunter fallen sowohl die erhöhte Wassertemperatur eines herkömmlichen Hauswasseranschlusses als auch die generelle Funktionalität des miniaturisierten Schneekanonenprototyps im Vergleich zu konventionellen Schneekanonen. Durch das Variieren an den vorgesehenen Adaptionmöglichkeiten können unterschiedliche Einstellungen vorgenommen und dadurch in weiterer Folge die Schneeproduktion beziehungsweise die Qualität des erzeugten Schnees optimiert werden. Am fertigen Prototyp sind folgende Adaptionen möglich:

- Wasserdruck in der Nukleatordüse
- Wasserdurchsatz in der Nukleatordüse
- Wasserdruck im Düsenkranz
- Luftdruck in der Nukleatordüse
- Luftdurchsatz in der Nukleatordüse
- axiale Position des Düsenkranzes
- Austausch der Wasserdüsen
- Anzahl der Wasserdüsen
- Verteilung der Wasserdüsen am Düsenkranz
- Austausch der Nukleatordüse
- Austrittswinkel der Wasserdüsen
- Abwurfwinkel der Schneekanone
- Luftdurchsatz der Schneekanone (Drehzahl des Ventilators)

### 5.1 Versuchsbedingungen

Für einen idealen Versuch sind tiefe Temperaturen und eine verhältnismäßig geringe Luftfeuchtigkeit nötig. Als Orientierung für die passenden Bedingungen kann auf die Abbildung 2-7 zurückgegriffen werden. Es sei jedoch nochmals erwähnt, dass dieses Diagramm nicht die um bis zu 10 °C wärmere Wassertemperatur (verglichen mit der Wasserversorgung konventioneller Schneekanonen) berücksichtigt, die im gegebenen Fall vorliegt, und es deshalb durchaus zu unerwarteten Fehlversuchen bei eigentlich geeigneten Bedingungen (laut Diagramm) kommen kann.

Voraussetzungen für einen Test sind ein Stromanschluss und ein Wasseranschluss in unmittelbarer Nähe. Die Tests wurden einerseits am Universitätsgelände der Technischen Universität Graz, andererseits bei der Bergstation am Schöckl nahe Graz durchgeführt. Mit einem kombinierten Messgerät für Luftfeuchte und Temperatur („Hygrometer-Thermometer“) kann an Ort und Stelle die genaue Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen werden.

In Abbildung 5-1 ist der mittlere Jahres- und Tagesgang der relativen Luftfeuchtigkeit in Graz bei der Messstation an der Universität Graz abgebildet. Die Werte sind aus der Periode 1991 bis 2000 und geben einen Einblick in die durchschnittlich vorherrschenden Bedingungen, welche die relative Luftfeuchtigkeit betreffen. Aus der Abbildung geht hervor, dass eine Beschneigung unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit tendenziell am besten um die Mittagszeit und am frühen Nachmittag geeignet ist, da hier die niedrigsten Werte vorliegen. Neben der Luftfeuchtigkeit muss aber auch die Temperatur einen ausreichend tiefen Wert aufweisen.

Uhr [MEZ]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1	89,3	83,9	82,5	81,0	84,4	86,8	86,2	87,3	91,5	91,4	90,5	90,5
2	89,6	84,8	83,8	82,5	85,8	87,4	87,2	88,4	92,0	91,7	90,8	90,8
3	90,1	85,6	85,2	83,8	87,0	88,6	88,2	89,1	92,4	92,3	91,2	91,2
4	89,8	86,0	86,0	84,7	88,1	89,5	88,9	90,0	92,9	92,7	91,7	91,4
5	90,1	86,4	86,6	85,8	88,8	89,6	89,2	90,6	93,3	92,8	92,2	91,5
6	90,2	86,6	87,2	85,6	87,1	87,1	87,5	90,2	93,6	92,9	92,4	91,6
7	90,3	86,6	86,7	81,9	80,9	80,8	81,8	86,2	92,4	92,5	92,3	91,6
8	90,1	86,0	83,2	75,2	72,4	73,9	74,5	79,6	86,6	90,1	91,8	91,6
9	88,6	79,7	74,9	66,6	65,3	68,5	67,7	70,4	76,7	83,2	88,4	90,4
10	83,4	70,9	68,8	61,0	60,7	63,8	63,1	64,4	70,3	76,5	83,5	86,2
11	78,3	65,3	63,2	57,3	57,7	60,9	59,8	60,7	66,2	71,9	79,2	82,3
12	74,2	60,9	59,5	54,3	55,3	58,8	57,5	58,4	63,5	68,4	76,3	79,3
13	71,8	57,6	56,9	52,3	54,3	57,8	56,0	56,6	61,1	65,8	74,0	76,7
14	70,2	55,6	55,0	51,0	53,6	56,9	55,5	56,2	59,8	64,7	73,0	75,6
15	69,9	55,4	54,3	51,0	53,5	57,5	56,0	56,9	59,9	65,9	74,1	76,5
16	72,3	56,9	54,6	52,0	54,1	58,4	56,6	58,1	61,5	67,7	76,3	79,0
17	76,6	59,9	56,6	53,9	55,5	60,9	59,2	60,7	65,2	72,8	80,1	82,7
18	80,6	65,3	59,7	56,2	58,0	63,2	61,6	63,3	71,3	80,3	83,5	85,2
19	83,2	71,3	65,0	60,2	61,6	66,5	64,8	69,5	79,5	84,6	85,4	86,6
20	84,9	75,1	69,9	66,0	67,8	72,1	71,4	77,4	84,4	87,0	87,0	87,7
21	86,4	78,0	73,5	71,1	73,6	78,0	77,1	81,2	86,9	88,5	88,1	88,7
22	87,4	80,1	76,1	74,8	77,3	81,5	80,7	83,5	88,7	89,7	89,1	89,2
23	87,9	81,8	78,3	77,5	79,9	83,8	83,1	85,2	90,0	90,5	89,6	89,9
24	88,2	83,0	80,4	79,5	82,3	85,6	84,7	86,4	91,0	90,9	90,1	90,3

Abbildung 5-1: Jahres- und Tagesgang der relativen Feuchte in Prozent an der Station Graz-Universität, modifiziert [10]

Die Versuchsbedingungen im Raum Graz waren während der Testzeit nicht optimal. Es gab zwar einige Tage, an denen die nötigen tiefen Temperaturen vorherrschten, allerdings lag an den meisten dieser Tage die Luftfeuchtigkeit zwischen 85 % und 100 %, wodurch zufriedenstellende Tests oft nicht erreichbar waren.

Die Abhängigkeit von Umgebungslufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, Umbauarbeiten am Prototyp und auch das Warten auf neu bestellte Komponenten führten nur zu einigen wenigen Testmöglichkeiten. Dennoch konnten aus diesen Tests wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden.

An dieser Stelle wird auf die ersten Funktionstests am Schöckl und dem darauffolgenden Test in Graz, bei dem die Schneeproduktion erstmals gelang, näher eingegangen. Andere Versuche verliefen bei zu hohen Temperaturen beziehungsweise zu hoher Luftfeuchtigkeit und werden hier nicht weiter beschrieben, zumal es keine Änderungen an der Versuchsaufstellung oder den Parametereinstellungen zu den oben genannten Funktionstests gab.

Da die Fertigung einiger Teile nicht rechtzeitig abgeschlossen werden konnte beziehungsweise teilweise die Lieferung bestellter Teile abgewartet werden musste, wurden die Versuche nicht in der vollständigen Zusammenstellung aller Teile des Prototyps durchgeführt. Dies betrifft beispielsweise sowohl die Verbindungselemente zwischen dem Schneekanonenkörper und der Messtechnik als auch die Gasdruckfedern. Diese Einschränkungen hatten aber insgesamt keinen Einfluss auf die Funktionalität der Schneekanone. Anstatt der Gasdruckfedern wurden Aluminiumprofile als Halterung

eingesetzt und die Aufstellung der Schneekanone inklusive Rahmen erfolgte auf einem einfachen Tisch. Im Rahmen der Versuche betrug die Neigung (Abwurfwinkel) des Prototyps stets  $30^\circ$ , um hohe Wurfweiten und damit dementsprechend längere Fallzeiten zu garantieren. Die axiale Position des Düsenkranzes war durch die Abstandshülsen fixiert und wurde für alle durchgeführten Versuche beibehalten.

## 5.2 Funktionstest am Schöckl

Mitte Dezember fand der erste Testversuch bei der Bergstation am Schöckl auf circa 1430 m statt. Da der Termin im Vorhinein festgelegt wurde, konnten zu diesem Zeitpunkt noch keine genauen Prognosen zur exakten Lufttemperatur oder Luftfeuchtigkeit gemacht werden. Am Testort angekommen, wurde eine Temperatur von  $-3,5^\circ\text{C}$  und eine Luftfeuchtigkeit von über 90 % mit dem „Hygrometer-Thermometer“ gemessen. Aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit herrschten keine guten Bedingungen. Nach dem ersten Einschalten der Schneekanone stellte sich schnell heraus, dass eine Schneeproduktion mit dem vorhandenen Set-up der Schneekanone an dieser Stelle nicht möglich war. Aufgrund von Problemen mit der Messtechnik musste bei diesem Testlauf auch auf eine Erfassung der Messdaten verzichtet werden. Dennoch konnten anhand dieses ersten Versuches sehr wichtige und aufschlussreiche Erkenntnisse bezüglich der Wasser- und Nukleatordüsenfunktion gewonnen werden.

### **Problem: Wasserdüsen**

Wie in Abbildung 5-2 zu erkennen ist, kollidiert der Wasserstrahl einer Düse aufgrund der eng nebeneinanderliegenden Anordnung der Wasserdüsen bereits sehr früh nach dem Düsenaustritt mit dem Wasserstrahl der jeweiligen Nachbardüse. Dies hat nachteilige Auswirkungen auf die angedachte, feine Zerstäubung und somit auch auf die Schneeerzeugung. Aufgrund des frühen Zusammentreffens der Wasserstrahlen können sich im Schnittbereich größere Wassertropfen bilden, welche wiederum aufgrund des größeren Volumens und der größeren Masse die notwendige Verdampfung erschweren.



Abbildung 5-2: Sprühbild Wasserdüsen

Vergleicht man das Sprühbild aus Abbildung 5-2 mit dem der konventionellen Schneeerzeuger in Abbildung 3-3, erkennt man, dass dort die einzelnen Wasserstrahlen der Düsen noch früher aufeinander treffen. Auch die Eiskeime aus den Nukleatordüsen treffen kurz nach dem Austritt bereits auf die Strahlen der Wasserdüsen. Eine Schneeproduktion ist bei diesem Aufbau möglich, da das Wasser eine erheblich geringere Temperatur (im Vergleich zu der Wassertemperatur bei herkömmlichen Hauswasseranschlüssen) aufweist und aufgrund des höheren Systemdrucks (bis zu 50 bar) sowie der optimal abgestimmten Düsen auch eine feinere Zerstäubung realisiert werden kann. Die entscheidenden Faktoren sind somit die Wassereintrittstemperatur und der Wasserdruck. Bereits kurz nach dem Düsenaustritt sind die Tröpfchen bei konventionellen Anlagen genügend abgekühlt, um die „Animpfung“ durch die Tröpfchen aus der Nukleatordüsen zu ermöglichen. Weist jedoch die Wassertemperatur einen deutlich höheren Wert auf, ist das nicht möglich und das Wasser muss nach dem Düsenaustritt durch den Wärmeaustausch mit der Umgebung zusätzlich abkühlen. Sind jedoch zu große Tropfen (bei erhöhter Wassertemperatur) durch zu geringen Wasserdruck und ein zu frühes Aufeinandertreffen vorhanden, verhindert dies in weiterer Folge den nötigen Kühlungseffekt durch Verdunstung und schlussendlich eine erfolgreiche „Animpfung“ (vgl. Abbildung 2-8). Die Ursache für die größeren Tröpfchen liegt im gegebenen Fall in der (für die vorhandene Wassertemperatur von 11 °C und dem geringeren Druck) zu engen Verteilung der Wasserdüsen am Düsenkranz. Es wurde an Ort und Stelle versucht, die Kugeldüsen etwas versetzt zueinander auszurichten, um ein zu frühes Aufeinandertreffen der einzelnen Tröpfchen zu verhindern, damit mehr Zeit für den Abkühlvorgang bleibt. Dies bewirkte zwar eine kleine Verbesserung des gesamten Sprühbilds der Schneekanone, reichte aber nicht aus,

um das zu frühe Kollidieren der Tröpfchen zu unterbinden.

**Problem: Nukleatordüse**

Die selbstgebaute Nukleatordüse konnte die Funktion als Zerstäuberdüse nicht erfüllen. Es wurden zwar verschiedene Düsenkombinationen am selbstgebauten Nukleator getestet, jedoch konnte keine dieser Kombinationen für die nötige Verbesserung des Sprühbilds sorgen. Des Weiteren war der Durchfluss durch den Nukleator nicht stationär, sondern pulsierte sehr stark, was sich negativ auf das Sprühbild und in weiterer Folge auf die Schneeerzeugung auswirkte. Der Grund der Pulsationen ist folgendermaßen zu begründen: Auf einen einzelnen Wasserstrahl aus der Düse folgte ein kurzes „Spucken“ bestehend aus einem Wasser-Luftgemisch, anschließend trat wieder ein einzelner Wasserstrahl, welcher in der Abbildung 5-3 gut zu erkennen ist, aus.



Abbildung 5-3: Sprühbild Nukleatordüse

Das Problem resultiert daraus, dass sich die Mischkammer mit Wasser füllt, bis der Wasserstand die Düsenaustrittsöffnung erreicht. Anschließend kommt es zum Austritt des reinen Wassers ohne Luft in Form eines Wasserstrahls, bis der Wasserspiegel in der Mischkammer wieder leicht unter die Düsenöffnung sinkt. Nun folgt das „Spucken“, bei dem die Luft mit etwas Wasser austritt. Hat der Wasserspiegel anschließend die Düsenöffnung wieder erreicht, kommt es abermals zum Ausströmen des reinen Wasserstrahls. Die Ursache dafür liegt einerseits an den Düsen, die am Nukleator verbaut waren und ohne größeren Aufwand nur mit einer einfachen Bohrung, ohne Drall gefertigt wurden, andererseits sicherlich an der Geometrie der Mischkammer, die durch den Innenraum des einfachen T-Stücks vorgegeben war. Ferner erwies sich die Anordnung der Zuführung der Medienströme rechtwinkelig zur Austrittsrichtung als ungünstig. Vergleicht man die selbst hergestellte Nukleatordüse mit konventionellen Zweistoffdüsen, fällt auf, dass bei diesen Düsen zumindest ein Medium (meist die Flüssigkeit) in Richtung der Austrittsöffnung der Mischkammer zugeführt wird (siehe Abbildung 5-4).

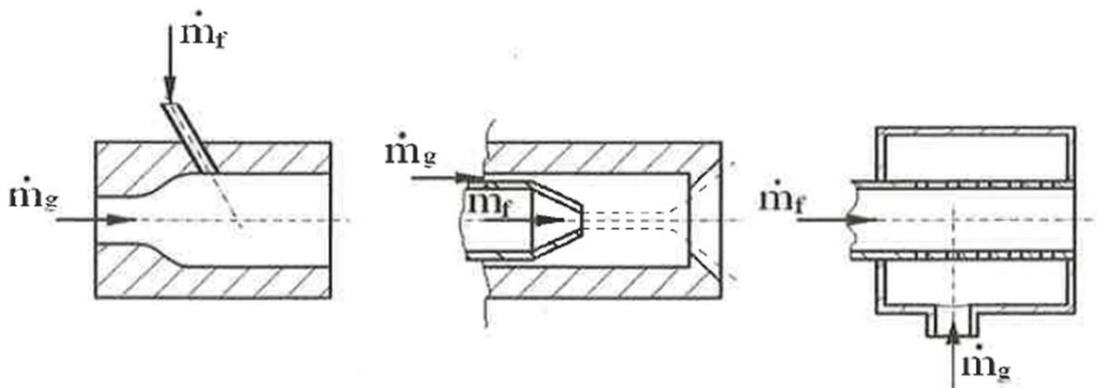


Abbildung 5-4: Zweistoffdüsen innerer Mischung, modifiziert [1]

### Verbesserungsmaßnahmen am Prototyp

Die Konsequenzen des ersten Versuchs waren die Reduzierung der Wasserdüsen und die Anschaffung einer handelsüblichen Zerstäuberdüse anstatt des selbstkonstruierten Nukleators. Um das frühe Kollidieren der einzelnen Tröpfchen aus den benachbarten Düsen zu verhindern, wurde jede zweite Wasserdüse verschlossen. Es waren nun 5 anstatt der ursprünglichen 10 Düsen am Düsenkranz angebracht. Die Ausführung wurde anfangs durch einfache Verschlusskappen, die statt der Überwurfmutter ohne die Kugeldüsen aufgeschraubt wurden, realisiert. Später wurde diese Lösung durch die Verschraubung von passender Kugeln (ohne Düsenöffnung) mit den bereits vorhandenen Überwurfmutter (siehe Abbildung 4-10 und Abbildung 5-9) umgesetzt.

Die Wahl für den Ersatz der selbstgebauten Nukleatordüse fiel auf ein Produkt der Firma „Aki.Tech Düsenteknik“ (vgl. Abbildung 5-5).



Abbildung 5-5: Zerstäuberdüse, modifiziert [12]

Es handelt sich hierbei um eine Zerstäuberdüse, die aus einem Düsenkörper und der eigentlichen Düse besteht. Vorteil dieser Bauart ist, dass verschiedene Düsen auf den Körper aufgeschraubt und im Versuch getestet werden können. Aufgrund der Bauweise ist bei diesem Produkt sowohl eine Außenmischung als auch eine Innenmischung durch das Anschrauben der entsprechenden Düsen möglich, was für eine große Flexibilität sorgt.

### 5.3 Testversuch in Graz

Mit den Verbesserungen, die nach dem ersten Versuch am Schöckl umgesetzt worden waren, erfolgte ein weiterer Testversuch direkt am Universitätsgelände der Technischen Universität Graz in der Inffeldgasse. Das Verschließen von 5 Wasserdüsen (ursprünglich 10) resultiert in einer Minderung des Wasserdurchflusses. Waren es beim Versuch am Schöckl noch ungefähr 8 l/min, strömten bei diesem Testlauf nur mehr 6,2 l/min durch den Prototyp. Der maximale Wasserdruck im System änderte sich ebenfalls. Aufgrund des geringeren Wasserdurchsatzes stieg dieser auf circa 10 bar an. Beim Funktionstest am Schöckl betrug der Wasserdruck circa 8 bar.

Die Umgebungsbedingungen bei den Tests waren mit einer Lufttemperatur von etwa  $-2^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchte von 80 % abermals nicht optimal. Dennoch konnte nach kurzer Zeit bereits erster Schnee auf dem Boden der zu beschneien Fläche erkannt werden. Somit konnte bestätigt werden, dass eine Schneeproduktion mit einer miniaturisierten Schneekanone möglich ist. Die zeitliche Entwicklung der beschneiten Fläche ist in Abbildung 5-6 zu sehen. Im linken unteren Bildausschnitt ist jeweils die Uhrzeit angegeben.

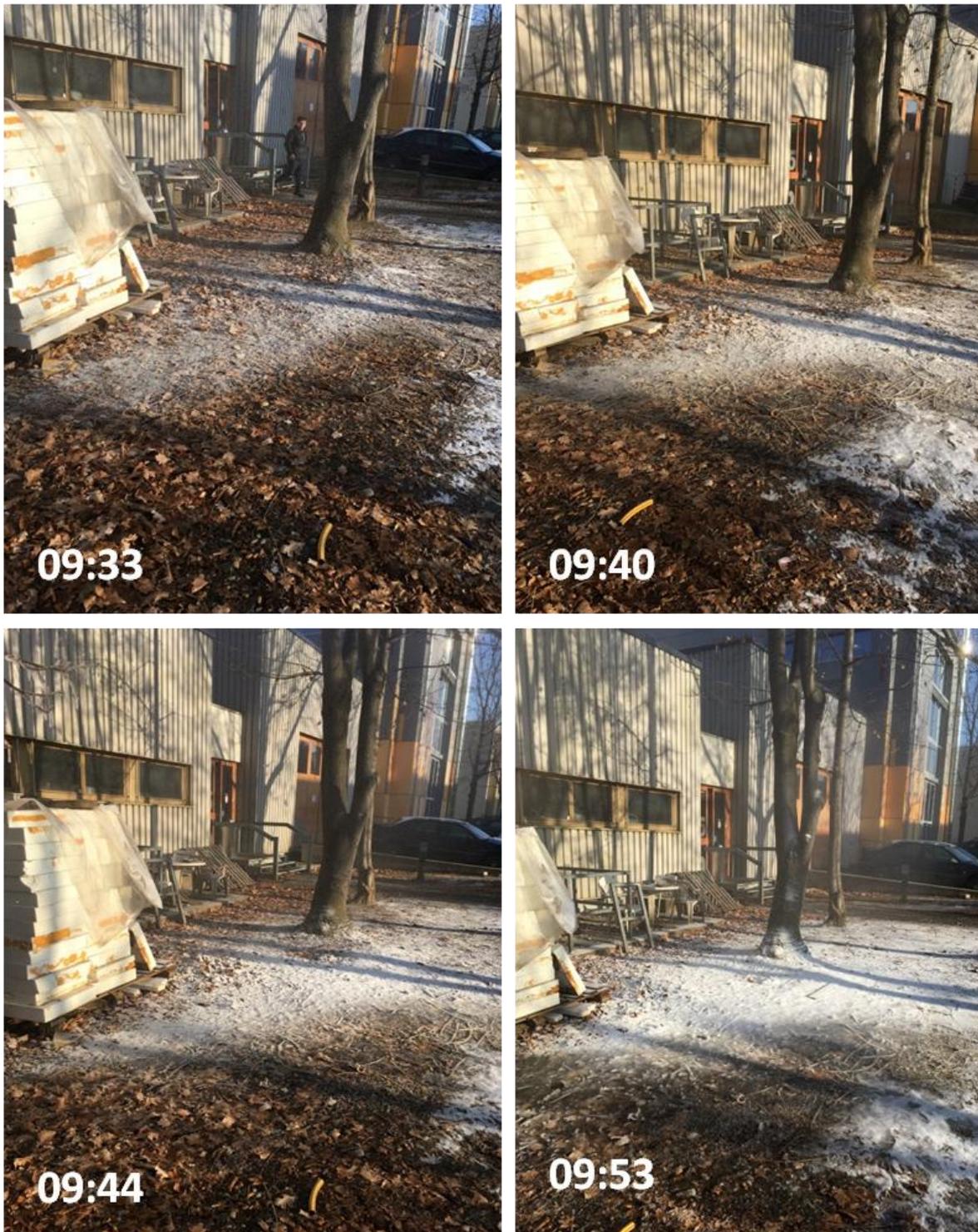


Abbildung 5-6: Entwicklung der beschneiten Fläche

Auf den einzelnen Bildern ist der zeitliche Verlauf der Beschneieung dargestellt. Vor dem Start des Versuchs war der Boden hauptsächlich mit Laub bedeckt, es befand sich im Vorhinein kein Schnee auf der Testfläche. Nach kurzer Zeit waren erste weiße Flächen am Boden zu erkennen, dieser Zeitpunkt ist im linken oberen Bild um 09:33 Uhr festgehalten. Nach etwa 11 Minuten waren bereits größere Flächen des Bodens mit Schnee bedeckt und auch die Schneehöhe nahm zu. Der Versuch lief weitere 15 Minuten und wurde um circa 10:00 Uhr nach einer Gesamtdauer von circa 30 Minuten gestoppt, da der produzierte Schnee aufgrund der schlechter werdenden Umgebungsbedingungen immer feuchter wurde. Das Endergebnis

ist in Abbildung 5-7 zu sehen.

Die parabelförmige Ausnehmung (bei allen Bildern circa in der Bildmitte), in der wenig Schnee zu liegen kam, ist auf einen Baum mit herabhängenden Ästen direkt vor der Schneekanone zurückzuführen. An den Ästen, die in Abbildung 5-7 zu sehen sind, sammelte sich das Wasser. Ein Teil davon tropfte in flüssiger Form zu Boden, weshalb dieser Bereich schneefrei blieb.



Abbildung 5-7: Endresultat nach circa 30 Minuten Beschneigung

Die erstmals gelungene Schneeproduktion ist hauptsächlich auf die durchgeführten Verbesserungen zurückzuführen. Durch die verringerte Düsenanzahl konnte das Problem des zu frühen Aufeinandertreffens der einzelnen Wasserstrahlen deutlich reduziert werden. Die Wassertröpfchen befinden sich dadurch lange genug in der Luft, sodass diese durch Verdunstung und Wärmeaustausch mit der Umgebung ausreichend abgekühlt werden und eine darauffolgende erfolgreiche „Animpfung“ ermöglicht wird. Die durch die geringere Düsenanzahl bedingte Druckerhöhung des Wassers begünstigt zusätzlich die Zerstäubung. Vergleicht man das Sprühbild der Schneekanone am Schöckl aus Abbildung 5-8 mit dem in Graz (Abbildung 5-9), ist der Unterschied deutlich zu erkennen.



Abbildung 5-8: Sprühbild mit 10 Wasserdüsen



Abbildung 5-9: Sprühbild mit 5 Wasserdüsen

Bei diesem Testlauf war eine Düse mit Außenmischung am neuen Nukleator angebracht. Die Zerstäubung funktionierte äußerst zufriedenstellend und lieferte ein gleichmäßiges Sprühbild an fein vernebeltem Wasser. Aufgrund der herrschenden Umgebungsbedingungen ( $-2\text{ °C}$  und 80 % relative Luftfeuchtigkeit) wurde hauptsächlich Nassschnee produziert (vgl. Abbildung 5-10). Diese Schneearart weist einen verhältnismäßig großen Wasseranteil auf, ist sehr schwer (hohe Dichte) und klebt gut zusammen. Bei Komprimierung lässt sich leicht Wasser herauspressen. Durch den hohen Wasseranteil, der damit verbundenen hohen Dichte und dem reduzierten Wasserdurchsatz von  $6,2\text{ l/min}$  lag die produzierte Schneemenge bei circa  $0,53\text{ m}^3/\text{h}$ .



Abbildung 5-10: Produzierter Schnee

Bei diesem Test wurde der Stromverbrauch der einzelnen Komponenten gemessen, um einen Überblick über die gesamte Leistungsaufnahme des Prototyps zu erhalten. Dabei wiesen die Aggregate folgende Leistungsabnahmen auf:

- Ventilator: 145 W
- Pumpe: 400 W
- Kompressor: 1100 W

Addiert man diese Werte, ergibt sich für die gesamte Anlage ein Stromverbrauch von knapp unter 1700 W. Dieser Wert liegt deutlich unter den 2500 W, die im Lastenheft als maximale Leistungsaufnahme der Schneekanone festgelegt wurden, und erfüllt damit die Anforderung.

## 5.4 Ergebnisse

Der erfolgreiche Test in Graz zeigte, dass eine Schneeproduktion mit einer miniaturisierten Schneekanone möglich ist. Trotz der schwierigeren Rahmenbedingungen, zum Beispiel durch das deutlich wärmere Wasser, als es etwa bei den konventionellen Schneeerzeugern zur Verfügung steht, ist eine Beschneigung gelungen. Der erzeugte Schnee war (zu einem gewissen Teil bedingt durch die vorherrschenden Umgebungsbedingungen) sehr nass und hatte dadurch eine hohe Dichte.

Bei den Testversuchen zeigte sich, dass eine Konstruktion beziehungsweise eine Düsenkonfiguration, wie sie beispielsweise bei konventionellen Schneekanonenherstellern verwendet wird (siehe Abbildung 3-3), bei einer Miniaturschneekanone für den privaten Haushalt nicht zielführend ist. Gründe dafür sind hauptsächlich die deutlich höhere Wassereintrittstemperaturen und der geringere Wasserdruck. Besonders deutlich wurde diese Erkenntnis beim Testversuch am Schöckl. Das etwa 11 °C warme Wasser konnte aufgrund der überlappenden Sprühbilder nicht genügend abkühlen, bildete größere Tröpfchen und fiel unverändert als reiner Wasser-Niederschlag zu Boden. Zusätzlich kam die beschränkte Funktionalität der selbst gebauten Nukleatordüse zu tragen. Aufgrund des Sprühbilds der Wasserdüsen ist allerdings zu bezweifeln, dass auch mit einer gut funktionierenden Nukleatordüse eine Schneeproduktion stattgefunden hätte, da die vorherrschenden Umgebungstemperaturen ebenso nicht gut zur Schneeerzeugung geeignet waren (-3,5 °C und 95 % relative Luftfeuchtigkeit).

Eine Reduzierung der Düsenanzahl hatte die Folge, dass sich beim Versuch in Graz ein besseres Sprühbild ausbildete. Mit der zugekauften Nukleatordüse, die das Wasser-Luftgemisch zu einem sehr feinen Sprühnebel zerstäubte, gelang erstmals die Schneeproduktion. Abgesehen vom verbesserten Sprühbild trat der begünstigende Faktor auf, dass durch die Reduzierung der Düsen von 10 auf 5 Stück der Wasserdruck auf annähernd 10 bar stieg, was wiederum eine feinere Zerstäubung zur Folge hatte.

Verschiedene zur Verfügung stehende Maßnahmen zur Verbesserung der Schneeproduktion und -qualität wurden bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Unter Beachtung der durchgeführten Tests und mit dem aus der Theorie angeeigneten Wissen wurden nachstehende maßgebliche Einflussparameter auf die Schneequalität des Prototyps identifiziert:

- Wassertemperatur
- Umgebungslufttemperatur
- relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft
- Zerstäubungsgrad beziehungsweise Größe der Tröpfchen aus den Wasserdüsen und der Nukleatordüse
- Abstand beziehungsweise Zeit bis zum Aufeinandertreffen des Wasser-Luftgemisches aus dem Nukleator und den Wassertröpfchen aus den Wasserdüsen

Eine Aussage bezüglich der Reihenfolge, welche der oben genannten Einflussgrößen bei der Schneeproduktion eine größere Rolle spielt, ist im Allgemeinen nicht einfach möglich. Nur eine geeignete Abstimmung aller Parameter führt zu einer erfolgreichen und zufriedenstellenden Schneeproduktion.

So spielt im gegebenen Fall beispielsweise die Abkühlung des Wassers durch Verdunstung eine zentrale Rolle. Folglich sind eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit, eine ausreichend feine Zerstäubung und genügend Zeit zum Ausfrieren des Wassers aus den Wasserdüsen entscheidend. Diese Tatsache wurde auch in den Tests nachgewiesen und bestätigt damit die in der ersten Planungsphase bereits vorhandenen Vermutungen. Beträgt jedoch die Wassertemperatur annähernd 0 °C, spielt die Zeit zum weiteren Ausfrieren eine untergeordnete Rolle, jedoch ist dann eine feine Zerstäubung des Wassers von großer Bedeutung, wie auch in der Abbildung 3-3 zu sehen ist. Ist die Umgebungslufttemperatur sehr niedrig, können auch bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit größere Wassertropfen ohne eine vorausgegangene feine Zerstäubung leichter gefrieren.

In diesem Zusammenhang kann rückblickend behauptet werden, dass die anfänglichen

Überlegungen, Abschätzungen und Berechnungen zum Aufbau, zur Konstruktion und zur Auswahl der Komponenten für einen ersten Prototyp ausreichend gut ausgeführt wurden, um erste positive Ergebnisse zu erhalten, auch wenn die Testläufe zeigen, dass noch Verbesserungspotential besteht.

## 5.5 Verbesserungspotential

Die Versuche zeigen, dass im Bereich der Messtechnik und Verrohrung hinsichtlich des Wasserstranges noch Optimierungsbedarf vorhanden ist. Zwar lässt sich der Druck durch die Druckminderer gut einstellen, allerdings wäre es von Vorteil, wenn die Druckminderer nicht einen begrenzenden Betriebsdruck von 10 bar, sondern einen deutlich höheren Wert aufweisen, damit der ganze Druckbereich der Pumpe ausgenutzt werden kann. Es stellt sich die Frage, ob man hinsichtlich der (feineren) Tropfenzerstäubung nicht generell mit einer anderen Pumpe und somit höheren Drücken arbeiten sollte. Allerdings würde dies einen deutlich erhöhten Leistungsbedarf der Anlage implizieren beziehungsweise würde bei gleicher Leistungsaufnahme der Durchsatz reduziert werden.

Auch die Regelung des Durchflusses durch die Nukleatordüse mit dem Nadelventil funktioniert nicht perfekt. Zwar lässt sich dieser in einem gewissen Bereich einstellen und er ist auch über den Querschnitt der Nukleatordüsenöffnung zu einem bestimmten Teil vorgegeben, allerdings existiert das Problem, dass bei einer zu starken Reduktion am Nadelventil der Durchsatz (bei einem Druck von 4 bar) plötzlich abfällt und kein Wasser mehr fließt. Eine Ursache dafür könnte das federbelastete Rückschlagventil sein. Über den Druckminderer, das Nadelventil und den Durchflussmesser entsteht ab einem Grenzdurchfluss ein so hoher Druckverlust, dass das Rückschlagventil nicht mehr öffnet. Da bei der externen Mischung (wie es bei der Versuchskonfiguration in Graz der Fall war) die beiden Medien Wasser und Luft nicht in einer Mischkammer zusammentreffen, ist auch das Rückschlagventil nicht mehr nötig, um ein Eindringen der Luft in den Wasserpfad zu verhindern. Insofern wäre vielleicht der Ausbau des Rückschlagventils eine Lösung zur Behebung des Problems.

Des Weiteren ist in nachfolgenden Versuchen (im besten Fall bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen) eine Änderung der Wasserdüsengeometrie ein potentieller Schritt, um die Schneeproduktion zu verbessern. Die Düsen sollten einen geringere Austrittsquerschnitt und nach Möglichkeit auch einen kleineren Sprühwinkel aufweisen. Als Folge der verkleinerten Düsenöffnung wäre eine feinere Zerstäubung zu nennen, woraus sich wiederum ein besseres Verhältnis zwischen Oberfläche zu Volumen ergeben würde. Folglich würde sich die Abkühlung der Tröpfchen beschleunigen. Mit einem kleineren Sprühwinkel wäre außerdem eine Anordnung von noch mehr Düsen am Düsenkranz ohne ein zu frühes Kreuzen der Wasserstrahlen und der damit in Verbindung stehenden Bildung größerer Tröpfchen möglich. Dies würde eventuell (je nach Verhältnis zwischen Durchsatzsteigerung durch mehr Düsen und Durchsatzminderung aufgrund geringerer Düsenöffnungen) auch den möglichen Gesamtwasserdurchsatz erhöhen und zu einer größeren produzierten Schneemenge führen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von einem externen Auftrag befasst sich die vorliegende Arbeit damit, eine miniaturisierte Schneekanone zu konstruieren und experimentell zu testen. Das endgültige Ziel ist es, für ein serienfertiges Produkt, das im Handel zu erwerben ist, die Auslegungsdaten zu ermitteln. Im Hinblick auf das Ziel der Marktreife stellt diese Arbeit einen ersten Schritt in der Entwicklungsphase des serienfertigen Produkts dar.

Im Zuge der Konzeptionierung wurden die Rahmenbedingungen und Anforderungen an den Prototyp in einem Lastenheft zusammengefasst und die wesentlichen Konstruktionsmerkmale bereits bestehender Schneekanonen aufgezeigt. Limitiert durch diese Anforderungen erfolgte eine erste Abschätzung der benötigten Prozessgrößen (Wasserdruck, Wasserdurchsatz etc.). Passend dazu wurden die Komponenten (Pumpe, Kompressor, Ventilator, Messtechnik etc.) ausgelegt. Es zeigte sich, dass die erhöhte Wassertemperatur, die bei einem gewöhnlichen Hauswasseranschluss zur Verfügung steht (12 °C anstatt der 1 bis 4 °C bei den konventionellen Schneeerzeugern in Schigebieten) und der insgesamt reduzierte Wasserdurchsatz bei der konstruktiven Anordnung der Düsen berücksichtigt werden müssen. Anstatt der gängigen Konfiguration, bei der Nukleatordüsen und Wasserdüsen am Umfang der Schneekanone angeordnet sind, wurde nur eine einzelne Nukleatordüse auf der Zylinderachse kurz nach dem Ventilator verbaut. Diese Maßnahme ermöglicht die notwendige Abkühlung der austretenden Nukleatortröpfchen zu Eiskeimen, bevor der Kontakt mit den reinen Wassertröpfchen aus den Wasserdüsen erfolgt. Bei der Konstruktion wurde besonders darauf geachtet, dass viele Einstellungsmöglichkeiten variiert werden können. Aus diesem Grund ist der Prototyp aus verschiedenen Baugruppen, die einen leichten Austausch der einzelnen Komponenten ermöglichen, aufgebaut. Nach dem abgeschlossenen Zusammenbau erfolgten die ersten Funktionstests, an denen erste Probleme erkannt und beseitigt wurden. Nach weiteren Testläufen und den gewonnenen Erkenntnissen daraus erfolgte erstmalig auch eine erfolgreiche Schneeproduktion.

Das vorgegebene Ziel eine funktionierende, miniaturisierte Schneekanone zu konstruieren wurde somit erfüllt. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Testläufen, welche am Prototyp durchgeführt wurden, waren ausreichende Analysen bezüglich Schneequalität und -menge bei veränderten Prozessgrößen (Wasserdruck, Wasserdurchsatz, Luftdruck etc.) und Parametervariationen an der Schneekanone selbst (Abwurfwinkel, Düsenwinkel etc.) noch nicht möglich. Da sich die derzeitige Phase des Prototypenbaus am Beginn der Entwicklung eines serienfertigen Produkts befindet, konnten noch nicht alle Pflichtenforderungen aus dem Lastenheft erfüllt werden. Die wesentlichen Punkte wurden jedoch bei der Auslegung und Konstruktion berücksichtigt und konnten realisiert werden. Hierzu zählen insbesondere:

- Funktionstüchtigkeit des Prototyps (unter der Voraussetzung einer Wasser- und Stromversorgung eines gewöhnlichen Haushalts)
- Bauart beziehungsweise Konstruktionsmerkmale einer klassischen Propellerkanone
- Arbeitsmedien: Wasser und Luft, keine künstlichen Zusätze
- maximale Leistungsaufnahme von 2,5 kW
- Wurfweite (2 m)
- winkelverstellbar über Haltevorrichtung

Aus den Versuchen wurde deutlich, dass die Erzeugung von Schnee mit einer miniaturisierten Schneekanone prinzipiell funktioniert. Gerade in Bezug auf das vorhandene und durchaus hoch geschätzte Marktpotential wäre die dargestellte Schneeproduktion in Kombination mit

längeren Laufzeiten ausreichend, um beispielsweise einen kleinen Bereich im eigenen Garten zu beschneien und somit der im Vorhinein definierten Anforderung (gemäß dem Lastenheft) zu entsprechen. Abhängig von zukünftigen Verbesserungsmaßnahmen an der Miniaturschneekanone könnte die Schneequalität und die produzierte Schneemenge pro Zeiteinheit noch gesteigert werden. Erreichen lässt sich das, wie bereits in Kapitel 5.5 angesprochen, durch weitere Versuche mit anderen Düsenkonfigurationen und Änderungen an der Verrohrung, um die nun bekannten Schwachpunkte zu eliminieren. Nach diesen Verbesserungen sollte sich eine stabile Produktion von technisch erzeugtem Schnee einstellen. Zusätzlich zum vorhandenen Marktpotential im privaten Haushalt wäre eine Verwendung im Gastronomie- und Eventbereich durchaus denkbar. Dabei soll der erzeugte Schnee primär dekorative Zwecke erfüllen. Des Weiteren kommt hinzu, dass die Eigenschaften von technisch erzeugtem Schnee von denen von Naturschnee abweichen. Dies ist jedoch hinsichtlich der Schmelzneigung vorteilhaft. Durch die kugelige Form, der erhöhten Dichte und den großen Wasseranteil (der bei kalten Temperaturen am Boden weiter ausfrieren kann) hält sich der technisch produzierte Schnee länger als der Naturschnee und schmilzt deshalb langsamer.

Im Projektplan ist eine weitere Miniaturisierung des bestehenden Prototyps angedacht. Neben der Verkleinerung sollen parallel dazu die genannten Verbesserungsmöglichkeiten realisiert werden. Für ein mögliches Serienprodukt müssten konsequenterweise weitere Maßnahmen durchgeführt werden. Im Rahmen der Erstellung des Lastenhefts wurden bereits in der Planungsphase des Prototyps Überlegungen dahingehend angestellt. Denkbar wäre beispielsweise eine Aufteilung in zwei Komponenten. Erstere stellt den Schneekanonenkörper inklusive der Halterung für diesen dar. Für das optimierte Produkt (hinsichtlich Gewicht und Abmessungen) sollte bereits ein handelsüblicher Schirmständer ausreichend sein. Der zweite Teil umfasst die Pumpe und den Kompressor mit den zugehörigen Anschlüssen. Richtig ausgelegt sollen dann keine weiteren Komponenten (wie zum Beispiel ein Druckminderer) benötigt werden. Die Abzweigung und Regelung des Wasserpfads zur Nukleatordüse könnte über eine einfache Drossel erfolgen. Mit Verbindungsschläuchen und Schnellverschlüssen, wie sie bereits im Prototyp verwendet werden, wäre ein schneller und unkomplizierter Aufbau garantiert.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Stadien der Schneeflockenbildung, modifiziert .....	3
Abbildung 2-2: Homogene und heterogene Nukleation.....	5
Abbildung 2-3: Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis.....	5
Abbildung 2-4: Wachstumsfotosequenz eines Schneekristalls.....	6
Abbildung 2-5: Morphologiediagramm von Schnee.....	7
Abbildung 2-6: Feuchtkugeltemperatur aus Lufttemperatur und-feuchtigkeit.....	9
Abbildung 2-7: Umgebungsbedingungen für die Schneeproduktion.....	10
Abbildung 2-8: Zusammenwirken Nukleatordüse und Wasserdüse .....	11
Abbildung 2-9: Nukleatordüse – interne und externe Mischung.....	12
Abbildung 2-10: Schneekörner aus künstlicher Beschneigung .....	14
Abbildung 2-11: Schematische Übersicht einer Beschneiungsanlage .....	15
Abbildung 2-12: Komponenten einer Propellerkanone.....	16
Abbildung 2-13: Propellerkanonen mit unterschiedlichen Düsenarten, modifiziert .....	17
Abbildung 2-14: Schneilanze (1 Lanzenkopf, 2 Wasser-/Nukleatordüsen, 3 Bedienpanel, 4 Anschlüsse, 5 Wetterstation).....	18
Abbildung 3-1: Anlagenschema für das Berechnungsmodell .....	22
Abbildung 3-2: Aufbau der Verrohrung und Messtechnik.....	24
Abbildung 3-3: Düsenkonfiguration.....	27
Abbildung 4-1: Rohrventilator.....	30
Abbildung 4-2: Schneekanonenkörper .....	30
Abbildung 4-3: Einbau Nukleatordüse .....	31
Abbildung 4-4: Nukleatordüse Eigenbau .....	32
Abbildung 4-5: Schweißkonstruktion Düsenkranz .....	33
Abbildung 4-6: Kugeldüse mit Schweißnippel und Überwurfmutter .....	33
Abbildung 4-7: Düsenkranz.....	34
Abbildung 4-8: Anbringung Düsenkranz .....	35
Abbildung 4-9: Düsenkranz und Konus .....	36
Abbildung 4-10: Düsenkranz mit teilweise verschlossenen Düsen .....	37
Abbildung 4-11: Aufhängung des Schneekanonenkörpers mit Hülsen .....	38
Abbildung 4-12: Rahmen für den Schneekanonenkörper .....	38
Abbildung 4-13: Eingefahrene Gasdruckfedern – waagrechte Position .....	39
Abbildung 4-14: Ausgefahrene Gasdruckfedern – Neigung etwa 30 °.....	40
Abbildung 4-15: Rahmen für die Verrohrung.....	41
Abbildung 4-16: Verrohrung .....	41
Abbildung 4-17: Verrohrung von oben .....	42

---

Abbildung 4-18: Luftpfad .....	43
Abbildung 4-19: Verbindungselemente.....	44
Abbildung 4-20: Verbindung der Baugruppen .....	45
Abbildung 4-21: Gesamtzusammenbau.....	46
Abbildung 4-22: Durchflusssensor.....	47
Abbildung 4-23: Ovalrad-Durchflussmessgerät mit Anzeigeelektronik .....	48
Abbildung 4-24: Thermischer Durchflussmesser für Luft .....	49
Abbildung 4-25: Gesamtaufbau mit Schlauchverbindungen.....	52
Abbildung 4-26: Schneekanonenkörper und Aufhängung angeschlossen .....	53
Abbildung 4-27: Messtechnik und Verrohrung .....	53
Abbildung 4-28: Schneekanone - Abwurfwinkel $\sim 30^\circ$ .....	54
Abbildung 4-29: Schneekanonen in waagrechter Position.....	54
Abbildung 4-30: Eingebaute, zugekaufte Nukleatordüse .....	55
Abbildung 4-31: Wasserdüsen am Düsenkranz .....	55
Abbildung 4-32: Gesamtaufbau ohne Schlauchverbindungen.....	56
Abbildung 5-1: Jahres- und Tagesgang der relativen Feuchte in Prozent an der Station Graz- Universität, modifiziert .....	58
Abbildung 5-2: Sprühbild Wasserdüsen.....	60
Abbildung 5-3: Sprühbild Nukleatordüse.....	61
Abbildung 5-4: Zweistoffdüsen innerer Mischung, modifiziert .....	62
Abbildung 5-5: Zerstäuberdüse, modifiziert.....	63
Abbildung 5-6: Entwicklung der beschneiten Fläche .....	64
Abbildung 5-7: Endresultat nach circa 30 Minuten Beschneieung.....	65
Abbildung 5-8: Sprühbild mit 10 Wasserdüsen .....	66
Abbildung 5-9: Sprühbild mit 5 Wasserdüsen.....	67
Abbildung 5-10: Produzierter Schnee .....	68

## Literaturverzeichnis

- [1] Braun, R.: Verwendung von "Snomax" zur künstlichen Beschneigung von Skipisten: mikrobiologische Aspekte. Worb, 1998  
Als Download: <http://www.snomax.ch/PDf/Biolink.pdf> [Zugriff am 07.02.2017]
- [2] DSV aktiv (Hrsg.): Schneesicherheit im Wintersport - Naturschnee vs. technischer Schnee. Planegg, 2016  
URL: <https://www.ski-online.de/mitgliederservice/tipps-infos/detail/schneesicherheit-im-wintersport-naturschnee-vs-technischer-schnee-386.html> [Zugriff am 15.03.2017]
- [3] Eichelseder, H.: Thermodynamik. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2009
- [4] Fellin, W.: Einführung in Eis-, Schnee- und Lawinenmechanik. Berlin / Heidelberg, Springer-Verlag, 2013
- [5] Hofstätter, M.: Methoden zur Berechnung von Beschneigungszeiten. Diplomarbeit, Universität Wien, 2008
- [6] Lang, T.: Energetische Bedeutung der technischen Pistenbeschneigung und Potentiale für Energieoptimierung. Bern, 2009  
Als Download:  
[http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de\\_173310665.pdf](http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_173310665.pdf) [Zugriff am 29.03.2017]
- [7] Libbrecht, K. G.: The physics of snow crystals. In: Reports on Progress in Physics 68, S. 855-895, Pasadena, 2005  
Als Download: [http://www.its.caltech.edu/%7Eatomic/publist/rpp5\\_4\\_R03.pdf](http://www.its.caltech.edu/%7Eatomic/publist/rpp5_4_R03.pdf) [Zugriff am 17.03.2017]
- [8] Meier, M.: Produktion von naturidentischem Schnee. Diplomarbeit, ETH Zürich, 2006
- [9] Mörth, O.: Thermodynamische Auslegung einer Schneekanone für den privaten Gebrauch. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2015
- [10] Podesser, A., Wölfelmaier F.: Klimaatlas Steiermark: Kapitel 3 Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Nebel. Graz, 2010  
Als Download:  
[http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10727497\\_16178332/ff18155c/3\\_L\\_UFTFEUCHTE%20UND%20BEW%C3%96LKUNG%20-%20Vers\\_2.0.pdf](http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10727497_16178332/ff18155c/3_L_UFTFEUCHTE%20UND%20BEW%C3%96LKUNG%20-%20Vers_2.0.pdf) [Zugriff am 07.03.2017]
- [11] Seite: "abluf24.de", K-TECH-PRO GmbH  
URL: <https://www.abluft24.de/industrieventilatoren/rohrventilatoren/axialventilator-serie-kvkv-pro> [Zugriff am 29.03.2017]

- [12] Seite: "Arnhof & Kisch Technik GmbH", Arnhof & Kisch Technik GmbH  
URL: <http://www.akitech.at> [Zugriff am 15.03.2017]
- [13] Seite: "bächler", Bächler Top Track AG  
URL: <http://www.bachler.ch/> [Zugriff am 07.02.2017]
- [14] Seite: "DEMACLENKO", Demaclenko GmbH  
URL: <http://www.demaclenko.com/de/beschneigungsanlagen/1-0.html>  
[Zugriff am 08.02.2017]
- [15] Seite: "E+E Elektronik,“ E + E ELEKTRONIK Gesellschaft m.b.H.  
URL: <https://www.epluse.com/de/produkte/durchflussmesser/durchflussmesser-industrie/ee771/> [Zugriff am 29.03.2017]
- [16] Seite: "HAUSER Kaibling", Hauser Kaibling Seilbahn- und Liftges.m.b.H. & Co KG  
URL: <https://www.hauser-kaibling.at/de/mein-berg/infrastruktur/technik/beschneigung>  
[Zugriff am 10.05.2017]
- [17] Seite: "ifm", ifm electronic gmbh  
URL: <http://www.ifm.com/products/at/ds/SBG232.htm> [Zugriff am 29.03.2017]
- [18] Seite: "Kobold", KOBOLD Messring GmbH  
URL: <http://www.kobold.com/Durchflussmessung> [Zugriff am 29.03.2017]
- [19] Seite: "Seilbahn net", SEC Ges.m.b.H.  
Als Download: <http://www.seilbahn.net/snn/konfig/uploads/pdf/29.pdf>  
[Zugriff am 10.05.2017]
- [20] Wozinak, G.: Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte. Berlin/ Heidelberg/  
New York, Springer-Verlag, 2003
- [21] Zobrist, B.: Heterogeneous ice nucleation in upper tropospheric aerosols.  
Diplomarbeit, ETH Zürich, 1975

## **A.Anhang**

### **A.1 Lastenheft**

## **1 Konzept und Rahmenbedingungen**

### **1.1 Ziele des Anbieters**

Ziel ist der Vertrieb einer kompakten Propeller-Schneekanone, die zur privaten Verwendung im Garten, als auch bei verschiedenen Events von Gastronomie Unternehmen geeignet ist.

### **1.2 Ziele und Nutzen des Anwenders**

Das Gerät ermöglicht die Produktion von technischem Schnee zum Erschaffen einer lokal begrenzten winterlichen Landschaft, wenn der natürliche Niederschlag in Form von Naturschnee ausbleibt.

### **1.3 Benutzer / Zielgruppe**

Zielgruppe sind in erster Linie die Kunden, insbesondere:

- Familien mit Kindern
- Gastronomie Unternehmen
- Unternehmen im Eventbereich

### **1.4 Systemvoraussetzungen beim Benutzer**

- Wasseranschluss
  - o Wassertemperatur: < 12 °C
  - o Wasserdruck: 4 bar
  - o Wasserdurchsatz: ~8 l/min
- Lichtstromanschluss
  - o Effektive Spannung: 230 V
  - o Maximaler Strom: 16 A
- Umgebungsluftdruck: ~1 bar
- Umgebungstemperatur: < 0 °C
- Relative Feuchtigkeit der Luft: < 100 %

## **2 Ist-Situation von bestehenden Anlagen**

Vorhandene Propeller-Schneekanonen in Schigebieten mit zentraler oder dezentraler Wasser- und Druckluftversorgung weisen folgenden Spezifikationen auf:

- Elektrischer Anschluss: 400 V, 50 Hz, 63 A

- Schneeproduktion: bis zu 105 m<sup>3</sup>/h
- Anschlussleistung: bis zu 28 kW
- Wasserdurchsatz: bis zu 11 l/s
- Wasserdruck: bis zu 50 bar
- Luftdurchsatz: bis zu 1350 l/min
- Luftdruck: bis zu 10 bar
- Wurfweite: bis zu 70 m
- Gewicht: bis zu 800 kg
- Betriebsbereit: -25 °C bis +2 °C

### 3 Beschreibung der Anforderungen

#### 3.1 Pflichtenforderungen

- Bauart: Propeller-Schneekanone
- Arbeitsmedium: Wasser, Luft
- keine künstlichen Zusätze (wie z.B. Snomax)
- Gewicht: < 25 kg
- tragbar von einer erwachsenen Person mittels Griffen oder speziellen Hebevorrichtungen
- Produktionskosten je Stück: 100- 150 € bei Serienfertigung
- der Anschluss zur Leistungsaufnahme erfolgt über einen Schutzkontakt-Stecker (Stecker-Typ F) (230 V, 16 A)
- gesamte Leistungsaufnahme: max. 2,5 kW
- zur Wasserentnahme muss eine handelsübliche Steckverbindung (1/2“) am Wasserhahn genügen
- Anschlussverbindungen (Stromkabel) ist enthalten und weist eine Länge von 1m auf
- zum Betreiben sind keine Einstellungsarbeiten nötig – Plug & Play
- Schneeproduktion bei einem Zufluss von 8 l/min: > 0,8 m<sup>3</sup>/h bei einer Schneedichte von 300- 550 kg/m<sup>3</sup>
- Schneeproduktion soll ab -3,5 °C möglich sein (unabhängig von der rel. Luftfeuchte)
- Wurfweite: 2 m (bei Windstille)
- Winkel- und höhenverstellbar über Haltevorrichtung
- unbeaufsichtigter Betrieb ist möglich (Notabschaltung integriert)
- automatische Entleerung des enthaltenen Wassers aus dem Gerät nach dem Abschalten, um Frostschäden zu vermeiden
- wartungsfreier Betrieb

- Mindesthaltbarkeit 80 Betriebsstunden
- witterungsbeständig
- rostfrei
- CE-Kennzeichnung
- lärmarm: < 85 dB im Abstand von 5 m (85 dB: Grenze für Gehörschäden bei langfristiger Einwirkung)
- vibrationsarm
- Verletzungsgefahren beim Umgang mit dem Gerät müssen weitgehend ausgeschlossen sein

### **3.2 Optionale Anforderungen**

- handliche Abmessungen des Geräts: verpackbar in eine Box mit den maximalen Abmessungen von 100x60x70 (L/B/H in cm)
- Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchte am Gerät lokal oder über eine App mit aktuellen und lokalen Wetterdaten
- Betrieb des Geräts (Ein-/Ausschalten) über Funkverbindung (Fernbedienung)
- selbstständiges Einstellen des Geräts auf die aktuellen Umgebungsbedingungen zur optimalen Schneeproduktion
- selbstständiges Ausschalten und Entleeren bei sich ändernden Umgebungsbedingungen, unter denen eine Schneeproduktion nicht mehr möglich ist
- einfärben des Schnees über eigenen Ansaugbehälter mit Lebensmittelfarbe
- Kabeltrommel für Wasser- und Stromleitung am Gerät
- Sicherheitsgitter, um ein hineingreifen in die Maschine auf der Auswurfseite zu verhindern