



Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Studiengang
Maschinenbau

**Ermittlung eines Maßes an Effektivität zur Bewertung von Hagelabwehrflügen im
Landkreis Rosenheim**

Bachelor Thesis

von

Florian Leva

Datum der Abgabe: 09.06.2023

Erstprüfer: Prof. Dr. Peter Zentgraf

Zweitprüfer: Prof. Dr. Marcel Tilly

Danksagung:

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Zentgraf, M.Sc., für Bereitstellung des Themas und die intensive Betreuung während der Forschung.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ulrich Wellisch bedanken, der mir bei der statistischen Auswertung mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Georg Vogl vom Hagelforschungsverein, der sich bereit erklärt hat, gemeinsam mit mir die Simulation der virtuellen Flugtage durchzuführen.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Michael Spagl und Andreas Bernatzky bedanken, die mich in die Thematik eingeführt haben.

Mein Dank gilt auch Herrn Michael Heigl für die Bereitstellung der Radar- und Flugdaten.

Abschließend möchte ich mich bei Herrn Thomas Franke und Herrn Giovanni Leva für die Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Kurzfassung

Der Fokus meiner Arbeit liegt auf der Bewertung des Einflusses von Hagelabwehrfliegern im Landkreis Rosenheim. Das Ziel besteht darin, ein Maß für die Effektivität der Einbringung eines Silberjodid-Aceton-Gemisches mittels Flugzeuge in Gewitterwolken zu ermitteln. Hierfür wird eine App entwickelt, die es ermöglicht, an vergangenen Tagen, an denen Hagelereignisse aufgetreten sind, ohne den tatsächlichen Einsatz der Hagelabwehr, die Flugroute eines Hagelfliegers nachzusimulieren. Anschließend werden die potenziell behandelten Gewitterzellen mit den tatsächlich behandelten Gewitterzellen verglichen. Durch den Einsatz statistischer Verfahren sollen mögliche Korrelationen zwischen dem Verlauf der Gewitterzellen und der Hagelabwehrmaßnahme ermittelt werden.

Abstract

The focus of my work lies in evaluating the impact of hail suppression aircraft in the district of Rosenheim. The objective is to determine a measure of effectiveness for the introduction of a silver iodide-acetone mixture into thunderclouds using airplanes. For this purpose, an app is being developed to simulate past days with hail events without the actual implementation of hail suppression measures. Subsequently, the potentially treated thunder cells will be compared with the actually treated ones. Statistical methods will be employed to identify possible correlations between the evolution of thunder cells and the hail suppression intervention.

Inhaltsverzeichnis

I	Abbildungsverzeichnis	VI
II	Tabellenverzeichnis	VIII
III	Abkürzungsverzeichnis	IX
1	Einleitung.....	1
1.1	Entstehung von Hagel und seine Folgen	1
1.2	Ursprung und Entwicklung der Hagelabwehr	3
1.3	Projekt RO-BERTA an der TH Rosenheim	4
1.4	Bewertung der Effektivität von Hagelabwehrmethoden	5
2	Schwierigkeiten bei der Bewertung von Hagelabwehrsystemen.....	7
2.1	Beurteilung eines erfolgreichen Hagelabwehrversuches	7
2.2	Mögliche Hagelzunahme trotz Impfung.....	8
2.3	Schwierigkeiten bei der Simulation	9
3	Ansatz zur Untersuchung des Hagelverlaufs von Gewitterzellen	10
3.1	Notwendige Daten für die Analyse	10
3.1.1	Flugdaten.....	10
3.1.2	Radardaten.....	11
3.1.3	KONRAD Daten	13
3.2	Wahl der Tage für die virtuelle Nachstellung	16
3.3	VirtualFlightCreator zur Simulation von Hagelabwehrflügen.....	18
3.3.1	Ansatz zur Simulierung virtueller Flüge	18
3.3.2	Aufbau und Bedienung der App.....	19
3.4	Hagelverlauf anhand der Anzahlen an Hagelpixel im Zellkern.....	24
3.5	Schwierigkeiten bei der Analyse über die Hagelpixelpixelanzahlen	25
3.5.1	Fehlende Kenntnis über die Verteilung des Silberjodids.....	25
3.5.1	Fehlende Kenntnisse über die erforderliche Impfdauer	26
3.6	Einführung einer Impfgeometrie zur Bestimmung des Wirkungsbereiches.....	27

4	Auswertung der Gewitterzellen zur Ermittlung eines Maßes an Effektivität	29
4.1	Angewandte statistische Tests.....	29
4.1.1	Shapiro-Test – Ermittlung einer Normalverteilung	29
4.1.2	F-Test – Prüfung auf Varianzgleichheit	30
4.1.3	T-Test – Zweistichprobentest für unabhängige Stichproben	30
4.1.4	Wilcoxon-Rang-Test – Lageunterschiedsvergleich zweier Gruppen .	31
4.1.5	Effektstärke nach Cohen’s	32
4.2	Untersuchung der Zu- und Abnahmen bis zu definierten Zeitpunkten.....	33
4.3	Untersuchung der Zunahme bis zum Maximum und der Abnahme ab dem Maximum	34
4.3.1	Zunahme bis zum Maximum.....	35
4.3.2	Abnahme ab dem Maximum	38
4.4	Untersuchung der Maximalanzahlen an Hagelpixel im Zellkern.....	40
4.5	Ergebnisse aus der Auswertung	43
5	Untersuchung der Empfindlichkeit der Effektivität.....	44
5.1	Einfluss des Abstands zwischen Flugzeug und Zelle.....	44
5.1.1	Variieren der Impfgeometrie	44
5.1.2	Ergebnisse bei der Betrachtung einer größeren Impfgeometrie.....	50
5.2	Einfluss der Wahl einer größeren Mindestimpfdauer	51
5.2.1	Variieren der Mindestimpfdauer	51
5.2.1	Ergebnisse bei der Wahl einer größeren Mindestimpfdauer	57
5.3	Einfluss kurz auftretender Echostufen 6: Eine vertiefte Betrachtung	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	60
6.1	Zusammenfassung und Fazit.....	60
6.2	Ausblick	61
IV	Literaturverzeichnis.....	V
V	Anhang.....	LXIII

I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Hagelentstehung (Hagelabwehrverband Ostschweiz, 2023).....	2
Abbildung 2 Hagelnavigator im Cockpit (Technische Hochschule Rosenheim, 2021).....	4
Abbildung 3 Station aus Hageltestplatten (B.Federer, 1986).....	5
Abbildung 4 Klassifizierung der Echoklassen von 1 bis 6 (sehr leicht bis extrem) (Bernatzky, 2018).....	11
Abbildung 5 PL-Radarbild aus dem Zeitpunkt 14:41 UTC am 03.08.2001 in Hohenpeißenberg (Lang, 2003).....	12
Abbildung 6 Muster einer KONRAD-Zellanalyse einer Gewitterlinie am 17.08.2000 in Berlin (Lang, 2003)	15
Abbildung 7 Beispielhafte Suche nach Tagen mit Hagelereignissen in der App "FindHaildays" (Eigene Darstellung).....	17
Abbildung 8 Benutzeroberfläche des Reiters „Take-off Time“ zur Bestimmung des Flugstarts (Eigene Darstellung).....	19
Abbildung 9 Ermittlung des Zeitpunkts des Maximums am 06.06.2018 (Eigene Darstellung)	20
Abbildung 10 Benutzeroberfläche des Reiters „Virtual Flight“ zur Erstellung des Flugwegs (Eigene Darstellung).....	21
Abbildung 11 Wirkreichweite der Impfgeometrie (Bernatzky, 2018)	27
Abbildung 12 Betrachtung der Impfgeometrie für verschiedene Radien (Eigene Darstellung)	28
Abbildung 13 Formel zur Bestimmung der Teststatistik des Shapiro-Test (Eigene Darstellung)	30
Abbildung 14 Formel zur Bestimmung der Effektstärke nach Cohen (Eigene Darstellung)	32
Abbildung 15 Zeitlicher Verlauf der Hagelpixelanzahlen der Echostufen 5 und 6 am Beispiel einer Gewitterzelle aus dem 16.06.2006 (Eigene Darstellung).....	33
Abbildung 16 Boxplots der Zunahme Phase (Impfgeometrie = 10km, Mindestimpfdauer = 10min).....	35
Abbildung 17 Boxplot der Abnahmephase (Impfgeometrie = 10km, Mindestimpfdauer = 10min).....	38
Abbildung 18 Boxplots der Maximalanzahlen (Impfgeometrie = 10km, Mindestimpfdauer = 10min).....	40

Abbildung 19 Mediane der Zunahmen für verschiedene Impfgeometrien (Eigene Darstellung)	44
Abbildung 20 Mediane der Abnahmen für verschiedene Impfgeometrien (Eigene Darstellung)	46
Abbildung 21 Mediane der Maximalanzahlen an Hagelpixel im Zellkern für verschiedene Impfgeometrien	48
Abbildung 22 Mediane der Zunahmen für verschiedene Mindestimpfdauern (Eigene Darstellung)	51
Abbildung 23 Mediane der Abnahmen für verschiedene Mindestimpfdauern (Eigene Darstellung)	53
Abbildung 24 Mediane der Maximalanzahlen an Hagelpixel im Zellkern für verschiedene Mindestimpfdauern (Eigene Darstellung)	55

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ergebnisse des Shapiro-Test und des F-Tests für die Zunahme.....	36
Tabelle 2 Ergebnisse des T-Test/Wilcoxon-Test für die Zunahme.....	37
Tabelle 3 Ergebnisse der Cohens Effektstärke für die Zunahme	37
Tabelle 4 Ergebnisse des Shapiro-Test und des F-Test für die Abnahme.....	39
Tabelle 5 Ergebnisse des T-Tests für die Abnahme	39
Tabelle 6 Ergebnisse des Shapiro-Tests und F-Test für die Maxima der Hagelpixelanzahlen .	41
Tabelle 7 Ergebnisse des T-Tests für die Maxima der Hagelpixelanzahlen	41
Tabelle 8 Ergebnisse der Chohen's Effektstärke für die Maxima der Hagelpixelanzahlen	42
Tabelle 9 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Zunahme bei Variieren der Impfgeometrie	45
Tabelle 10 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Abnahme bei Variieren der Impfgeometrie	47
Tabelle 11 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern bei Variieren der Impfgeometrie.....	49
Tabelle 12 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Zunahme bei Variieren der Impfgeometrie	52
Tabelle 13 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Abnahmen bei Variieren der Impfgeometrie	54
Tabelle 14 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern bei Variieren der Mindestimpfdauer.....	56
Tabelle 15 Anzahl der herausgefilterter Gewitterzellen bei Erhöhung der Mindestlebensdauer der Echostufe 6 und Erhöhung der Mindestanzahl an Hagelpixel im Zellkern.....	58
Tabelle 16 P-Werte der Signifikanztests bei Erhöhung der Mindestlebensdauer der Echostufe 6 und Erhöhung der Mindestanzahl an Hagelpixel im Zellkern.....	59

III Abkürzungsverzeichnis

DWD	Deutscher Wetterdienst
H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
W	Teststatistik des Shapiro-Wilk-Tests
X_1, \dots, X_m und Y_1, \dots, Y_n	Stichprobenvariablen
a_i	Tabellierte Gewichte (aus z.B. Shapiro und Wilk)
σ	Standardabweichung
F und G	Verteilungsfunktionen
α	Signifikanzniveau
T^+	Summe der positiven Rangzahlen
T^-	Summe der negativen Rangzahlen
$w_{n,\gamma}$	Tabellierte Quantile zum Wilcoxon-Test
d	Effektstärke
μ_A	Mittelwert der Stichprobe A
μ_B	Mittelwert der Stichprobe B

1 Einleitung

Am Abend des 21. Juni 2021 wurde Wolfratshausen von tiefdunklen Wolken überzogen. Hagelkörner in der Größe von Golfbällen fielen minutenlang vom Himmel, gefolgt von sintflutartigem Regen. Das Unwetter verursachte einen erheblichen Schaden in der Region, der auch fast drei Monate nach dem Vorfall noch nicht genau beziffert werden kann. Wenn man die einzelnen Berichte verschiedener Kfz-Versicherer zusammenzählt, ergibt sich jedoch schnell eine Schadenssumme von über 150 Millionen Euro. (Eick, C.-C., 2021)

Ähnliche Ereignisse wie am 21. Juni in Wolfratshausen belasteten auch andere Landkreise in Bayern im Jahr 2021. „Es war ein Hageljahr, wie ich es in den vergangenen 40 Jahren noch nicht erlebt habe“, beschrieb Georg Vogl, Geschäftsführer und Einsatzleiter der Hagelabwehr Rosenheim, das Wettergeschehen im Landkreis Rosenheim. (Vogl, 2021)

Georg Vogl und sein Team, bestehend aus mehreren Piloten, setzen sich jedes Jahr das Ziel, der Bildung großer Hagelkörner entgegenzuwirken. Sie transportieren eine Silberjodid-Aceton-Lösung in die Wolken und verbrennen sie, um das Wachstum der Hagelkörner zu stoppen und schwerwiegende Hagelschäden zu verhindern.

Die Hochschule Rosenheim unterstützt sie dabei, sich im nebligen Wolkeninneren zurechtzufinden und die Impfung präziser einzubringen. Zudem arbeitet die Hochschule daran, anhand der gesammelten Wetter- und Flugdaten die Effektivität der Hagelabwehrflieger zu bewerten.

1.1 Entstehung von Hagel und seine Folgen

Die Piloten der Hagelabwehr in Rosenheim sind in den warmen Monaten von Mai bis September aktiv (Hagelabwehr Rosenheim – Crew, o.D). In dieser Jahreszeit ist die Atmosphäre aufgrund der hohen Temperaturen und der damit verbundenen Temperaturunterschiede feucht. Dadurch entstehen thermische Aufwinde. Diesen Vorgang nennt man Nukleation. Bereits bei Temperaturen knapp unter 0°C können sich Eisteilchen formen, indem Wassertröpfchen an Eiskeimen anfrieren. Damit das kleine Hagelkorn, auch Nuklei genannt, weiterwachsen kann, müssen sich weitere Tröpfchen oder Eisteilchen an das Hagelebryo anlagern. Dies geschieht vor allem im Bereich des Aufwindes, da hier durch den Vertikalwind eine große Menge an unterkühlten Tröpfchen herangeführt werden kann. Diesen Prozess nennt man Akkreszenz. Das Wachstum des Hagelkorns hängt maßgeblich davon ab, wie lange sich das Hagelebryo im Bereich der unterkühlten Tröpfchen halten kann. In Superzellen, zum Beispiel, können sehr große Hagelsteine entstehen, da das Hagelebryo

aufgrund seiner langen Verweildauer im spiralförmigen Aufwindschlauch viele unterkühlte Wassertröpfchen ansammeln kann. Dies bedeutet, dass die Akkreszenzrate relativ hoch ist. Hagelkörner weisen unterschiedliche Formen und Strukturen auf. Dies hängt davon ab, ob das Wachstum des Hagelkorns trocken oder feucht erfolgt. Beim trockenen Wachstum werden kleine Luftbläschen im Hagelkorn eingeschlossen, wodurch die entstehende Hagelschicht undurchsichtig wird. Beim feuchten Wachstum hingegen bleibt das Hagelkorn transparent. Oftmals wechseln die Wachstumsarten während der Entstehung von Hagel, sodass ein Hagelkorn aus transparenten und undurchsichtigen Schichten besteht. Sobald das Hagelkorn ausreichend schwer geworden ist und die Gravitationskraft (Erdbeschleunigung) stärker ist als die Auftriebskraft, die das Hagelkorn durch starke Aufwinde erfährt, fällt es auf den Boden und kann erhebliche Schäden verursachen. (Schmid, 2020)

Die beiliegende Abbildung zeigt anschaulich den Entwicklungsverlauf eines großen Hagelkorns. Es wird deutlich, wie sich transparente und undurchsichtige Schichten abwechseln und den Aufbau des Hagelkorns bilden.

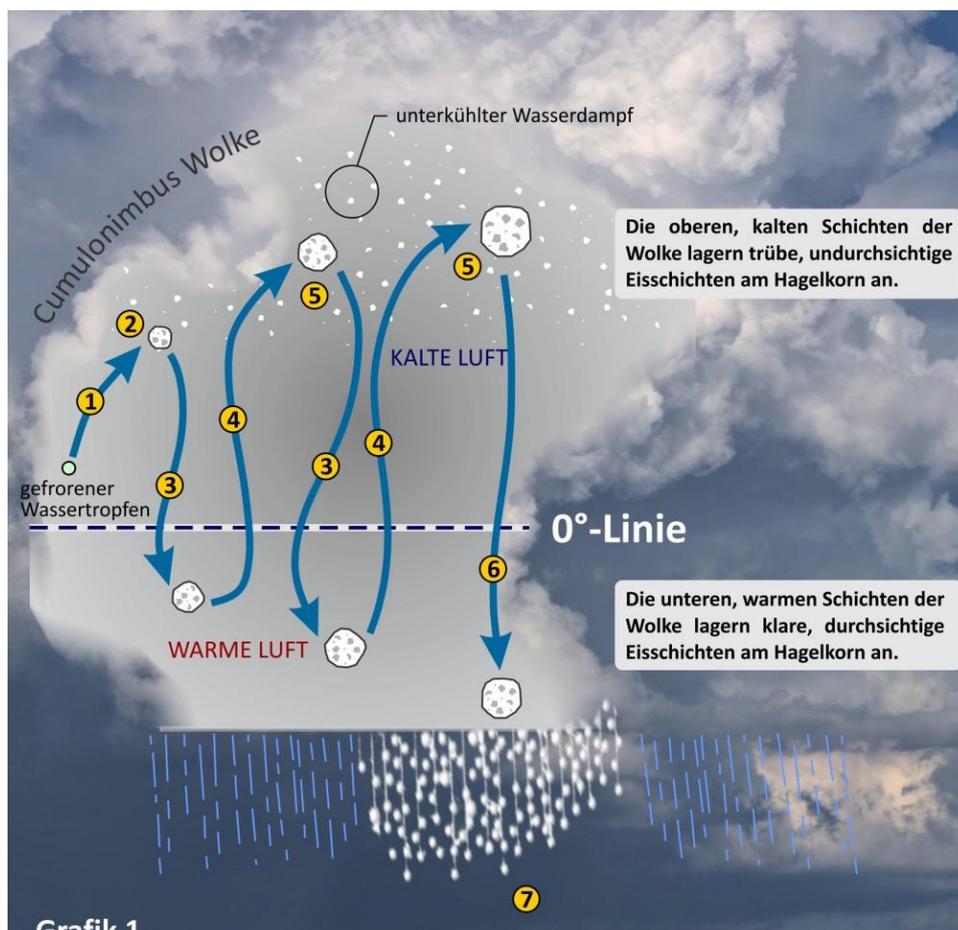


Abbildung 1 Hagelentstehung (Hagelabwehrverband Ostschweiz, 2023)

1.2 Ursprung und Entwicklung der Hagelabwehr

Bereits in den 1930er Jahren wurden im Landkreis Rosenheim erste Versuche zur Bekämpfung von Hagel durchgeführt. Hierbei wurden Hagelabwehr-Raketen verwendet, die mit Silberjodid gefüllt waren. Diese Raketen wurden in die Gewitterwolken abgefeuert, wodurch die enthaltenen Kristallisationskeime freigesetzt wurden. Durch diese Maßnahme konnte vermehrt die Bildung von kleinen Hagelkörnern gefördert werden, wodurch diese weniger Schaden verursachten, wenn sie auf den Boden aufprallten.

Später kamen Bodengeneratoren zum Einsatz, die eine Lösung aus Silberjodid und Aceton enthielten. Durch das Entzünden einer Gasflamme wurde die Lösung verbrannt, wodurch eine Saugwirkung entstand. Die dabei freigesetzten Kristallisationskeime stiegen über die Gasflamme in die Wolken auf.

Aufgrund von Änderungen im Sprengstoffgesetz im Jahr 1970 musste eine alternative Lösung für die Zufuhr von Silberjodid in die Wolken gefunden werden. Zu diesem Zeitpunkt bot es sich an, Flugzeuge für diesen Zweck einzusetzen. Der Bauingenieur Hermann Selbertinger konstruierte den ersten Generator und montierte ihn an einer „Piaggio P149 D“, mit der er zwölf Jahre lang in den Landkreisen Rosenheim, Miesbach und Traunstein gegen Hagel kämpfte. Ab 1982 kamen zwei zweimotorige Flugzeuge des Typs Partenavia PN 68 zum Einsatz. An den Tragflächen dieser Flugzeuge wurden raketenförmige Generatoren angebracht, die mit Silberjodid-Aceton gefüllt waren. Sobald sich der Pilot in einem Aufwindkanal einer Gewitterwolke befindet, zündet er das in einer Brennkammer gespritzte Gemisch mithilfe einer Steuereinheit. Dadurch werden die Kristallisationskeime in das Innere der Wolken transportiert. Im Jahr 2007 begann eine Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Rosenheim, um die Genauigkeit der Impfung zu optimieren und somit effektiver gegen Hagel vorzugehen. (Hagelabwehr Rosenheim – Geschichtliches, o.D).

1.3 Projekt RO-BERTA an der TH Rosenheim

Seit Jahrzehnten verbindet die Landkreise Rosenheim, Miesbach und Traunstein ein gemeinsamer Kampf gegen Hagel. Seit 2008 erhalten sie Unterstützung von der Technischen Hochschule Rosenheim durch das Projekt „RO-BERTA“. Unter der Leitung von Prof. Dr. Peter Zentgraf und seinem Team wurde ein Hagelnavigator entwickelt, der dem Piloten dabei hilft, sich in der nebligen und unübersichtlichen Umgebung zurechtzufinden.

Mithilfe eines Radars erfasst der Deutsche Wetterdienst (DWD) den Himmel auf mögliche Hagelzentren. Die Reflexion der Echos ermöglicht es, die Intensität der Gewitterwolke zu lokalisieren. Anhand dieser Echodaten und Wettervorhersagemodelle wird entschieden, ob ein Hagelabwehrflug durchgeführt werden muss. Da ab einer Höhe von 1 km keine mobile Datenkommunikation mehr möglich ist, werden dem Piloten alle 5 Minuten komprimierte Echodaten zugesendet und auf einem elektronischen Display angezeigt. Die GPS-Daten des Flugzeugs werden ebenfalls erfasst und auf dem Display dargestellt. Dadurch kennt der Pilot seine genaue Position und kann seine Flugbahn entsprechend der aktuellen Wetterlage anpassen.



Abbildung 2 Hagelnavigator im Cockpit (Technische Hochschule Rosenheim, 2021)

Der Zeitpunkt des Erreichens einer Gewitterwolke ist für die Hagelabwehr entscheidend. Je früher sich das Flugzeug in der Nähe befindet, desto höher ist die Möglichkeit, Hagel erfolgreich abzuwehren. Dabei spielt die Genauigkeit der Vorhersagemodelle eine wichtige Rolle. Durch eine von RO-BERTA entwickelte App haben Smartphone-Nutzer und Computerbesitzer die Möglichkeit, selbst einen Beitrag zur Hagelabwehr zu leisten. Benutzer können die aktuelle Wettersituation melden. Die gesammelten Meldungen mit Angaben zu Ort und Zeit werden den Meteorologen des Deutschen Wetterdienstes zur Analyse zur Verfügung gestellt. Gemeinsam mit anderen Prognosemodellen kann dadurch die Wettervorhersage verbessert werden, was dem Piloten wiederum hilft, frühzeitig mit der Wolkenimpfung zu beginnen, wodurch der Einsatz mit höherer Wahrscheinlichkeit erfolgreich sein kann.

(Zentgraf et al., 2021)

1.4 Bewertung der Effektivität von Hagelabwehrmethoden

Die Frage, ob es tatsächlich möglich ist, die Größe der Hagelkörner durch die Impfung von Gewitterwolken zu beeinflussen, ist umstritten. Im Labor besteht zumindest Gewissheit. Das Silberjodid-Aceton-Gemisch, das in die Wolken eingebracht wird, zerstäubt sich in zahllose Kristallisationskeime, die sich an Wassertropfen anlagern und viel Feuchtigkeit binden. (S. Yazar, 2017). Dadurch entstehen zwar mehr Hagelkörner, aber sie sind kleiner und weniger bedrohlich. Allerdings bestehen Zweifel, ob diese gewünschte Wirkung in der Praxis erzielt werden kann, da in Gewitterwolken starke Kräfte und Aufwinde herrschen. Der entscheidende Faktor ist der richtige Ort und Zeitpunkt der Impfung, damit das Silberjodid Einfluss auf die Hagelentwicklung nehmen kann. Wenn die Hagelkörner bereits eine bestimmte Größe erreicht haben, ist es zu spät, da ihre Größe nicht mehr reduziert werden kann.

Zwischen 1982 und 2002 untersuchte die Steirische Hagelabwehrgenossenschaft in Zusammenarbeit mit der ZAMG Wien die Effizienz der Hagelabwehrmaßnahmen in der Steiermark in Österreich. Dazu wurden 181 Stationen mit sogenannten Hageltestplatten in einem Schutzgebiet von 500 km² aufgestellt. Diese Stationen wurden von ehrenamtlichen Bürgern betreut, die im Falle von Hagelschäden die Platten zusammen mit Kärtchen, auf denen Informationen zum Hagelereignis vermerkt waren, an die ZAMG zurückschickten.

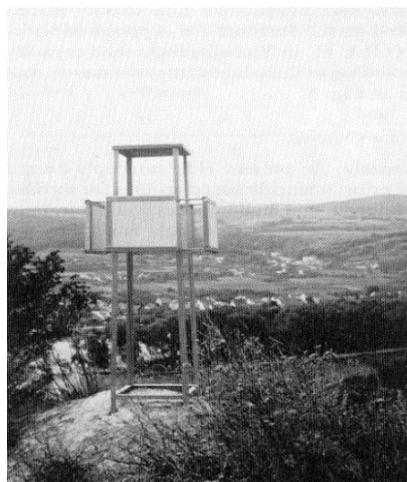


Abbildung 3 Station aus Hageltestplatten (B.Federer, 1986)

Allerdings waren im Vergleich zu den zurückgeschickten Hageltestplatten nur wenige Hagelkarten vorhanden, was zu fehlenden Datensätzen führte. Die ZAMG analysierte daraufhin genauer die auf den Platten vorhandenen Hagelereignisse. Besonders interessant war dabei das Spektrum der Korngrößen über den gesamten Zeitraum, also die Größe der Hagelkörner und die Bewegungsenergie pro Quadratmeter. Im Zeitraum von 1991 bis 2001 konnte tatsächlich eine vermehrte Anzahl kleinerer Hagelkörner und eine verringerte Anzahl größerer Körner

festgestellt werden, was auf die Hagelabwehrmaßnahmen hindeutet. Die Effizienz wurde auf technische Verbesserungen der Generatoren und eine präzisere Anwendung des Silberjodids zurückgeführt. Der durchschnittliche Energiewert stieg jedoch erst in den letzten Jahren an, was auf die zunehmende Heftigkeit der Hagelgewitter in den letzten Jahren zurückzuführen ist. Zudem fiel auf, dass die Anzahl der Hageltage pro Jahr im zweiten Zeitraum abgenommen hat, was jedoch eher meteorologische Ursachen haben könnte. (Pachatz, G. C., 10.2005)

Kritiker zweifeln auch an der Wirksamkeit der Hagelabwehr und weisen auf fehlende Vergleichszeiträume und -regionen hin. Zudem betonen sie, dass das Wetter sehr launisch sein kann und es natürlich ist, dass es Jahre gibt, in denen vermehrt Gewitterwolken auftreten. In der ehemaligen Sowjetunion wurden zur Wetterbeeinflussung Hagelabwehrraketen mit Silberjodid eingesetzt. Untersuchungen zur kinetischen Energie geimpfter und nicht geimpfter Hagelzellen ergaben, dass eine Hagelreduktion durch Hagelabwehr zwischen 70 % und 90 % erreicht werden konnte. Forscher aus Frankreich, Italien und der Schweiz führten in einem Gebiet mit einer Fläche von 1300 km² in der Zentralschweiz eine identische Analyse durch. Dabei wurden die gleichen Raketen und Mengen wie in der Sowjetunion verwendet, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Allerdings konnte in den meisten Tests keine statistisch signifikante Wirkung der Hagelabwehr auf die kinetische Energie der Hagelzellen nachgewiesen werden. Somit konnten die Ergebnisse der Sowjetunion nicht bestätigt werden (B. Federer et. Al., 1986).

Weitere Forschung ist erforderlich, um die Wirkung der Hagelabwehr und die Einflüsse auf die Wolkenbildung besser zu verstehen.

2 Schwierigkeiten bei der Bewertung von Hagelabwehrsystemen

Die Bewertung der Effektivität von Hagelabwehrflügen gestaltet sich aufgrund der Vielseitigkeit jeder Gewitterwolke als schwierig. Gewitterwolken unterscheiden sich erheblich in ihrer Größe, ihrer Lebensdauer und den auftretenden Kräften im Inneren. Diese Vielfalt stellt Herausforderungen bei der Bewertung des Hagelabwehrsystems dar. Im Folgenden wird genauer auf die Schwierigkeiten eingegangen, die mit der Bewertung der Hagelabwehr verbunden sind.

2.1 Beurteilung eines erfolgreichen Hagelabwehrversuches

Die Beurteilung der Effektivität von Hagelabwehrflügen gestaltet sich oft schwierig, da es keine klaren Referenzen gibt, die deutlich darauf hinweisen, ob die Impfung tatsächlich zur geringeren Intensität der Gewitterwolke geführt hat oder ob das Gewitter auf natürliche Weise die Hagelbildung eingestellt hat. Jede Gewitterwolke ist einzigartig, und es gibt erhebliche Unterschiede in ihrer Größe, ihrer Heftigkeit, den auftretenden Aufwinden und der Zugrichtung. Die Komplexität der Gewitterwolken und die Vielzahl ihrer Eigenschaften erschweren die Suche nach einer geeigneten Kennzahl zur Beurteilung der Hagelabwehrversuche.

Gewitterwolken treten selten isoliert auf, sondern sind oft von weiteren potenziell hagelgefährdeten Wolken umgeben, die nur bedingt mitbeimpft werden können. In der Region um Rosenheim werden derzeit zwei zweimotorige Leichtflugzeuge eingesetzt, um ein Schutzgebiet von 4800 Quadratkilometern zu beimpfen. (Hagelabwehr Rosenheim – Crew, o.D). Aufgrund der unterschiedlichen Abstände zwischen den einzelnen Gewitterzellen innerhalb der Wolken erfolgt die Beimpfung der Zellen mit Silberjodid unterschiedlich lange und intensiv. Die KONRAD-Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes sollen dazu verwendet werden, um anhand von Echosignalen die einzelnen Gewitterzellen zu identifizieren und ihre Stärke sowie Zugrichtung zu bestimmen. Die genaue Beschreibung der KONRAD-Wetterdaten wird im Kapitel 3.1.2 behandelt. Diese Daten ermöglichen eine genauere Analyse einzelner Gewitterzellen. Es ist jedoch noch nicht bekannt, wie nah sich ein Flugzeug einer Gewitterzelle annähern muss, damit das Silberjodid den Zellkern erreicht und eine Wirkung erzielt. Daher ist unklar, welche Gewitterzellen tatsächlich beimpft wurden und bewertet werden sollten.

2.2 Mögliche Hagelzunahme trotz Hagelabwehr

Die Bewertung eines Hagelabwehrversuchs wird zudem durch den zeitlichen Verlauf der Intensität des Hagelfalls erschwert. Ideal wäre ein linearer Anstieg der Hagelintensität mit einem anschließenden Maximum, bei dem die Hagelkörner ihr größtes Volumen erreichen, gefolgt von einer linearen Abnahme, bis die Hagelbildung endet. In der Realität gestaltet sich dieser Verlauf jedoch anders. Die Zu- und Abnahme der Hagelintensität weist eher einen nicht-linearen Verlauf auf, der stark von den Auf- und Abwinden sowie den damit verbundenen Kräften und Geschwindigkeiten der Hagelkörner abhängt. Durch starke Auf- und Abwinde werden die Körner, wie in Kapitel 1.1 beschrieben, mit hoher Geschwindigkeit ins Wolkeninnere befördert und anschließend wieder herunter. Dies führt dazu, dass die Hagelkörner schneller an Größe und Gewicht gewinnen. Andererseits benötigen die Körner bei geringeren Kräften mehr Zeit, um ein bestimmtes Volumen zu erreichen. Der Beginn des Hagelfalls hängt auch von den Auf- und Abwinden ab. Je nach Stärke können größere Körner länger oder kürzer im Wolkeninneren festgehalten werden, bis sie das Gewicht nicht mehr tragen können und herunterfallen. Da sich das Verhalten der Wolken im Laufe der Zeit verändert, kommt es zu Schwankungen in der Stärke der Zu- und Abnahme der Hagelkörner. Dieses unberechenbare Verhalten der Gewitterwolken erschwert die nachträgliche Entscheidung, ob die Entstehung vieler kleinerer Hagelkörner auf die Abwehr mittels Impfung durch Hagelflieger zurückzuführen ist oder ob die Hagelbildung auf natürliche Weise an Intensität verloren hat.

Sobald dem Piloten bewusst wird, dass sich potenziell Hagelkörner in einer Gewitterwolke bilden, begibt er sich zu den Aufwinden, um das Silberjodid in die Wolken einzubringen. Dabei ist folgendes Szenario gut möglich: Auf dem Weg zur Wolke nimmt die Hagelbildung allmählich zu. Befindet sich die Gewitterwolke nun in der Nähe des Hagelfliegers, könnte man zunächst annehmen, dass die Bildung großer und schwerer Hagelkörner durch die verbrannte Silberjodid-Lösung gehemmt wird. Es kann jedoch passieren, dass die vorhandenen Auf- und Abwinde auf natürliche Weise unerwartet stark zunehmen, was die Bildung von großen Hagelkörnern begünstigen würde. Das gleichzeitige Auftreten beider Einflüsse könnte zur Folge haben, dass trotz der Wolkenimpfung mit Silberjodid vorübergehend eine geringere Abnahme oder sogar eine Zunahme der Hagelkorngröße auftritt. Dieses unvorhersehbare Verhalten der Gewitterwolken beeinträchtigt die Bewertung der Wirkung des Hagelabwehrversuchs und erschwert die Ermittlung des Effekts der Impfung.

2.3 Schwierigkeiten bei der Simulation

In den folgenden Kapiteln werden Gewitterwolken, die in den letzten 15 Jahren mittels Hagelabwehrflieger beimpft wurden, mit nicht beimpften Gewitterwolken verglichen, um mögliche Korrelationen zwischen der Hagelbildung und der Hagelabwehrmethode zu ermitteln. Für die Tage, an denen keine Hagelflieger im Einsatz waren, werden die vergangenen Radarbilder dem Piloten Herrn Georg Vogl in fünfminütigen Intervallen dargestellt, damit er seinen Flugweg schrittweise am Computer nachstellen kann. Zunächst wird jedoch genauer auf die Schwierigkeiten bei der Nachstellung eines Hagelabwehrversuchs mittels Hagelflieger eingegangen. Die im Anschluss beschriebene Methodik zur Nachsimulierung ermöglicht es dem Piloten auf leicht verständliche Weise, seine vermutliche Flugroute nachzustellen. Sie weist jedoch einige kleine Mängel auf.

Zum einen fehlt die direkte Kommunikation mit dem Meteorologen, der den Piloten dabei unterstützt, den richtigen Zeitpunkt für den Flugstart zu finden. Die wertvollen Fachkenntnisse des Meteorologen stehen dem Piloten bei der Nachstellung nicht zur Verfügung, und er muss selbst entscheiden, wann er einen Hagelabwehrversuch durchführen möchte. Zum anderen hat der Pilot keine Sicht auf die Gewitterwolke aus dem Cockpit des Hagelfliegers. Das Erscheinungsbild der Wolke gibt wichtige Hinweise auf die Position der Aufwinde, zu denen sich der Pilot gezielt bewegen kann, um die Silberjodid-Lösung dort einzubringen. Dies ist entscheidend, damit die Impfung einen effektiven Einfluss auf die Hagelbildung nehmen kann. Bei der virtuellen Nachstellung trifft der Pilot die Entscheidung für den nächsten Wegpunkt lediglich anhand des letzten Radarbildes vor fünf Minuten. Im realen Flugbetrieb ist es für den Piloten hilfreich, die aktuelle Größe und Struktur der Gewitterwolke zu beobachten, da sich die lokalen Wetterbedingungen stark verändern können. Zudem wird bei der virtuellen Nachstellung der Zeitverlust durch die Vorbereitung nicht berücksichtigt. Normalerweise untersucht der Pilot das Wettergeschehen zunächst anhand der Radarbilder auf einem Computer. Sobald er gemeinsam mit einem Meteorologen feststellt, dass eine Gewitterwolke, die potenziell Hagelkörner bilden könnte, in Kürze das Schutzgebiet der Hagelabwehr Rosenheim erreichen wird, begibt er sich zum Flugzeug und fliegt in Richtung des Einsatzorts. Bei der Nachstellung hingegen startet der Pilot zwar vom Flugplatz in Vogtareuth aus und setzt dort den ersten Wegpunkt, jedoch wird die verlorene Zeit für die Vorbereitung bis zum Start des Einsatzes nicht berücksichtigt.

3 Ansatz zur Untersuchung des Hagelverlaufs von Gewitterzellen

Um vergangene und zukünftige Hagelabwehrversuche besser bewerten zu können, ist es notwendig, ein Maß zur Bestimmung der Effektivität der Hagelabwehr zu ermitteln. In diesem Zusammenhang wird die seit 1970 im Raum Rosenheim angewandte Methode des Einbringens von Silberjodid mittels Hagelflieger genauer untersucht. Ziel ist es, mögliche Zusammenhänge zwischen der Wolkenimpfung und einer potenziellen Abnahme des Hagelfalls zu ermitteln. Hierfür werden in diesem Kapitel Hageltage, an denen tatsächliche Abwehrversuche stattgefunden haben, mit Hageltagen verglichen, an denen die Flugroute nachgestellt wurde. Eine realitätsnahe Nachstellung der Flugroute ist dabei von großer Bedeutung, da dadurch der Impfzeitraum der vermutlich in der Realität potenziell von der Impfung betroffenen Gewitterzellen selektiert und untersucht werden können. Somit lässt sich das Verhalten der tatsächlich beimpten Gewitterzellen mit dem Verhalten der wahrscheinlich beimpten Gewitterzellen an den Tagen, an denen die Hagelflieger nicht im Einsatz waren, abgleichen. Dadurch wird erhofft, Erkenntnisse über die Wirksamkeit der Hagelabwehrmethode und mögliche Auswirkungen auf die Hagelbildung zu gewinnen.

3.1 Notwendige Daten für die Analyse

Für die Untersuchung wird eine Vielzahl an Daten genutzt. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Arten genauer beschrieben.

3.1.1 Flugdaten

Derzeit sind in Rosenheim zwei zweimotorige Flugzeuge für die Hagelabwehr im Einsatz. Diese Flugzeuge tragen die Kennungen D-GITY und D-GOGO und zeichnen sich durch ihre robuste Bauweise und ihre Fähigkeit zum Langsamflug aus, wodurch sie sich ideal für den Einsatz als Hagelabwehr-Maschinen eignen. Jedes Flugzeug verfügt über eine Motorleistung von 210 PS, was eine maximale Reisegeschwindigkeit von 300 km/h ermöglicht.

(Hagelabwehr Rosenheim – Flugzeuge, o.D).

Für eine anschließende Analyse und Auswertung übermitteln die Hagelflieger über ein Funksignal relevante Informationen wie ihre aktuelle Position, die Außentemperatur sowie Angaben zum Luftdruck in hPa, und zur Luftfeuchtigkeit in Prozent. Zusätzlich wird die Menge an verbrauchtem Silberjodid pro Generator aufgezeichnet und gesichert.

Zur genauen Positionsbestimmung sind die Flugzeuge mit einer GPS-Maus ausgestattet, die kontinuierlich die aktuellen Positionen erfasst. Diese Positionen werden in Form von Breitengraden (Latitude) und Längengraden (Longitude) aufgezeichnet. Die gesammelten

Daten werden in der Datenbank „atmos_03type000robert“ für allgemeine Aufzeichnungen und in der Datenbank „atmos_03type000jeppesen“ speziell für die Positionen der GPS-Maus gespeichert. Mithilfe einer SQL-Abfrage können die Daten in MATLAB abgerufen und weiterverarbeitet werden. Diese umfangreiche Datensammlung ermöglicht es, detaillierte Analysen durchzuführen und Zusammenhänge zwischen den Flugzeugpositionen, den atmosphärischen Bedingungen und den eingesetzten Mengen an Silberjodid zu untersuchen. Diese Informationen sind von großer Bedeutung, um die Effektivität der Hagelabwehrmethode zu bewerten und mögliche Verbesserungen oder Anpassungen zu treffen. Die Daten dienen als wertvolle Grundlage für weiterführende Forschung und können dazu beitragen, den Schutz vor Hagelschäden kontinuierlich zu optimieren.

3.1.2 Radar Daten

Um dem Piloten sowohl während eines realen Einsatzes im Cockpit des Flugzeugs als auch bei der Nachstellung der virtuellen Flüge eine visuelle Darstellung der aktuellen Wetterlage zu ermöglichen, werden die Radardaten im fünfminütigen Takt zur Verfügung gestellt. Hierfür befindet sich etwa 50 Kilometer östlich von München in Isen ein 45 Meter hoher Wetterradarturm, der vom Deutschen Wetterdienst betrieben wird. Innerhalb des Turms befindet sich eine rotierende Antenne, die elektromagnetische Wellen in verschiedene Schrägwinkel ausstrahlt und wieder empfängt. Durch die Laufzeit des empfangenen Signals kann die Entfernung bestimmt werden, und anhand der zurückgesendeten Echos kann festgestellt werden, ob Wolken eine hohe Wassermenge enthalten oder sogar Festkörper wie Hagel aufweisen. Die Reflexionen der einzelnen Echos werden dabei auf einer Skala von 1 bis 6 eingestuft, wobei die Echostufe 6 eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Hagelkörnern bedeutet. (Technische Hochschule Rosenheim, 2021,02:00-02:30)

Reflektivitätsfaktor	
●	sehr leicht
●	leicht
●	mittel
●	schwer
●	sehr schwer
●	extrem

Abbildung 4 Klassifizierung der Echoklassen von 1 bis 6 (sehr leicht bis extrem) (Bernatzky, 2018)

Dabei werden die Radardaten in PZ-Daten und PX-Daten unterschieden:

PX-Daten (2-Dimensional) decken eine Fläche der Größe 200km x 200km ab und können zu einer 200x200 Matrix mit einer Auflösung von 1km dekodiert werden. Jedes Element dieser Matrix, definiert eine GPS-Position und besitzt einen Wert zwischen Null und sechs, der die Intensität des Radarechos kennzeichnet.

PZ-Daten (3-Dimensional) stellen ein Gebiet mit der Größe 400 km x 400 km als Radarbild dar. Dazu wird das Radarbild zu einer 200x2400-Matrix decodiert. Die Auflösung beträgt dabei 2 km. Das Radarbild kann auch in eine 200x200x12-Matrix umgewandelt werden, wobei eine 200x200-Matrix das Gebiet in einem 2D-Wolkenbild darstellt. Mit einer Höhe von zwölf Kilometern wird in Ein-Kilometer-Schritten jeweils eine Höhenschicht durch eine 200x200-Matrix dargestellt. Abhängig von der Reflektivität an dem jeweiligen Ort und der Höhenschicht wird in der Matrix eine Echoklasse gemäß den festgelegten Stufen zugewiesen.

Im Folgenden wird ein PL-Radarbild für den Zeitpunkt 14:41 UTC am 03.08.2001 um Hohenpeißenberg dargestellt, das die bodennahe Reflektivität und vertikaler Zellaufbau in 12 Kilometerflächen darstellt. Das eingeschobene Bild zeigt die entsprechende PX-Darstellung.

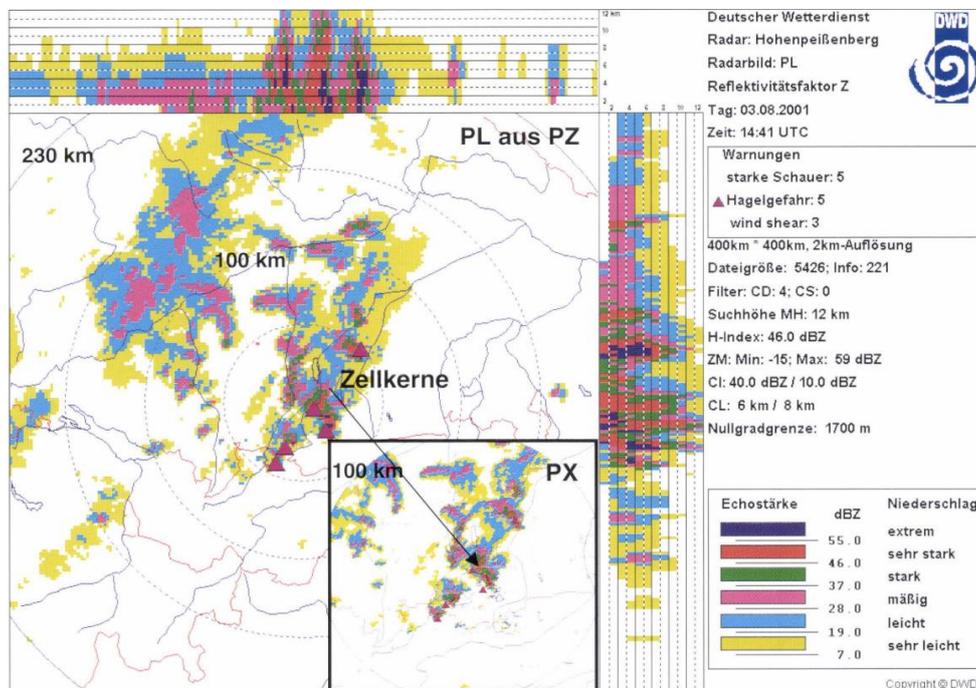


Abbildung 5 PL-Radarbild aus dem Zeitpunkt 14:41 UTC am 03.08.2001 in Hohenpeißenberg (Lang, 2003)

3.1.3 KONRAD-Daten

KONRAD (KONvektionsentwicklung in RADarprodukten) ist eine Wetterradar-basierte Methode, die automatisch Gewitterzellen erkennt, verfolgt und prognostiziert. Es liefert dem Benutzer umfassende und zuverlässige Informationen über die Intensität und Bewegungsrichtung eines Gewitters sowie Warnhinweise für Hagel, Starkregen und Windböen. (Konvektive Entwicklung (KONRAD), o.D)

Es basiert auf einer Kombination aus Radardaten, Satellitenbildern und Wetterstationen, um präzise Vorhersagen zu ermöglichen. Die Daten, die KONRAD nutzt, werden größtenteils von Radarsystemen gesammelt, die vom DWD betrieben werden. Diese werden dann in das KONRAD-Modellierungssystem eingespeist, das die aktuellen Bedingungen simuliert und Vorhersagen darüber trifft, wie sich die Gewitterzellen entwickeln werden. Um eine umfassende Analyse des Wettergeschehens durchzuführen und genaue Vorhersagen zu treffen, integriert KONRAD auch Daten von Wetterstationen und Satelliten. Diese Daten werden kontinuierlich aktualisiert, um sicherzustellen, dass die Vorhersagen von KONRAD stets auf dem neuesten Stand sind und den aktuellen Bedingungen entsprechen.

Alle fünf Minuten wird der aktuelle Zustand jeder vorhandenen Gewitterzelle mit 40 Parametern beschrieben. Diese Parameter können abgerufen und als Symbole auf einer Karte mit geografischem Hintergrund dargestellt werden. Die Verwendung von KONRAD-Daten ermöglicht es dem Deutschen Wetterdienst, genaue Vorhersagen über lokale Gewitter zu treffen und effektive Schutzmaßnahmen sowie Evakuierungen zur Minimierung von Schäden für Bevölkerung und Umwelt zu planen. (Lang, 2003)

Andreas Bernatzky, ein ehemaliger Student an der Hochschule Rosenheim, untersuchte die Effektivität der Hagelabwehr an zehn Tagen im Jahr 2018, an denen die Hagelabwehr in Rosenheim eingesetzt wurde. Dabei analysierte er die Anzahl der Radarechos vor, während und nach der Behandlung. Bei der Anwendung eines Cloudtarget-Ansatzes wurde festgestellt, dass an allen Tagen eine Abnahme der betrachteten Echoklassen zwischen dem Zustand vor dem Flug und nach dem Flug zu verzeichnen war. Lediglich an einem Tag wurde eine Zunahme nach dem Flug festgestellt. Für den Cloudtarget-Ansatz erfolgt die Auswahl einer zu erfassenden Gewitterzelle für jedes Update der Radarkarte manuell in einer MATLAB-Figur mit Hilfe eines Fadenkreuzes und einem vorgegebenen Radius. Dabei werden um den ausgewählten Punkt herum alle Echos erfasst, die sich innerhalb eines zuvor festgelegten Radius befinden. Um den manuellen Aufwand der Auswahl des Bereichs auf jeder einzelnen Radarkarte zu vermeiden und sicherzustellen, dass alle Teile einer Gewitterwolke erfasst

werden, ist es notwendig, einen Algorithmus zu entwickeln, der automatisch zusammenhängende Echos zu einer Gewitterzelle definiert. (Bernatzky, 2018)

Im Zusammenhang mit den genannten Aspekten ermöglicht der KONRAD-Algorithmus die Verfolgung der Bewegungen und Intensitäten vergangener Gewitterzellen. In jeder Gewitterwolke befinden sich sogenannte Primäre Zellkerne, die durch einen „Zentralpunkt“ repräsentiert werden. Die Lage dieser Zellkerne wird anhand der Raummittelpunkte, des Volumens und der Flächenschwerpunkte jedes einzelnen Kerns bestimmt. Wenn ein Zellkern im aktuellen Zeitpunkt erkannt wird, werden frühere Zeitpunkte nach demselben Zellkern durchsucht. Dabei wird nach übereinstimmenden Zellzentren in der Vergangenheit gesucht, die sich innerhalb eines Suchradius befinden, der der Zellverlagerung von 110 km/h plus der Verlagerung des Schwerpunkts entspricht. Wenn keine entsprechende Zelle im vorherigen Produkt vorhanden ist, wird die aktuelle Zelle als Neuzelle betrachtet, während nicht mehr vorhandene Zellkerne aus dem letzten Produkt als Auslaufzellen bezeichnet werden. Wenn sich ein aktueller Zellkern in der Nähe des Prognosepunkts eines Zellkerns aus dem vorherigen Produkt befindet, wird der vergangene Kern als Vorgängerzelle definiert. Ein kurzer Weg und eine bestimmte Größenkategorie einer Zelle dienen als Hinweis auf eine Verbindung. Dieses Verfahren ermöglicht es, Bewegungsverläufe einzelner Zellkerne im Laufe der Zeit zu erkennen und anhand der zeitlichen Entwicklung der Intensität zu analysieren.

Die KONRAD-Daten helfen auch dem Piloten des Hagelabwehrflugzeugs, bessere Wetterprognosen zu erstellen. Der Zustand der einzelnen Zellkerne wird in eine Kategorie des Entwicklungszustands eingeteilt. Dabei dient der Kernvolumen-Wassergehalt als Grundlage für die Klassifizierung in die vier Stufen grün, gelb, rot und violett. Die grüne Stufe schließt beispielsweise jegliches Auftreten von Hagel (in Bodennähe oder höher) aus. Der Pilot kann anhand dieser Einteilung Zellen innerhalb einer Gewitterwolke vorerst ausschließen, die sich in den grünen oder gelben Stufen befinden, jedoch über die Zeit beobachten, ob sich ihre Intensität erhöht. Dies ermöglicht eine präzisere Bestimmung des richtigen Startpunkts für den Einsatz, um eine möglichst effektive Einbringung des Silber-Jodid-Gemischs in die Gewitterwolke zu erzielen.

Neben den Primären Zellkernen werden auch sogenannte „Sekundärzellen“ erkannt. Diese sind schwächere Zellen, die nicht benannt oder verfolgt werden können. Sie weisen jedoch auf eine mögliche zukünftige Entwicklung einer Primären Zelle hin. (Lang, 2003)

Primärzellen beinhalten unter anderem folgende charakteristische Parameter:

- Ortungskoordinaten im Radarbild
- Zellkernstadium
- Anzahl Zellkernpixel Radarreflektivitätslevel 5 rot (>46 dBZ)
- Anzahl Zellkernpixel Radarreflektivitätslevel 6 blau (>55 dBZ)
- Warnparameter
- Startposition
- Prognoseposition und Zug Daten
- Kernschwerpunkte

Die aufgeführten Parameter stellen lediglich eine Auswahl von insgesamt 40 Parametern dar, die einen umfassenden Einblick in den aktuellen Zustand einer Primärzelle bieten.

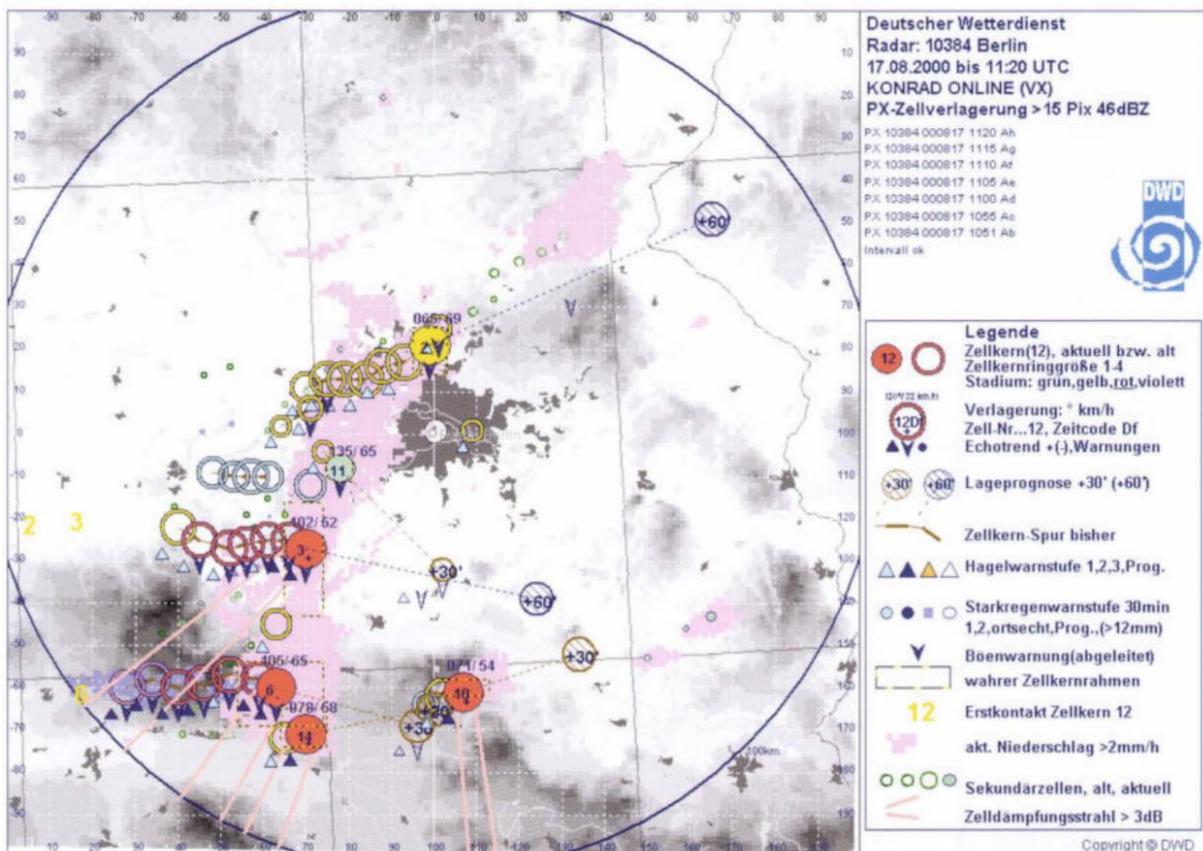


Abbildung 6 Muster einer KONRAD-Zellanalyse einer Gewitterlinie am 17.08.2000 in Berlin (Lang, 2003)

Um die Hagelverläufe, während der tatsächlich stattgefundenen und virtuell nachgestellten Flugtage der Hagelabwehr zu untersuchen, werden im Abschnitt 3.3 die zeitlichen Verläufe der Zellkernpixelanzahlen der Echoklassen 5 und 6 genauer betrachtet. Eine detailliertere Beschreibung dieses Ansatzes findet sich in Kapitel 3.3.1.

3.2 Wahl der Tage für die virtuelle Nachstellung

Um die Anzahl der Tage mit ungeimpften Hagelereignissen möglichst gering zu halten, arbeitet der Pilot eng mit Meteorologen zusammen und analysiert täglich das Wettergeschehen, um potenzielle Hagelbildungen zu erkennen. Allerdings kommt es gelegentlich vor, dass an bestimmten Tagen aus verschiedenen Gründen kein Hagelabwehrflug durchgeführt wird.

Es gibt verschiedene Faktoren, die einen Hagelabwehrversuch verhindern können:

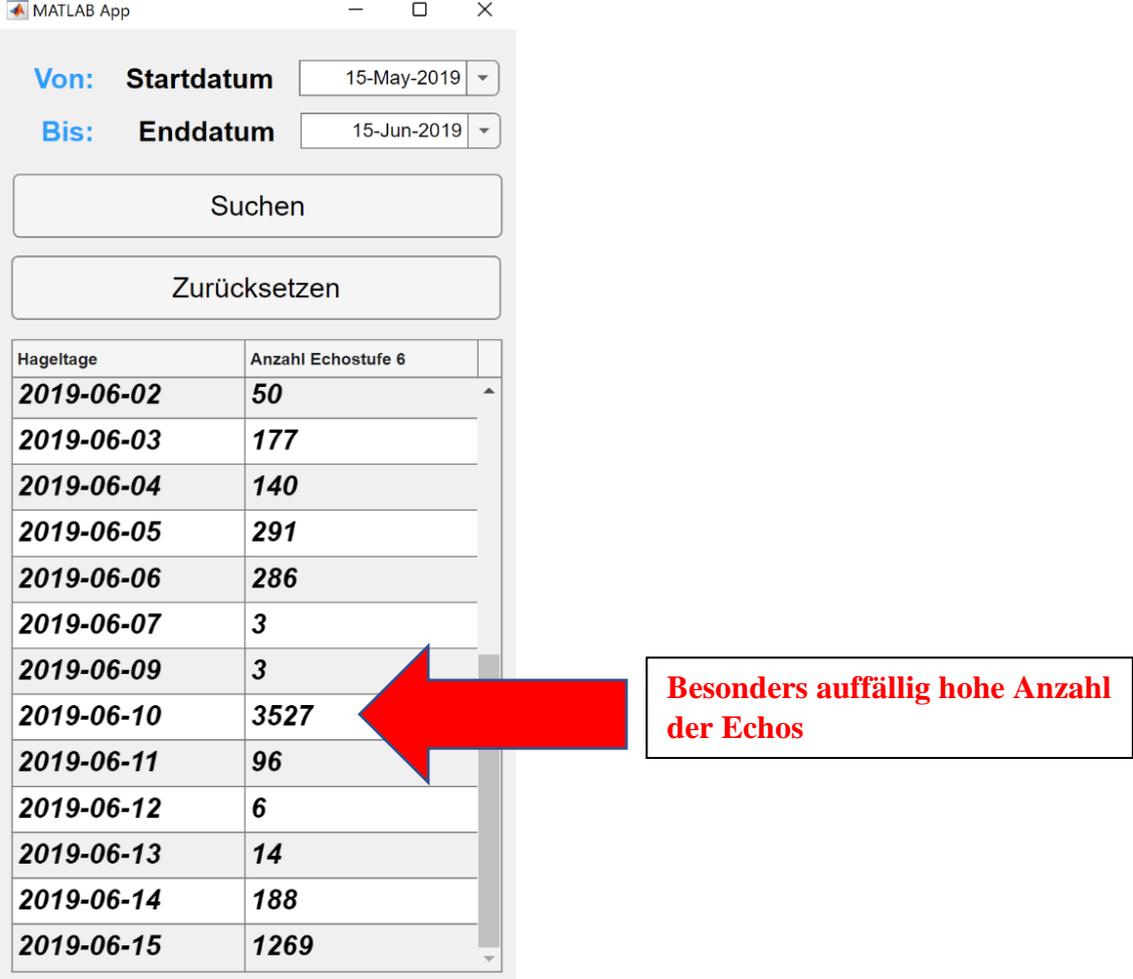
1. Beschädigungen am Flugzeug oder an den Generatoren.
2. Wartungsarbeiten am Flugzeug oder an den Generatoren.
3. Hagelereignisse in der Nacht, die aufgrund von starken Sichteinschränkungen nicht bekämpft werden können.
4. Kein geeigneter Pilot verfügbar (Urlaub, Krankheit, Feiertag).

Für den Vergleich von tatsächlich beimpften Gewitterzellen mit den Gewitterzellen, bei denen keine Hagelabwehrflüge durchgeführt wurden, eignen sich gerade die Tage ohne Impfung besonders gut. Diese Tage weisen eine bestimmte Heftigkeit auf und können daher als Referenz dienen. Um die vergangenen Tage zu identifizieren, an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit Hagel auftrat, werden die Anzahlen der Radarechos der Stufe 6 pro Tag betrachtet. Das MATLAB-Programm „FindHaildays“ listet die Gesamtzahl der aufgetretenen Echos der Stufe 6 für jeden Tag auf.

Zunächst wird in der App der Zeitbereich festgelegt, indem das Start- und Enddatum der zu untersuchenden Tage definiert wird. Anschließend wird die Analyse durch Klicken auf den Button „Suchen“ gestartet. Als Ergebnis werden die Daten der Tage im ausgewählten Zeitbereich auf der linken Seite aufgelistet, während auf der rechten Seite die jeweiligen Anzahlen der aufgetretenen Echos der Stufe 6 pro Tag angezeigt werden. Tage mit besonders vielen Echos deuten darauf hin, dass ein Gewitter mit hoher Intensität vorhanden war und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Hagel enthalten war. Das Programm erkennt jedoch nicht, an welchen dieser Tage ein Hagelabwehrflugzeug im Einsatz war. Daher ist es nach der Ermittlung der Tage erforderlich, diese Daten mit den tatsächlichen Flugtagen abzugleichen.

Nach Ermittlung der fluglosen Hageltage, können diese in den nächsten Schritten genauer untersucht werden. In Abbildung 7 wird ein Beispiel für die Ermittlung solcher Tage gezeigt, bei denen vermutlich eine Hagelentwicklung stattgefunden hat. Dabei wurde der Zeitraum zwischen dem 15.04.2019 und dem 15.06.2019 ausgewählt. Ein besonders auffälliger Tag ist der 10.06.2019, an dem die Anzahl der Echos der Stufe 6 mit 3527 im Vergleich zu den umliegenden Tagen besonders hoch ist.

Aufgrund der hohen Anzahl an Echos wurde zunächst überprüft, ob an diesem Tag tatsächlich ein Flug stattgefunden hat. Falls dies nicht der Fall ist, folgt eine detailliertere Untersuchung dieses Hageltages.



The screenshot shows the MATLAB App interface with the following search criteria:

- Von: Startdatum:** 15-May-2019
- Bis: Enddatum:** 15-Jun-2019

Buttons: Suchen, Zurücksetzen

Hageltage	Anzahl Echostufe 6
2019-06-02	50
2019-06-03	177
2019-06-04	140
2019-06-05	291
2019-06-06	286
2019-06-07	3
2019-06-09	3
2019-06-10	3527
2019-06-11	96
2019-06-12	6
2019-06-13	14
2019-06-14	188
2019-06-15	1269

Besonders auffällig hohe Anzahl der Echos

Abbildung 7 Beispielhafte Suche nach Tagen mit Hagelereignissen in der App "FindHaildays"
(Eigene Darstellung)

3.3 VirtualFlightCreator zur Simulation von Hagelabwehrflügen

Um die Flugwege an hagelbetroffenen Tagen aus der Vergangenheit nachzustellen, wurde der VirtualFlightCreator mit der Toolbox AppDesigner von MATLAB entwickelt. Diese App unterstützt bei der Untersuchung, ob bei den Gewitterzellen, die in der Realität nicht tatsächlich beimpft wurden, unterschiedliche Ergebnisse für die Auswertung entstehen im Vergleich zu den Flügen, die tatsächlich stattgefunden haben. Durch den VirtualFlightCreator können Flugrouten von Hagelabwehrflügen nachträglich simuliert werden.

3.3.1 Ansatz zur Simulierung virtueller Flüge

Die Hagelabwehrpiloten in Rosenheim haben im Laufe der Jahre umfangreiche Erfahrungen gesammelt und wissen genau, wie sie am besten vorgehen können. Um den Flugprozess so realitätsnah wie möglich zu gestalten, war es notwendig, die Flugwege von einem aktiven Hagelabwehrpiloten simulieren zu lassen. Daher war es wichtig, dass das Programm benutzerfreundlich und leicht verständlich aufgebaut ist. Georg Vogl, der Einsatzleiter und Geschäftsführer des Hagelforschungsvereins, hat sich freundlicherweise bereit erklärt, die Flüge zu simulieren. Bei einem realen Einsatz wird der Startzeitpunkt des Flugs unter anderem anhand der Zellkernschwerpunkte und der Radardaten festgelegt. Die vergangenen Radarbilder werden in einer Datenbank an der Hochschule gespeichert, sodass die Festlegung des Startzeitpunkts bei der Nachsimulation auf die gleiche Weise möglich ist. Der Pilot betrachtet die Zellkernschwerpunkte und Radarbilder des Tages nacheinander, bis er den Zeitpunkt für geeignet hält, den Hagelabwehrversuch zu starten. Aufgrund der großen Anzahl virtueller Flugtage und des damit verbundenen enormen Zeitaufwands, alle Radarbilder zu analysieren, kann der Pilot im VirtualFlightCreator die Uhrzeit anzeigen lassen, zu der das Maximum der Echostufe 6 erreicht wurde. Ausgehend von diesem Maximum kann die Zeit zurückgedreht werden, bis der Pilot den Zeitpunkt findet, zu dem er wahrscheinlich den Einsatz starten würde. Bei der Simulation ist jedoch keine direkte Kommunikation mit dem Meteorologen möglich. Der Pilot legt den ersten Wegpunkt basierend auf dem Radarbild zum Startzeitpunkt fest. Danach aktualisiert sich das Radarbild auf das Bild, das 5 Minuten später aufgenommen wurde, und der Pilot kann den nächsten Wegpunkt festlegen. Dieser Prozess wiederholt sich, bis der Pilot der Meinung ist, den Hagelabwehrflug zu beenden.

3.3.2 Aufbau und Bedienung

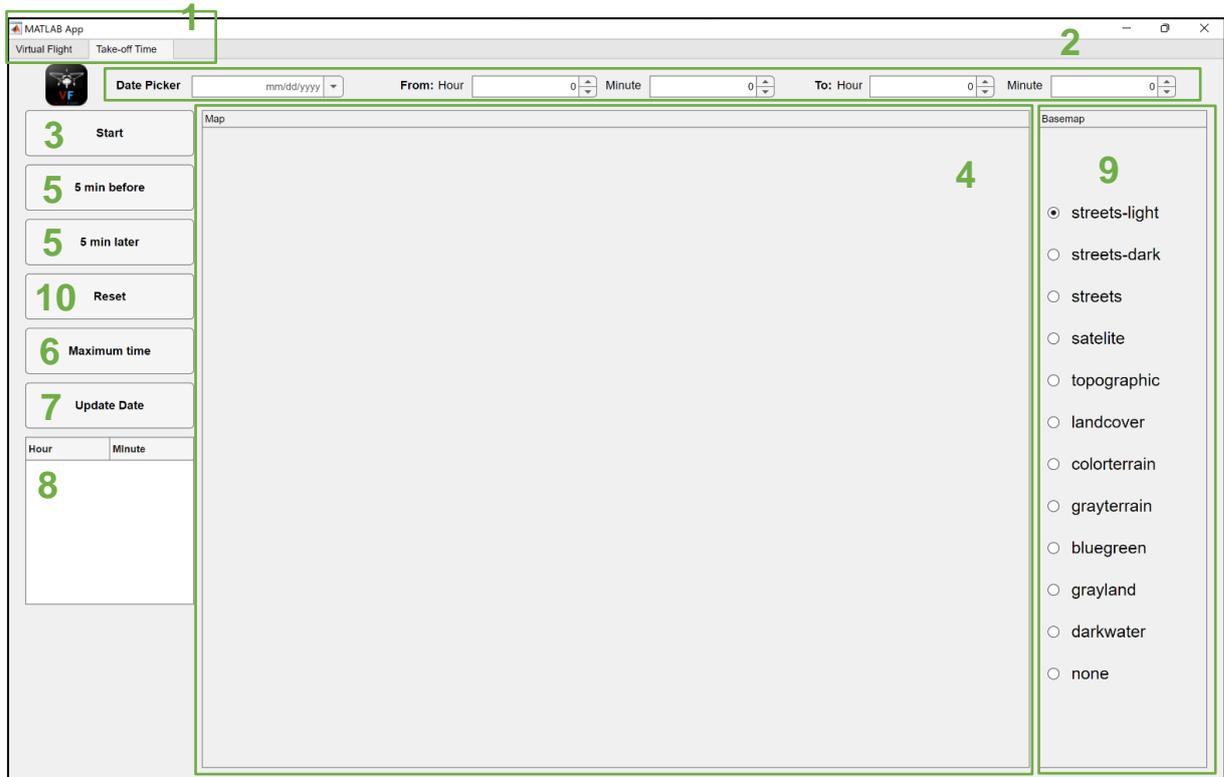


Abbildung 8 Benutzeroberfläche des Reiters „Take-off Time“ zur Bestimmung des Flugstarts
(Eigene Darstellung)

Für die virtuelle Nachstellung werden die Flugwege der zu simulierenden Tage nacheinander erstellt. Um den Startzeitpunkt des Einsatzes zu ermitteln, wird der Reiter *Take-off Time* (1) ausgewählt. Hier kann das Datum des Tages über den *Date Picker* (2) ausgewählt werden, und der zu untersuchende Zeitbereich wird neben „From“ und „To“ festgelegt. Durch Betätigen des *Startbuttons* (3) werden die Zellkernschwerpunkte aus der KONRAD-Datei des Startzeitpunkts im Schutzgebiet in der Mitte (4) der Benutzeroberfläche dargestellt. Die Karte zeigt zudem die aktuelle Uhrzeit und Orte von umliegenden Regionen zur besseren Orientierung an. Der Benutzer kann dann mithilfe der Tasten *5 min before* und *5 min later* (5) das vorherige oder nachfolgende Bild um jeweils fünf Minuten anzeigen lassen. Dies wird so lange wiederholt, bis die Zellkernschwerpunkte den Moment abbilden, an dem der Pilot bei einem realen Einsatz den Hagelabwehrflug starten würde. Allerdings kann die Suche nach dem Startzeitpunkt viel Zeit in Anspruch nehmen. Daher besteht die Möglichkeit, den Zeitpunkt ausfindig zu machen, an dem der Tag sein Maximum der Echostufe 6 erreicht. Durch Betätigen des *Maximum Time* (6) Buttons wird die Uhrzeit des Maximums tabellarisch auf der linken Seite (8) angezeigt. Es kann vorkommen, dass zwei Uhrzeiten angezeigt werden, wenn das Maximum zu verschiedenen Zeitpunkten auftrat.

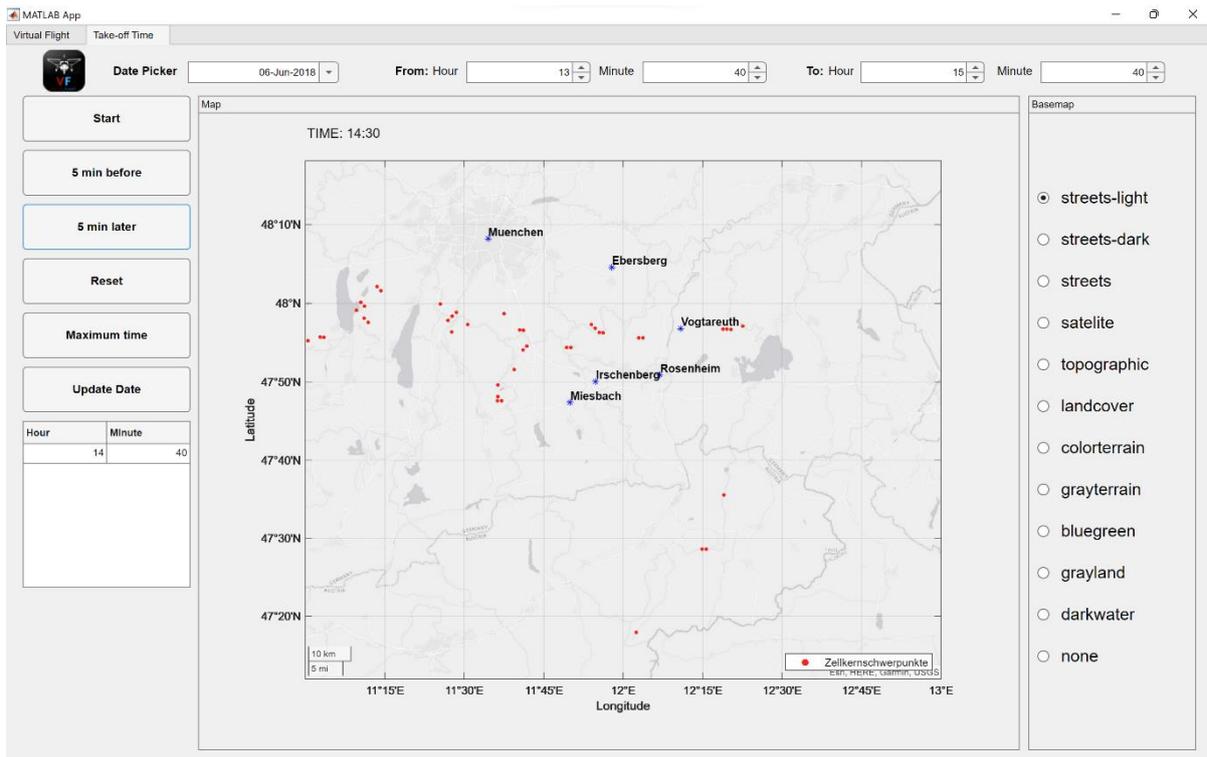


Abbildung 9 Ermittlung des Zeitpunkts des Maximums am 06.06.2018 (Eigene Darstellung)

Der Hagelabwehrversuch beginnt jedoch nicht zum Zeitpunkt, an dem das Gewitter seinen Höhepunkt erreicht, sondern bereits zu einem früheren Zeitpunkt. Daher muss der zeitliche Bereich um das Maximum genauer betrachtet werden. Durch Betätigen der Taste *Update Time* (7) wird die zuvor festgelegte Bereichseingrenzung aktualisiert. Dabei wird die Uhrzeit eine Stunde vor dem Maximum als Startzeitpunkt und eine Stunde nach dem Maximum als Endzeitpunkt eingetragen. Ein erneutes Betätigen des *Start* Buttons (3) aktualisiert die Karte und zeigt die Zellkernschwerpunkte der neuen Startzeit. Von diesem Zeitpunkt aus kann der Benutzer mithilfe der Taste *5 min after* (5) die nachfolgenden Zellkerne auf der Karte beobachten und analysieren, bis zum Moment, an dem der Pilot den Hagelabwehrversuch starten würde. Dabei ist es besonders wichtig, dass der Benutzer den Startpunkt so ehrlich und realitätsnah wie möglich wählt, um keine Verfälschung der Impfung zu generieren. Das mögliche Wissen über die nachfolgenden Zellkerne sollte keinen Einfluss auf die Erstellung des Flugwegs nehmen.

Um die Regionen auf der Karte besser zu verstehen, kann auf der rechten Seite die Darstellungsform der Karte (9) geändert werden. Es stehen elf verschiedene Ansichten zur Auswahl. Die Zellkernschwerpunkte können auch ohne Hintergrundkarte angezeigt werden. Standardmäßig ist die Einstellung auf „Satellite“ eingestellt.

Nachdem der Flugweg erstellt wurde, kann der Benutzer durch Betätigen der *Reset* (10) Taste die Benutzeroberfläche in den Ausgangszustand zurückversetzen.

Nachdem der Startpunkt des Fluges anhand der Zellkernschwerpunkte ermittelt wurde, kann die Simulation des Flugweges nun durch Aktivierung des Reiters *Virtual Flight* (1) gestartet werden.

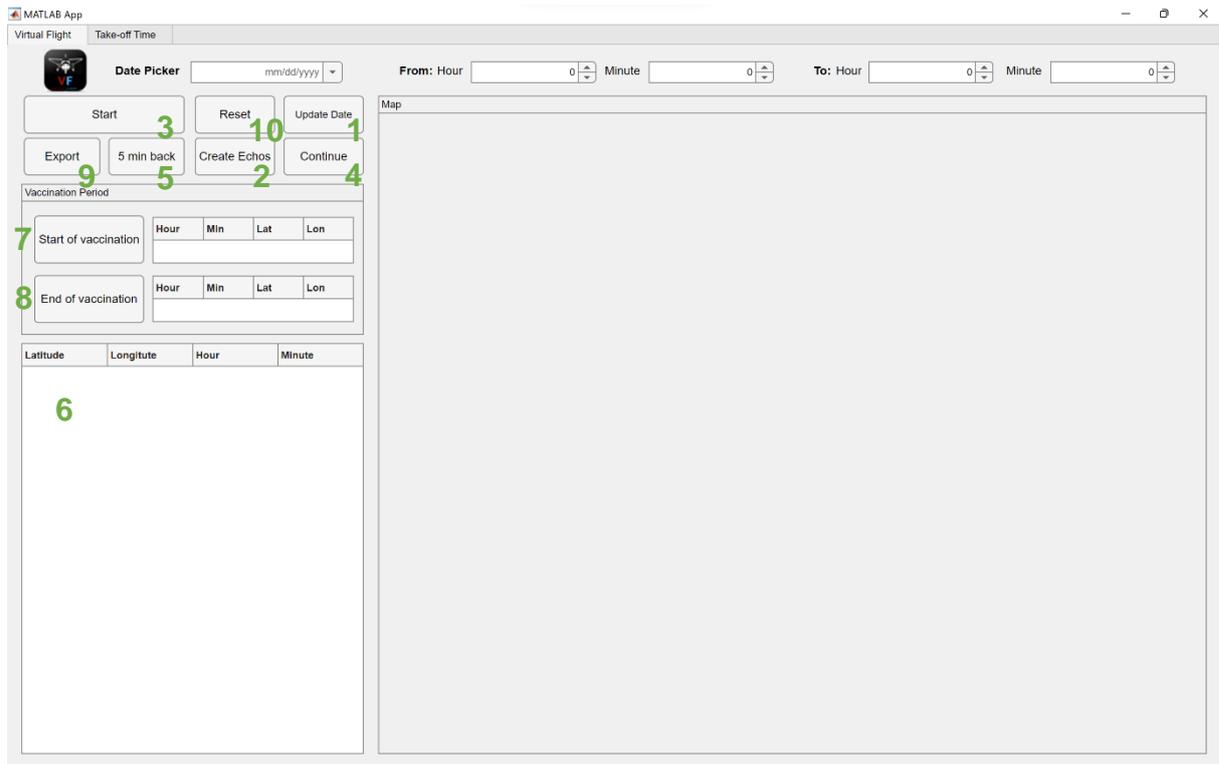


Abbildung 10 Benutzeroberfläche des Reiters „Virtual Flight“ zur Erstellung des Flugweges (Eigene Darstellung)

Um den zuvor ermittelten Zeitbereich genauer zu untersuchen, wird zunächst die Taste *Update Date* (1) betätigt. Dadurch übernimmt der Zeitbereich auf der oberen Seite den Bereich vom vorherigen Reiter. Eine alternative Möglichkeit wäre die Ermittlung des Startpunktes anhand der Radarbilder auf dieser Seite anstelle der Zellkernschwerpunkte aus den KONRAD-Daten unter „Take-off Time“. Da jedoch laut dem Einsatzleiter der Hagelabwehr Rosenheim bei einem realen Einsatz insbesondere die Zellkernschwerpunkte für die Analyse des Startzeitpunktes genutzt werden, ist das Verfahren über die KONRAD-Daten die präzisere Wahl, um die Simulation möglichst realitätsnah zu gestalten.

Bevor die Simulation des Fluges gestartet werden kann, müssen die Koordinaten der Echostufen aus den DWD-Daten der Hochschuldatenbank extrahiert werden. Hierzu generiert der VirtualFlightCreator durch Betätigen des Buttons *Create Echos* (2) eine SQL-Abfrage zur Beschaffung der Echokoordinaten für den ausgewählten Zeitbereich und sendet diese an die Hochschuldatenbank. Nach Erhalt der Daten werden diese verarbeitet und lokal auf dem

Computer des Nutzers gespeichert. Dieser Schritt ist erforderlich, da die virtuelle Flugzeit mehrere Stunden in Anspruch nehmen kann, da viele Radarbilder generiert werden müssen. Eine separate SQL-Abfrage für jedes einzelne Radarbild würde den Zeitaufwand der Simulation deutlich erhöhen und das Programm verlangsamen.

Nachdem die Echodaten generiert wurden, wird eine Meldung mit „Saved Echos“ angezeigt und die Simulation kann durch Betätigen des *Start* (3) Buttons gestartet werden. Zu Beginn werden die Echos des Startpunktes auf der Karte dargestellt. Die Farbunterteilung der Echostufen basiert auf der im Kapitel 3.1.1 beschriebenen Skala der Echointensitäten. Zur Orientierung sind die Bezeichnungen von Regionen aus der Umgebung eingetragen und die Uhrzeit des aktuellen Radarbildes wird links oben angezeigt. Solange der erste Wegpunkt noch nicht festgelegt wurde, hat der Pilot die Möglichkeit, den Startzeitpunkt zu ändern. Die Ansicht der Radarbilder kann die Meinung des Piloten beeinflussen, da bei einem realen Einsatz primär die Zellkernschwerpunkte der KONRAD-Daten analysiert werden, aber auch die Verteilung und Menge der Echosignale berücksichtigt werden. Durch Betätigen des *Continue* (4) Buttons wird das Radarbild um fünf Minuten später aktualisiert, während der *5 min back* (5) Button eine Aktualisierung auf das fünf Minuten vorher liegende Radarbild ermöglicht. Hinzu ist der Startpunkt am Flugplatz Vogtareuth von einem roten Kreis umrandet. Der Radius des Kreises definiert die Maximale Entfernung, die der Hagelflieger innerhalb von fünf Minuten erreichen kann. Innerhalb dieses Kreises kann nun der Pilot den Wegpunkt setzen, zu dem er sich in den nächsten Fünf Minuten hinbewegen würde. Dafür kann mit dem Mouse-Courser der gewünschte Punkt auf der Karte ausgewählt werden. Danach wird automatisch das nächste Radarbild auf der Karte angezeigt und die Uhrzeit wird um fünf Minuten später aktualisiert. Hinzu wird der neue Zeitpunkt und die geographische Lage des Wegpunktes in Latitude und Longitude in das Feld (6) auf der linken Seite eingetragen und eine Linie zwischen Startpunkt und Wegpunkt in der Karte gesetzt. Der gesetzte Wegpunkt erhält nun die rote Umrandung und definiert nun den neuen Bereich, der angefliegen werden kann. Anhand des neuen Radarbildes können nach demselben Vorgehen die nächsten Wegpunkte nacheinander gesetzt werden. Dabei werden alle weiteren Zeitpunkte und geografische Lagen der Wegpunkte tabellarisch im Bereich (6) auf der linken Seite aufgelistet und zwischen den Wegpunkten jeweils immer eine gerade Linie gezogen, zur Visualisierung des bereits simulierten Flugweges.

Dem Nutzer steht auch die Möglichkeit offen, den Impfbereich selbst einzuschränken. Bei einem echten Hagelabwehreinsatz startet der Pilot im Cockpit des Hagelfliegers die Verbrennung des Silberjodid-Aceton-Gemisches in den Generatoren und beendet sie auch wieder. In der Simulationsumgebung wird durch Betätigen des *Start of vaccination* (7) Buttons

der aktuelle Zeitpunkt und die Position des Flugzeugs in Breiten- und Längengrad erfasst und rechts neben der Taste angezeigt. Das Gleiche gilt für die Beendigung der Impfung, dafür muss der End of vaccination (8) Button betätigt werden.

Wenn sich die Wetterbedingungen beruhigt haben, kann der Nutzer die Simulation des Flugweges beenden, indem er auf den *Export* (9) Button klickt, um den Flugweg zu speichern. Die Flugroute wird in derselben tabellarischen Form wie auf der linken Seite der Benutzeroberfläche als Excel-Datei abgespeichert. Wenn der Nutzer den Impfzeitraum selbst definiert hat, wird dieser Zeitraum in der Excel-Datei der Flugroute als Anhang zur Wegpunkt-Tabelle aufgeführt. Durch Betätigen des *Reset* (10) Buttons kann die Oberfläche des Programms wieder in den Ausgangszustand zurückversetzt werden, und es kann auf dem Reiter „Take-off Time“ der Startpunkt für den nächsten Hagelabwehrflug ermittelt werden.

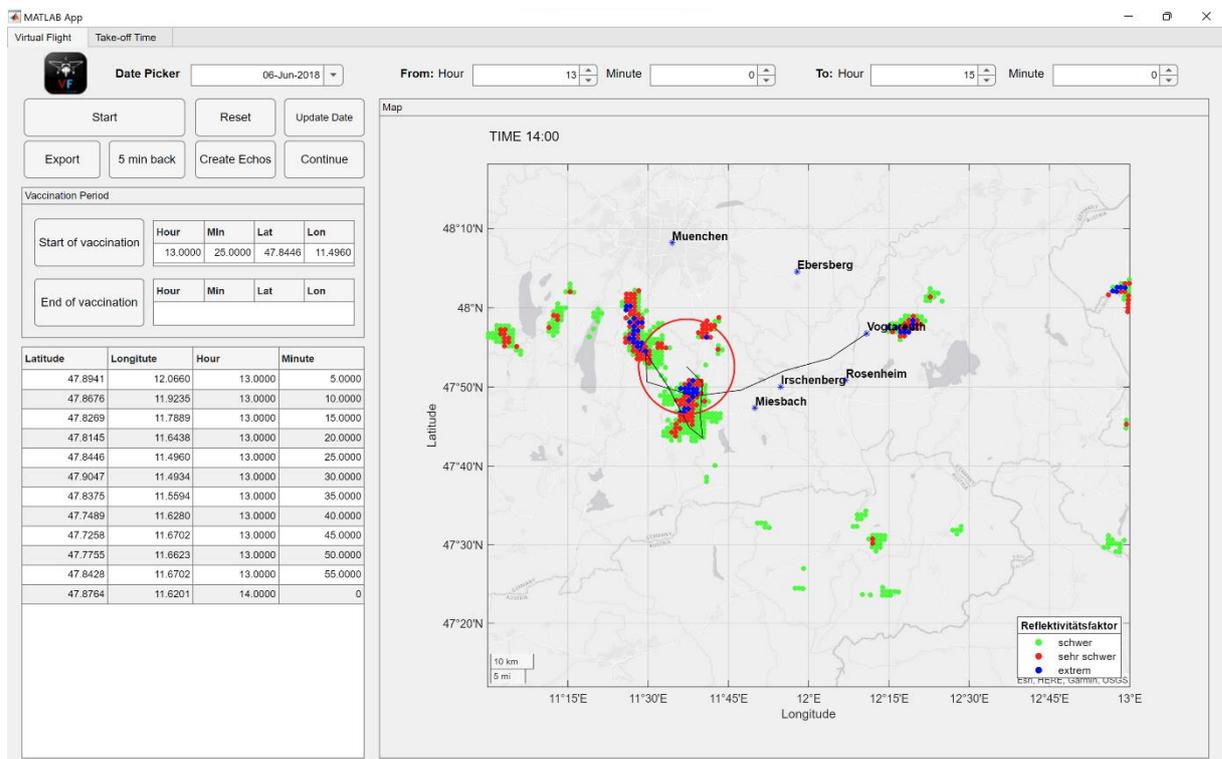


Abbildung 11 Flugweg nach Fertigstellung der Simulation am 06.06.2018 (Eigene Darstellung)

	A	B	C	D	E
1	47,8853	12,0607	20	5	
2	47,8587	11,934	20	10	
3	47,8322	11,7995	20	15	
4	47,8145	11,6728	20	20	
5	47,8056	11,5383	20	25	
6	47,8091	11,3931	20	30	
7	47,8233	11,2718	20	35	
8	47,779	11,3325	20	40	
9	47,8676	11,3536	20	45	

Abbildung 12 Beispiel des Verlaufs eines Flugweges in Excel (Eigene Darstellung)

3.4 Untersuchung des Hagelverlaufs anhand der Anzahl der Hagelpixel Im Zellkern

Um den Verlauf der Intensität einer Gewitterwolke zu untersuchen, ist es notwendig, ein geeignetes Verfahren zu entwickeln. Da die Intensität innerhalb einer Gewitterwolke in verschiedenen Bereichen unterschiedlich stark sein kann, ist es erforderlich, einzelne Gewitterzellen separat zu betrachten. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat mithilfe der KONRAD-Daten ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, zusammenhängende Echodaten zu einer Gewitterzelle zu klassifizieren. Im Rahmen der Analyse des Hagelverlaufs sollen nun die Intensitäten der einzelnen Gewitterzellen untersucht werden, um festzustellen, ob eine Impfung mittels Silberjodids einen Einfluss auf das Verhalten der Zellen hat. Jede Zelle wird dabei durch mehrere Parameter beschrieben, wobei insbesondere die Koordinaten der Zellkernschwerpunkte für eine Nachverfolgung der Zugrichtung genutzt werden können. Zusätzlich wird in regelmäßigen fünfminütigen Abständen die Anzahl der Pixel der Reflexivitätsstufe 5 (>46 dBZ, rot) und der Reflexivitätsstufe 6 (>55 dBZ, blau) ermittelt. Diese Pixelanzahlen sind ein Indiz dafür, dass der Zellkern Eispartikel enthält. Anhand des Verlaufs der Hagelpixelanzahlen im Zellkern lässt sich der Verlauf der Zellintensität beschreiben. Je mehr Hagelpixel ein Zellkern zu einem bestimmten Zeitpunkt aufweist, desto intensiver ist die Hagelbildung in der Zelle.

Es kann vorkommen, dass sich über die Lebensdauer einer Zelle das Maximum der Zellkernpixel zum Zeitpunkt des Erstauftretens der Zelle befindet. Daraus kann geschlossen werden, dass es zu einer plötzlichen Bildung einer Zelle in einem Gebiet gekommen ist, das bereits viele Echos höherer Stufen in der Umgebung aufwies. Es ist auch möglich, dass das Maximum der Zellkernpixel sich zum Zeitpunkt der letzten Identifizierung einer Zelle befindet, was auf ein ruckartiges Auflösen der Gewitterzelle hindeuten würde.

Darüber hinaus verlaufen die Zellkernpixel nicht wie ursprünglich vermutet in einer linearen Zu- und Abnahme der Hagelpixelanzahlen bis zum Auflösen der Zelle. Dennoch haben die Gewitterzellen einen Zeitpunkt, an dem sich das Maximum der Zellkernpixel befindet. Aus diesem Grund werden unter anderem die Maxima der Zellen, die bei realen Flügen aufgetreten sind, mit denen der virtuell nachgestellten Flüge im Kapitel 4 verglichen.

3.5 Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Impfdauer

Um den Einfluss der Hagelabwehrmaßnahmen auf den zeitlichen Verlauf der Hagelpixelanzahlen im Zellkern zu untersuchen, ist es von großer Bedeutung, den Zeitbereich zu kennen, in dem angenommen werden kann, dass die Impfung wirksam ist. Jedoch ist aufgrund fehlenden Wissens über die Verteilung der Silberpartikel nach dem Austritt aus den Generatoren bisher noch unbekannt, welcher Zeitbereich dies umfasst.

3.5.1 Fehlende Kenntnis über die Verteilung des Silberjodids

Eine Gewitterwolke besteht aus vielen einzelnen Gewitterzellen, die sich teilweise weit voneinander entfernt bewegen. Um so viele Hagelschäden wie möglich zu verhindern, konzentriert sich der Pilot bei der Bekämpfung auf den Bereich, in dem die meisten Echoklassen 5 und 6 dicht beieinander liegen. In den meisten Fällen lassen sich bereits bei der Betrachtung der Echodaten auf den Radarbildern vermehrte Ansammlungen von Echos höherer Stufe auf kleinen Flächen erkennen. Diese Ansammlungen entsprechen in der Regel einer von KONRAD definierten Gewitterzelle. Durch die Auswertung der Radarbilder kann die Zugrichtung der Gewitterzellen bestimmt werden. Basierend auf dieser Information bewegt sich der Pilot in Richtung der Zugbewegung, um eine Schleifenbewegung vor der Zelle durchzuführen. Dadurch werden die Luftmassen vor der Zelle bereits mit der Silberjodid-Mischung beimpft, da sie durch Aufwinde von der Gewitterzelle angezogen werden. Dies verhindert die Bildung großer Hagelkörner.

Um nun bei der Analyse nur diejenigen Gewitterzellen zu berücksichtigen, die effektiv von der Hagelabwehr betroffen sind, ist eine geeignete Methodik zur Selektion der betroffenen Zellen aus den KONRAD-Daten erforderlich. Es ist noch nicht bekannt, wie sich das Silberjodid nach dem Ausstoß aus den Generatoren des Hagelfliegers verteilt. Die wahrscheinlichste Verteilung erfolgt abhängig von der Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Flugrichtung und Fluggeschwindigkeit. Die Hochschule Rosenheim führte eine einfache Simulation durch, um quantitative Aussagen über die Ausbreitung von Silberjodid in der Nähe des Flugzeugs zu treffen. Diese Simulation basierte auf der vektoriellen Berechnung von Richtung und Geschwindigkeit der Partikel. Dabei wurde die Geschwindigkeit eines Partikels, das aus der Düse ausgestoßen wird, mit der vorhandenen Windgeschwindigkeit vektoriell addiert. Aufgrund der stark vereinfachten physikalischen Annahmen und dem Fehlen von physikalischen Effekten wie der Reynoldszahl (Turbulenzverhalten der Strömung) oder der Düsenöffnung der Generatoren ist es erforderlich, den Simulationsansatz weiterzuentwickeln, um ein besseres Verständnis für das Ausbreitungsverhalten von Silberjodid zu erlangen.

Aufgrund dieser Unsicherheiten führte Andreas Bernatzky die sogenannte Impfgeometrie ein, die den Bereich um das Hagelflugzeug kennzeichnet, in dem mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen wird, dass die Gewitterzellen innerhalb dieser Geometrie vom Hagelflieger beimpft wurden. (Bernatzky, 2018)

3.5.2 Fehlende Kenntnis über die Mindestimpfdauer ab der eine Wirkung zu vermerken ist

Seit 2017 setzt die Hagelabwehr in Rosenheim neue Generatoren ein, um eine effektivere Verbrennung des Silberjodid-Aceton-Gemisches zu gewährleisten. Diese Generatoren wurden mit einer Gas-/Elektrozündung ausgestattet, wodurch eine geschwindigkeitsunabhängige und höhenangepasste Verbrennung ermöglicht wird. Bei der Verbrennung von einem Gramm Silberjodid werden zwischen vier und sechs Billionen Gefrierkristalle an die Gewitterwolke abgegeben, um die Bildung großer Hagelkörner zu verhindern. („Neue Generatoren für die Hagelabwehr“, 2016)

Da sich die Größen der einzelnen Gewitterzellen jedoch stark unterscheiden, variiert die benötigte Menge an Silberjodid und somit auch die Impfdauer für jede Zelle. Während eines Hagelfluges nähert sich das Flugzeug einer Vielzahl von Gewitterzellen an und impft diese so lange, wie sich die Generatoren des Flugzeugs in ihrer Nähe befinden. Es kann jedoch vorkommen, dass größere Zellen nur für eine kurze Zeit beimpft werden, obwohl für eine effektive Wirkung mehr Silberjodid eingesetzt werden müsste. Daher soll der Hagelverlauf für verschiedene Mindestimpfdauern der Zellen untersucht werden. Wenn die Mindestimpfdauer niedrig gewählt wird, werden zwar mehr Zellen berücksichtigt, jedoch werden vermehrt Zellen mitbetrachtet, die mit höherer Wahrscheinlichkeit nicht lange genug beimpft wurden. Bei einer längeren Mindestimpfdauer ist jedoch die Anzahl der untersuchten Gewitterzellen deutlich geringer. Je geringer die Anzahl der betrachteten Zellen ist, desto schwieriger gestaltet sich die Auswertung mit einer aussagekräftigen Signifikanz. Aus diesem Grund wird in Kapitel 5 die Empfindlichkeit des Effektivitätsmaß durch die Änderung der Mindestimpfdauer untersucht.

3.6 Einfuhr einer Impfgeometrie zur Bestimmung des Wirkungsbereichs

Das Fehlen eines Verständnisses über die Ausbreitung des Silberjodids erschwert die Bestimmung des Zeitraums, in dem eine Gewitterzelle effektiv beimpft wird. Mit der Einführung der Impfgeometrie ist es jedoch möglich, die Start- und Endpunkte der Impfung anhand des Abstands zwischen dem Flugzeug und den Gewitterzellen zu bestimmen.

Sobald sich das Flugzeug in der Nähe einer Zelle befindet und diese den Bereich der Impfgeometrie betritt, wird der Zeitpunkt des Eintritts als Impfstart festgelegt. Solange sich die Zelle innerhalb der Geometrie befindet, kann von einem wirksamen Einfluss des Silberjodids ausgegangen werden. Der Moment, in dem die Zelle die Impfgeometrie verlässt, definiert das Ende der Hagelbekämpfung. Je nach Wahl des Durchmessers der Impfgeometrie werden unterschiedliche Start- und Endpunkte für die Impfdauer bestimmt.

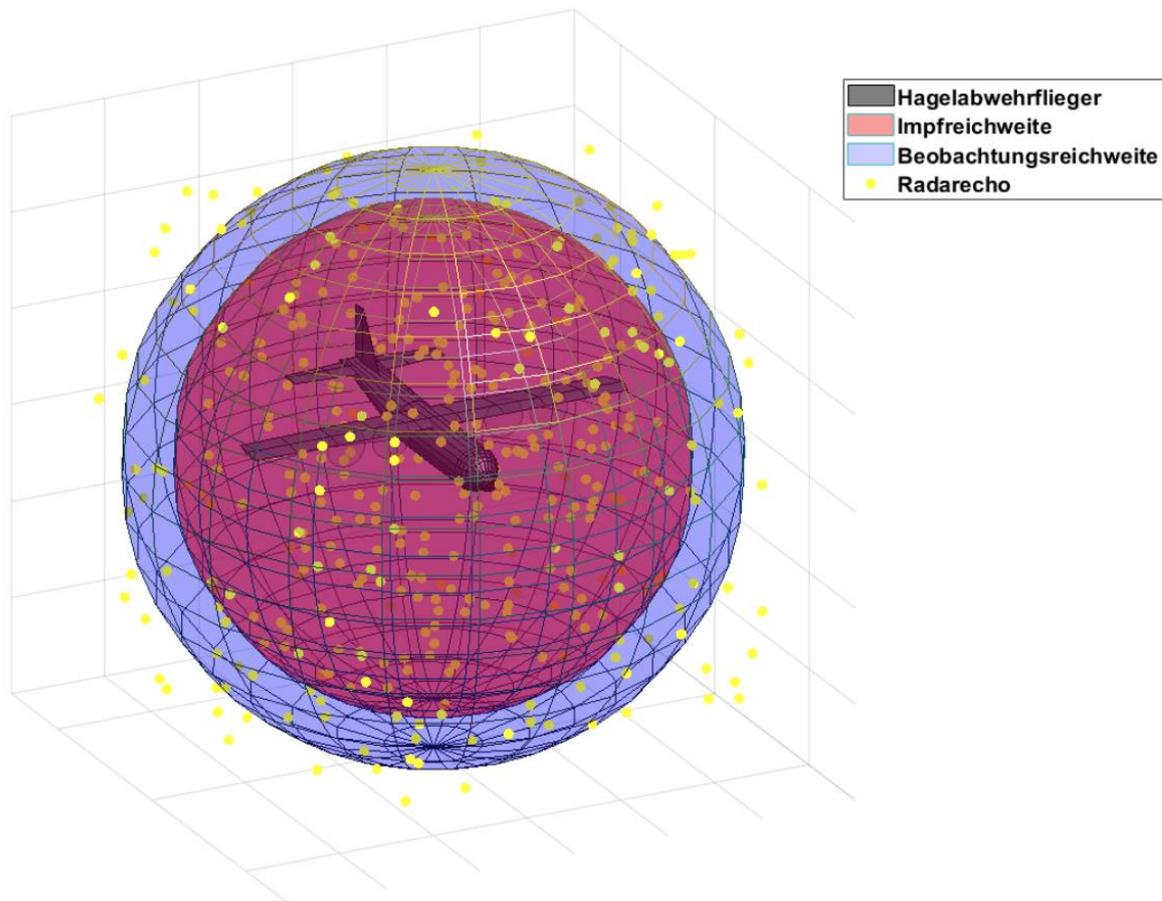


Abbildung 11 Wirkreichweite der Impfgeometrie (Bernatzky, 2018)

Zur Auswertung wird die Empfindlichkeit des Maßes für die Effektivität durch Variation des Radius der Impfgeometrie untersucht. Dazu wird eine Fallunterscheidung erstellt, die den Verlauf der Hagelpixel für verschiedene Radien der Impfgeometrie untersucht. Es kann vorkommen, dass neue Gewitterzellen innerhalb der Impfgeometrie entstehen und nach kurzer

Zeit wieder verschwinden. Solche kurzlebigen Zellen sind schwierig zu analysieren, da einige von ihnen nur fünf bis 10 Minuten bestehen. Das Problem besteht darin, dass die KONRAD-Daten in 5-Minuten-Zyklen erfasst werden. Das bedeutet, dass beispielsweise für eine Gewitterzelle, die sich nach fünf Minuten auflöst, nur für den Zeitpunkt des Auftretens die Anzahl der Hagelpixel der Stufen 5 und 6 bekannt ist. Für die Untersuchung solcher Zellen ist es notwendig, die KONRAD-Daten in kürzeren Zeitabständen zu erfassen, um Zu- oder Abnahmen besser erkennen und analysieren zu können.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Momentaufnahme eines Hagelfliegers, der von Gewitterzellen umgeben ist. Es ist erkennbar, dass die Anzahl der aktuell beimpten Gewitterzellen je nach Radius der Impfgeometrie variiert.

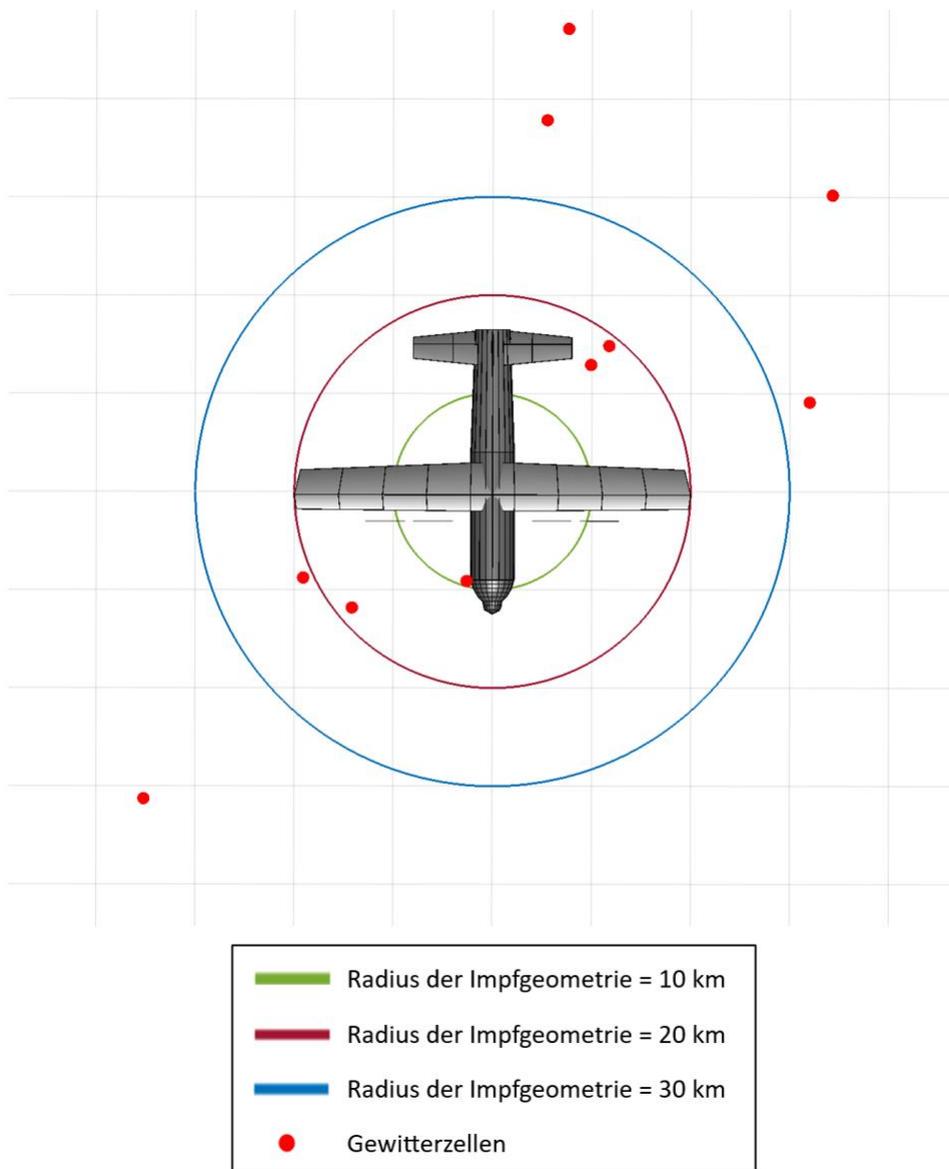


Abbildung 12 Betrachtung der Impfgeometrie für verschiedene Radien (Eigene Darstellung)

4 Auswertung der Gewitterzellen zur Ermittlung eines Maßes an Effektivität

Zunächst wird in der Auswertung eine getrennte Analyse der tatsächlich aufgetretenen Hageltage und der virtuell nachsimulierten Hageltage durchgeführt. Anschließend werden sie miteinander verglichen, um festzustellen, ob signifikante Unterschiede auftreten. Dadurch soll ein Maß für die Effektivität der Hagelabwehrmethode mittels Einbringung von Silberjodid mit Flugzeugen bestimmt werden.

Im Verlauf der Analyse werden drei verschiedene Aspekte der Hagelintensität untersucht:

1. Untersuchung der Zu- und Abnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten: Hierbei wird der Verlauf der Hagelintensität zu unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet, um festzustellen, wie sie sich entwickelt.
2. Untersuchung der Zunahme bis zum Maximum und der Abnahme ab dem Maximum: Es wird untersucht, wie sich die Hagelintensität bis zum Maximum entwickelt und wie sie danach abnimmt.
3. Untersuchung der Maximalanzahl der Hagelpixel im Zellkern: Es wird die höchste Anzahl an Hagelpixeln im Zellkern betrachtet, um festzustellen, welche Auswirkungen die Hagelabwehrmethode auf die Hagelbildung hat.

Durch diese verschiedenen Betrachtungen wird versucht, ein umfassendes Bild von der Effektivität der Hagelabwehrmethode zu erhalten.

4.1 Angewandte Statistische Test

Für die Auswertung werden hierzu folgende verschiedene Signifikanztests verwendet, welche kurz beschrieben werden sollten.

4.1.1 Shapiro-Test – Prüfung auf Normalverteilung

Der Shapiro-Wilk-Test ist ein statistischer Test, der dazu dient zu überprüfen, ob Daten aus einer Normalverteilung stammen. Er gilt als der beste Anpassungstest, unabhängig von der Größe der Stichprobe. Dieser Test eignet sich ausschließlich zur Überprüfung der Normalverteilung.

Hypothesen:

$$H_0: F(x) = F_0(x)$$

$$H_1: F(x) \neq F_0(x)$$

Die Teststatistik wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$W^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Abbildung 13 Formel zur Bestimmung der Teststatistik des Shapiro-Test (Eigene Darstellung)

$x_{(i)}$ Element der geordneten Stichprobe

a_i ... tabellierte Gewichte (aus z.B. Shapiro und Wilk (1965))

Um den Shapiro-Wilk-Test durchzuführen, ist eine manuelle Berechnung der Teststatistik sehr zeitaufwändig. Aus diesem Grund werden in diesem Test keine Gewichtstabellen oder kritischen Werte aufgeführt.

Wenn die Nullhypothese verletzt ist, würden kleine Werte für die Teststatistik resultieren. Daher wird beim Shapiro-Wilk-Test die Teststatistik mit dem unteren Quantil des kritischen Wertes verglichen. Wenn die Teststatistik kleiner oder gleich dem unteren Quantil ist, wird die Nullhypothese abgelehnt. (Duller, C., 2008)

4.1.2 F-Test – Prüfung auf Varianzgleichheit

Wenn untersucht werden soll, ob zwei unabhängig gewonnene Zufallsstichproben aus einer gemeinsamen normalverteilten Grundgesamtheit stammen, muss zuerst geprüft werden, ob ihre Varianzen gleich oder homogen sind.

Die Nullhypothese (H_0): $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ wird abgelehnt, sobald ein Wert $\hat{F} = s_1^2/s_2^2$, der aus den Stichprobenvarianzen berechnet wurde, größer ist als das entsprechende Quantil der Fisher-Verteilung. (Lothar Sachs, J. H., 2006)

4.1.3 Zweistichprobentest für unabhängige Stichproben

Der t-Test vergleicht den Mittelwert zweier Gruppen ob diese statistisch signifikant voneinander abweichen. Er basiert auf die t-Verteilung, einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, und berücksichtigt sowohl die Stichprobengröße als auch die Standardabweichung der Daten. Ausgangspunkt sind zwei unabhängige Stichprobenvariablen X_1, \dots, X_m und Y_1, \dots, Y_n mit unbekanntem stetigen Verteilungsfunktionen F und G . Für den Fall, dass die beiden Verteilungsfunktionen Normalverteilt sind, würde man mit einem T-Test der Erwartungswerte bei gleichen Varianzen vergleichen und mit einem F-Test die Homogenität beider Varianzen untersuchen.

Folgende Fragestellungen ergeben sich in allgemeiner Form:

- **Zweiseitiger Test**
 $H_0: F(z) = G(z)$ für alle $z \in \mathbb{R}$
 $H_1: F(z) \neq G(z)$ für mindestens ein $z \in \mathbb{R}$
- **Einseitiger Test, Fall A: X stochastisch größer als Y**
 $H_0: F(z) \geq G(z)$ für alle $z \in \mathbb{R}$
 $H_1: F(z) < G(z)$ für mindestens ein $z \in \mathbb{R}$
- **Einseitiger Test, Fall B: Y stochastisch größer als X**
 $H_0: F(z) \leq G(z)$ für alle $z \in \mathbb{R}$
 $H_1: F(z) > G(z)$ für mindestens ein $z \in \mathbb{R}$

Aus dem T-Test ergibt sich der p-Value, welcher mit dem hier gewählten Konfidenzintervall $\alpha = 0.05$ verglichen wird. Wenn der p-Wert kleiner ist als das vorgegebene Signifikanzniveau α , kann die Nullhypothese (H_0) verworfen werden.

Der p-Wert gibt an, wie wahrscheinlich es ist, die beobachteten Daten zu finden, wenn die Nullhypothese wahr ist. Ein kleiner p-Wert deutet darauf hin, dass die beobachteten Daten sehr unwahrscheinlich sind, wenn die Nullhypothese zutrifft. Daraus lässt sich schließen, dass es wahrscheinlich signifikante Unterschiede zwischen den verglichenen Gruppen oder Bedingungen gibt. (Duller, C.,2008)

4.1.4 Wilcoxon-Rang-Test – Lageunterschiedsvergleich zweier Stichproben

Oft kann die Annahme einer Normalverteilung nicht getroffen werden, aber dennoch vorausgesetzt werden, dass die Stichprobenwerte unabhängig zueinander sind. Um dennoch eine Aussage über die Lageunterschiede der Stichprobenwerte zu ermitteln, bietet sich der Wilcoxon-Rang-Test für unabhängige Stichproben, auch Mann-Whitney-Test genannt, an.

Die Stichprobenwerte werden der Größe nach aufsteigend geordnet und jedem Wert eine Rangzahl zugeordnet. Das bedeutet, dass der kleinste Wert die Rangzahl 1 bekommt und für die folgenden höheren Werte die nächsthöheren Rangzahlen zugeordnet werden.

T^+ = Summe der positiven Rangzahlen, die zu den positiven Werten gehören

T^- = Summe der negativen Rangzahlen, die zu den negativen Werten gehören

Die Nullhypothese $F(z) = G(z)$ wird verworfen, falls für $T = \min(T^+, T^-)$ gilt, dass $T \leq w_{n,\alpha/2}$.

Dabei bezeichnen $w_{n,\gamma}$ die tabellierten Quantile zum Wilcoxon-Test. (Pruscha, H. 2006)

4.1.5 Effektstärke nach Cohens D

Die praktische Relevanz oder Bedeutung von signifikanten Effekten, wenn es um die Bewertung der erzielten Ergebnisse geht, wird im Allgemeinen mithilfe des dimensionslosen Maßes der Effektstärke oder Effektgröße beurteilt. Vom Vorteil ist, dass die Effektstärke kaum von der Stichprobengröße n beeinflusst wird.

Die Effektstärke stellt eine standardisierte Kennzahl dar, die Veränderungen in einzelnen oder mehreren Gruppen einschätzt und interpretiert. Wenn sich die Effektstärkenschatzung auf die Stichproben der beiden Experimentalgruppen bezieht und die Standardabweichungen der beiden Gruppen annähernd gleich sind, kann d (eine Maßeinheit für die Effektstärke) gemäß Cohen berechnet werden.

Die Effektstärke normiert im einfachsten Fall die Unterschiede zwischen den unabhängigen Gruppen anhand der Streuung der Testwerte (t-Test für unabhängige Stichproben).

Die Formel lautet wie folgt:

$$d = \frac{(\mu_A - \mu_B)}{\sigma}$$

Abbildung 14 Formel zur Bestimmung der Effektstärke nach Cohen (Eigene Darstellung)

Die von Cohen vorgeschlagene Klassifizierung stellt jedoch lediglich eine erste Orientierungshilfe dar.

Die festgelegte Effektstärkeklassifizierung weist dabei die folgenden Werte auf:

$d = 0.20 \hat{=}$ Kleiner Effekt

$d = 0.50 \hat{=}$ Mittlerer Effekt

$d = 0.80 \hat{=}$ Großer Effekt

4.2 Untersuchung der Zu- und Abnahmen bis zu definierten Zeitpunkten

In den meisten Fällen tritt die Impfung einer Gewitterzelle während ihrer natürlichen Zunahme der Hagelpixel im Kern ein, denn nur so lässt sich die Entwicklung von großen Hagelkörnern vermeiden. Um die kurzfristigen Einflüsse nach Impfstart zu untersuchen, soll für verschiedene Zeitpunkte nach Impfbeginn die Zu- beziehungsweise Abnahmen untersucht werden.

Der typische Verlauf einer Zelle über die Zeit ist im folgenden Beispiel einer vergangenen Gewitterzelle am 16.06.2006 erkennbar. Dabei sind die Verläufe beider Echoklassen abgebildet:

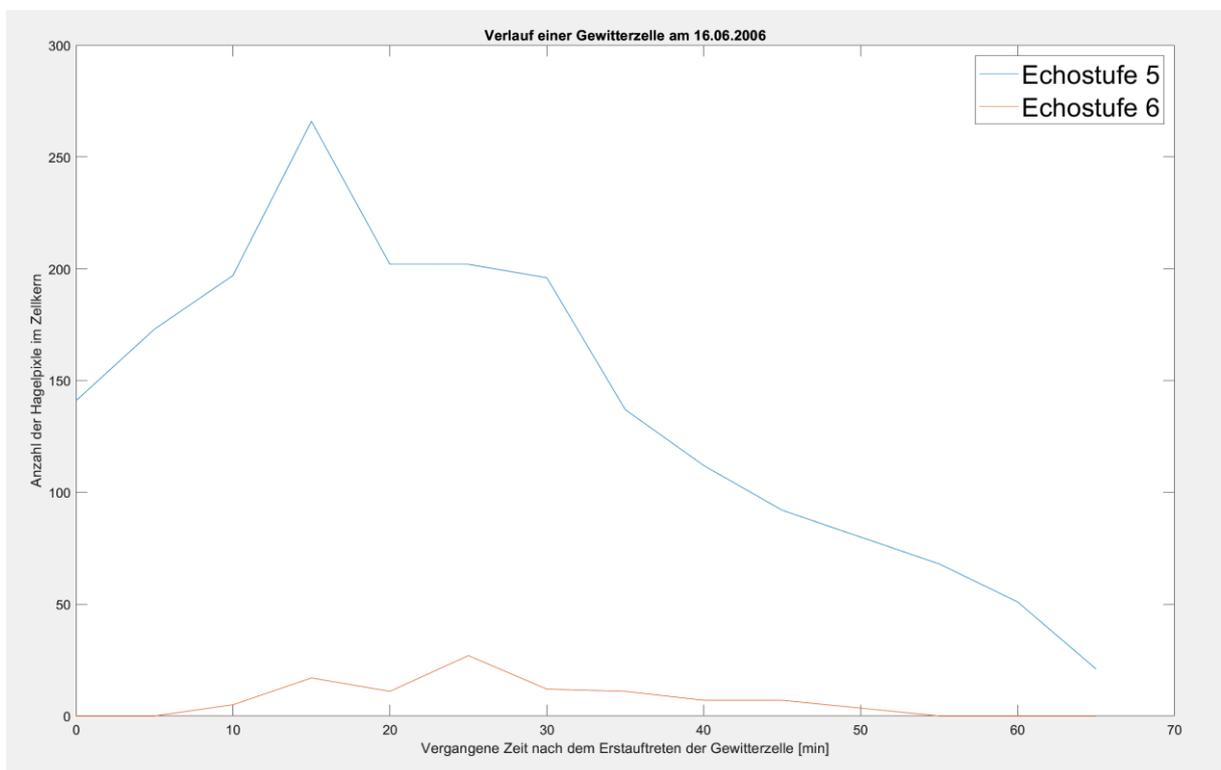


Abbildung 15 Zeitlicher Verlauf der Hagelpixelanzahlen der Echostufen 5 und 6 am Beispiel einer Gewitterzelle aus dem 16.06.2006 (Eigene Darstellung)

Es ist festzustellen, dass Hagelpixel der Stufe 6 erst fünf Minuten später auftreten und sich zehn Minuten früher als die der Echostufe 5 auflösen. Der Verlauf zeigt häufige Wechsel in der Steigung sowohl bei der Zunahme als auch bei der Abnahme der Hagelpixel.

Es ist jedoch zu beachten, dass andere Zellen ähnlich wechselnde Verläufe aufweisen, ohne dass eine lineare Zu- und Abnahme der Hagelpixel festzustellen ist. Daher kann der Ansatz, Trendverläufe bis zu bestimmten Zeitpunkten zu ermitteln, als nicht sinnvoll bewertet werden.

4.3 Untersuchung der Zunahme bis zum Maximum und der Abnahme ab dem Maximum

Jede Gewitterzelle besitzt fast ausschließlich einen Zeitpunkt, an der die Anzahlen der Hagelpixel der Stufen 5 und 6 im Zellkern ihren Höhepunkt besitzen. Vor und nach diesem Zeitpunkt herum können die Anzahlen mehrmals Steigen und Fallen. Um die Verläufe zu analysieren, verwendet man eine lineare Regressionsanalyse, die die Zunahme beider Echoklassen ab dem Zeitpunkt bewertet, an dem Hagelpixel größer als null vorhanden sind. Dies wird bis zum Erreichen der maximalen Anzahl von Hagelpixeln fortgeführt. Ebenso wird die Abnahme der Hagelpixel ab dem Punkt des maximalen Auftretens bis zum Zeitpunkt, an dem keine Pixel mehr vorhanden sind, untersucht. Diese Trends können als Steigung einer Geraden interpretiert werden, welcher eine Aussage über den Verlauf der Hagelpixelmengen der einzelnen Echoklassen, während der Phasen des An- und Abstiegs, zulässt. Ein Indiz für die Wirksamkeit der Hagelabwehr wären eine schwächere Zunahme für die Hagelpixel der Klassen 5 und 6 auf Seiten der realen Flüge im Vergleich zu den simulierten Flügen.

Die Tanks der Hagelflieger aus Rosenheim enthalten je zwanzig Liter Lösung, das entspricht etwa ein Kilogramm reinen Silberjodid pro Tank. Dabei entstehen durch den Verbrennungsprozess pro Gramm Silberjodid mehrere Billionen Kristallisationskeime, an denen die Feuchtigkeit der Wolke kondensieren kann (Westphal, 2003).

Je nach Größe und Intensität der Gewitterzelle, sind unterschiedliche Mengen und damit auch unterschiedliche Impfdauern notwendig, um eine effektive Hagelreduzierung bewirken. Für die folgende Auswertung wurden dabei alle Gewitterzellen berücksichtigt, die mindestens zehn Minuten lang beimpft wurden. Hinzu wurde für den Radius der Impfgeometrie der Wert 10km gewählt, welcher die maximale Entfernung zwischen dem Hagelflieger und einer Gewitterzelle definiert, ab dem davon ausgegangen wird, dass die Impfung zu wirken beginnt.

Die Berechnungen der Zu- und Abnahmen für die Echoklassen 5 und 6 wurden für alle Flüge einzeln durchgeführt und anschließend wurden diese nach der Echoklasse und reell/virtuell sortiert. Aufgrund der hohen Varianzen der Gruppen werden zur Stabilisierung die Datengruppen logarithmisch transformiert.

4.3.1 Zunahme bis zum Maximum

Die Berechnungen der Zunahmen bis zum Maximum für die Echoklassen 5 und 6 wurden für jeden Flug separat durchgeführt. Anschließend wurden diese Daten nach Echoklasse und ob sie reell oder virtuell sind, sortiert. Aufgrund der hohen Varianzen innerhalb der Gruppen wurde die logarithmische Transformation angewendet, um die Stabilität der Datengruppen zu verbessern.

In der nachliegenden Abbildung werden die Verteilungen der Datengruppen als Boxplot, auch als Box-Whisker-Plot bezeichnet, dargestellt. Ein Boxplot zeigt wichtige statistische Kennzahlen wie den Median, das erste und dritte Quartil sowie potenzielle Ausreißer.

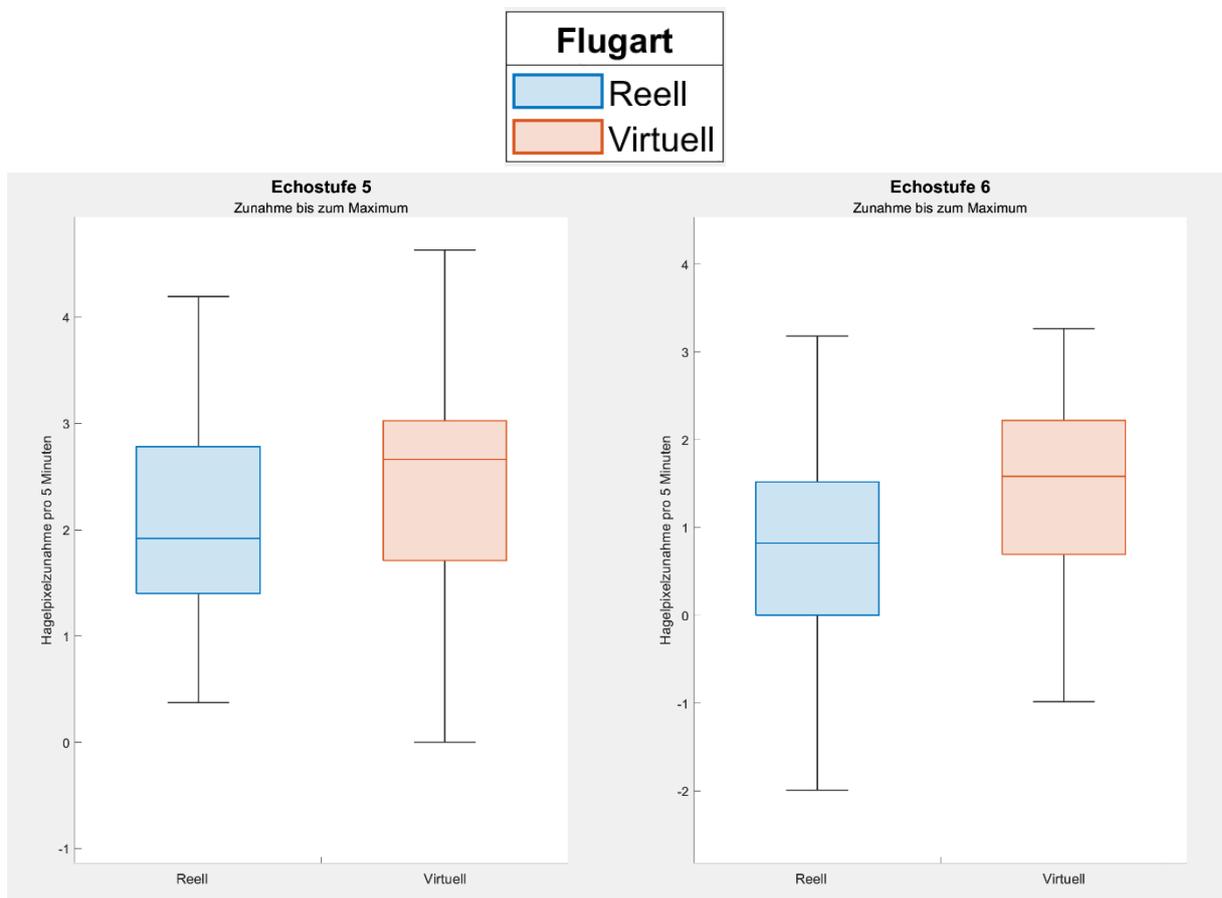


Abbildung 16 Boxplots der Zunahme Phase (Impfgeometrie = 10km, Mindestimpfdauer = 10min)
(Eigene Darstellung)

Anhand der Mediane ist erkennbar, dass alle Zunahmen der virtuell simulierten Flüge im Vergleich zu den tatsächlich stattgefundenen Flügen eine höher steigende Tendenz aufweisen, was möglicherweise auf die Wirkung der Hagelabwehr hinweist. Um nun eine statistisch signifikante Aussage über mögliche Unterschiede in der Lage der Verteilungen machen zu können, wird im Folgenden der t-Test für unabhängige Stichproben mit gleicher Varianz oder der Wilcoxon-Rang-Test angewendet. Hierbei ist es zunächst erforderlich, die Gruppen

(Echostufe5-reell, Echostufe5-virtuell, Echostufe6-reell, Echostufe6-virtuell) auf Normalverteilung zu prüfen.

Mithilfe des Shapiro-Tests werden die Gruppen auf Normalverteilung geprüft und der F-Test prüft die Varianzen auf Gleichheit. Der hier zu ermittelnde Parameter p-Value wird mit dem Konfidenzintervall $\alpha = 0.05$ verglichen. Ist der p-Value kleiner als α , so bedeutet dies, dass keine Normalverteilung vorliegt und die Varianzen beider Gruppen nicht gleich sind.

Tabelle 1 Ergebnisse des Shapiro-Test und des F-Tests für die Zunahme

Shapiro-Test	p-Value Shapiro-Test	p-Value F-Test	Interpretation
Echoklasse 5	Reell: 0.5969 Virtuell: 0.00025	0.6730	Virtuelle Gruppe ist nicht Normalverteilt und die Varianzen sind gleich
Echoklasse 6	Reell: 0.8372 Virtuell: 0.07885	0.2059	Beide Gruppen sind Normalverteilt und die Varianzen sind gleich

Bis auf die virtuellen Daten der Echoklasse 5, konnte für alle Gruppen eine Normalverteilung festgestellt werden. Es sind keine Varianzunterschieden zwischen reell und virtuell vorhanden, somit kann der t-Test für gleiche Varianzen für die Echostufe 6 angewendet werden. Für die Echostufe 5 wird der Wilcoxon-Rang-Test angesetzt.

Der Signifikanz-Test wurde in „R“ durchgeführt, einer Software für statistische Datenanalyse und Grafikerstellung. Da die Boxplots darauf hindeuten, dass die virtuellen Flüge einen höheren Median besitzen, wird ein einseitiger t-Test zu statistischer Bestätigung dieser Annahme wie folgt angewendet:

```
wilcox.test(logtrans_Echo5_virtuell,logtrans_Echo5_reell, exact=FALSE)
```

```
t.test(logtrans_Echo6_virtuell,logtrans_Echo6_reell, var.equal = TRUE, alternative="greater")
```

Der ermittelte p-Wert wird mit einem Konfidenzintervall $\alpha = 0,05$ (5%) verglichen. Wenn der p-Wert kleiner als α ist, kann die Nullhypothese verworfen werden, was bedeutet, dass die Zunahme der virtuellen Flüge signifikant größer ist als die der reellen Flüge.

Aus den Tests der beiden Echostufen wurden die folgenden p-Werte ermittelt, wie in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 2 Ergebnisse des T-Test/Wilcoxon-Test für die Zunahme

T-Test /Wilcoxon- Test	p-Value	Ergebnis	Interpretation
Echoklasse 5	0,3%	p-Value < α	Virtuelle Zellen zeigen eine signifikant stärkere Zunahme
Echoklasse 6	3,4%	p-Value < α	Virtuelle Zellen zeigen eine signifikant stärkere Zunahme

Die durchgeführten Signifikanztests der logarithmisch transformierten Zunahmen für beide Echostufen bestätigen die Vermutung, dass die Zunahmen der virtuellen Flüge tendenziell höher sind als die der reell durchgeführten Flüge.

Die Effektstärke wurde in R wie folgt berechnet:

```
cohensD(logtrans_Echo5_reell, logtrans_Echo5_virtuell)
```

```
cohensD(logtrans_Echo6_reell, logtrans_Echo6_virtuell)
```

Aus der Berechnung nach Cohen ergibt sich folgendes Ergebnis:

Tabelle 3 Ergebnisse der Cohens Effektstärke für die Zunahme

Cohen's Effektstärke	d-Wert	Interpretation
Echoklasse 5	0.45	Mittlerer Effekt
Echoklasse 6	0.64	Mittlerer bis hoher Effekt

Die Effektstärken zeigen, dass die Hagelabwehr einen moderaten Effekt auf die Zunahme der Hagelpixel hat. Dies bedeutet, dass die Anwendung der Hagelabwehrmaßnahme im Durchschnitt zu einer Verringerung der Zunahme in beiden Echostufen führt.

4.3.2 Abnahme ab Maximum

Die Abnahmen ab dem Zeitpunkt des Maximums für die Echoklassen 5 und 6 werden ebenfalls für jeden einzelnen Flug berechnet und nach Echoklassen und Flugarten sortiert. Um die Varianzen zu stabilisieren, werden auch hier die Gruppen logarithmisch transformiert. Der folgende Boxplot zeigt die Verteilungen der Datengruppen.

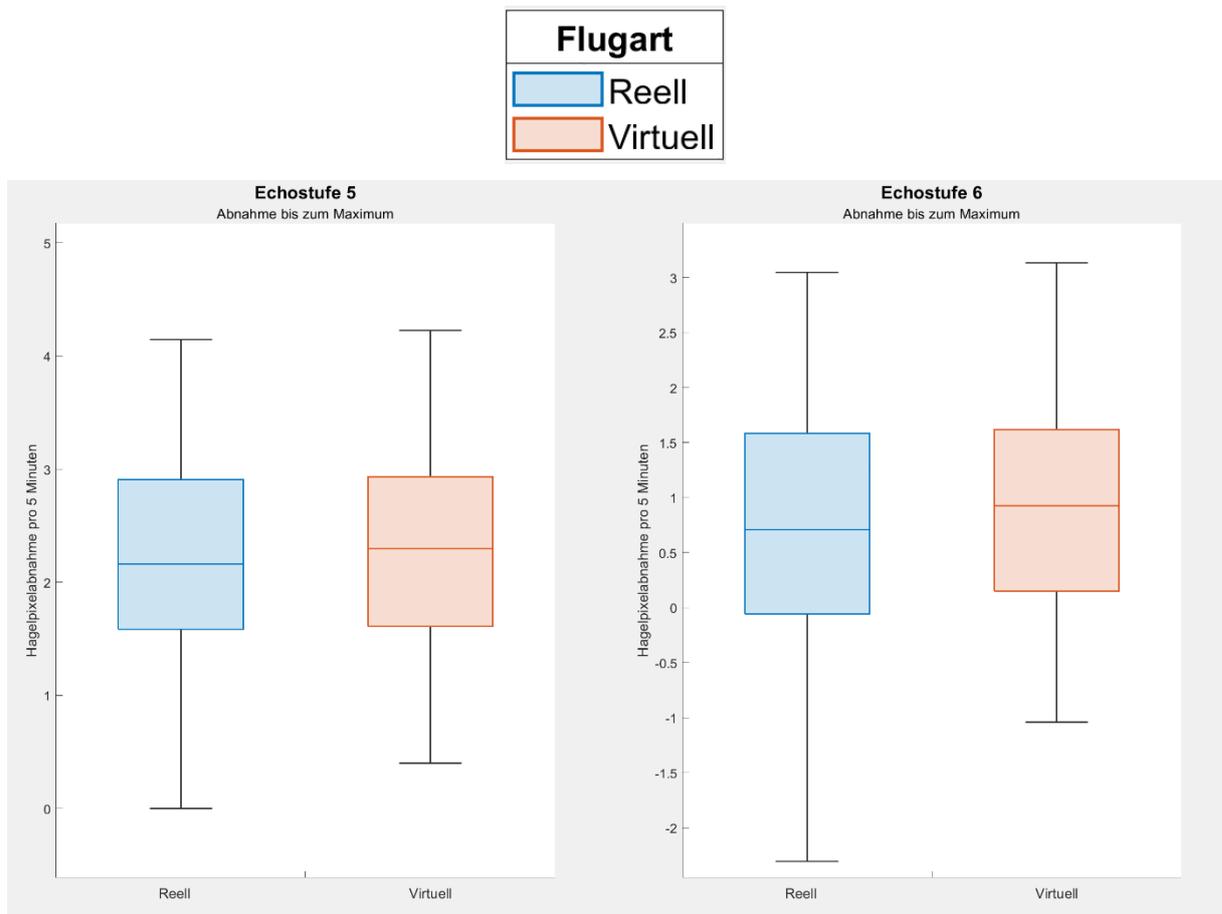


Abbildung 17 Boxplot der Abnahmephase (Impfgeometrie = 10km, Mindestimpfdauer = 10min)
(Eigene Darstellung)

Die Mediane zeigen eine leichte Tendenz zu höheren Abnahmen bei den virtuellen Flügen im Vergleich zu den realen Flügen, wobei die Unterschiede sehr gering sind. Um diese Unterschiede genauer zu untersuchen, wird erneut die statistische Signifikanz ermittelt.

Zu Beginn wurden die Gruppen, ähnlich wie bei den Zunahmen bis zum Maximum, auf Normalverteilung und Varianzunterschiede überprüft. Die Ergebnisse des Shapiro-Tests und des F-Tests sind wie folgt:

Tabelle 4 Ergebnisse des Shapiro-Test und des F-Test für die Abnahme

Shapiro-Test	p-Value Shapiro-Test	p-Value F-Test	Interpretation
Echoklasse 5	Reell: 0.1742 Virtuell: 0.5495	0.7753	Beide Gruppen sind Normalverteilt und die Varianzen sind gleich
Echoklasse 6	Reell: 0.6151 Virtuell: 0.4554	0.4224	Beide Gruppen sind Normalverteilt und die Varianzen sind gleich

In diesem Fall wurde festgestellt, dass alle Gruppen eine Normalverteilung aufweisen und keine Varianzunterschiede zwischen den reellen und virtuellen Flügen bestehen. Somit kann der t-Test für gleiche Varianzen angewendet werden.

Für den t-Test wird der einseitige Test wie folgt angewendet:

```
t.test(Abnahme_Data$logtrans_Echo5_virtuell_abnahme,Abnahme_Data$logtrans_Echo5_reell_abnahme, var.equal = TRUE, alternative="greater")
```

```
t.test(Abnahme_Data$logtrans_Echo6_virtuell_abnahme,Abnahme_Data$logtrans_Echo6_reell_abnahme, var.equal = TRUE, alternative="greater")
```

Folgende P-Werte wurden dabei ermittelt:

Tabelle 5 Ergebnisse des T-Tests für die Abnahme

T-Test	p-Value	Ergebnis	Interpretation
Echoklasse 5	76%	p-Value > α	Virtuelle Zellen zeigen keine signifikant stärkere Zunahme
Echoklasse 6	17%	p-Value > α	Virtuelle Zellen zeigen keine signifikant stärkere Zunahme

Für die logarithmisch transformierten Abnahmen beider Echostufen konnte der Signifikanztest keinen signifikanten Unterschied zwischen den virtuellen und reellen Flügen feststellen. Das deutet darauf hin, dass die Hagelabwehrmethoden vermutlich keinen Einfluss auf die Phase der Abnahme haben.

4.4 Untersuchung der Maximalanzahlen an Hagelpixel im Zellkern

Für den Ansatz, zur Untersuchung der Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern werden die Maxima für jede Gewitterzelle ermittelt und wieder in folgenden Gruppen unterteilt:

- Echoklasse **fünf** der **reell** stattgefundenen Flüge
- Echoklasse **fünf** der **virtuellen** stattgefundenen Flüge
- Echoklasse **sechs** der **reell** stattgefundenen Flüge
- Echoklasse **sechs** der **virtuellen** stattgefundenen Flüge

Der Radius der Impfgeometrie wurde erneut auf 10 km festgelegt, und die Mindestimpfdauer der betrachteten Zellen beträgt 10 Minuten. Da es gelegentlich vorkommt, dass Hagelpixel der Stufe 6 nicht unmittelbar zu Beginn der Gewitterzellenbildung vorhanden sind und eine frühzeitige Auflösung der Hagelpixel der Stufe 6 möglich ist, werden bei der Betrachtung der Maxima der Echostufe 6 nur Echoverläufe berücksichtigt, die für mindestens 10 Minuten Hagelpixel größer Null aufwiesen.

Um die Varianzen zu reduzieren und eine stabilere Analyse durchzuführen, werden die Daten logarithmisch transformiert. Anschließend werden die Gruppen erneut auf Normalverteilung und gleiche Varianz mithilfe des Shapiro-Tests und des F-Tests geprüft.

Die folgende Abbildung zeigt die Boxplots der Maximalwerte.

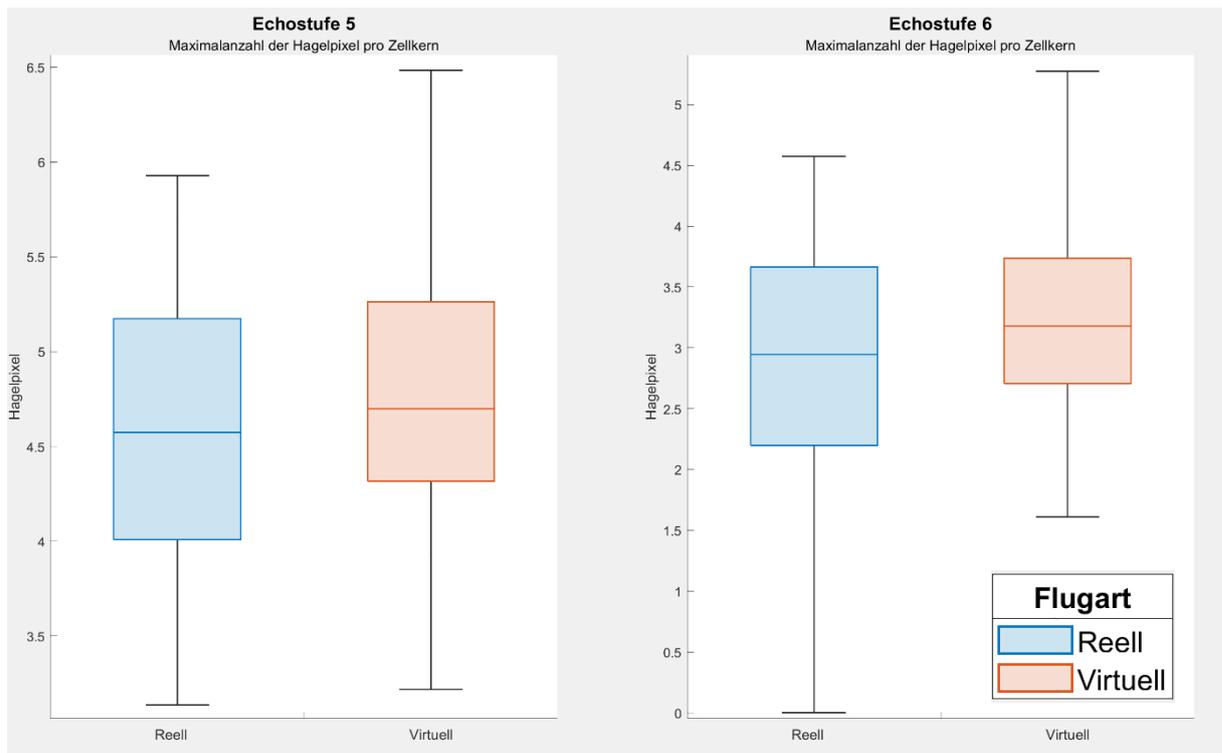


Abbildung 18 Boxplots der Maximalanzahlen (Impfgeometrie = 10km, Mindestimpfdauer = 10min)
(Eigene Darstellung)

Der Shapiro-Test auf Normalverteilung und der F-Test zur Ermittlung von Varianzunterschieden zwischen reellen und virtuellen Flügen ergaben folgende Ergebnisse:

Tabelle 6 Ergebnisse des Shapiro-Tests und F-Test für die Maxima der Hagelpixelanzahlen

Shapiro-Test	p-Value Shapiro-Test	p-Value F-Test	Interpretation
Echoklasse 5	Reell: 0.06764 Virtuell: 0.5298	0.8979	Beide Gruppen sind Normalverteilt und die Varianzen sind gleich
Echoklasse 6	Reell: 0.07912 Virtuell: 0.1544	0.3073	Beide Gruppen sind Normalverteilt und die Varianzen sind gleich

Für beide Echoklassen ergab der Shapiro-Test, dass die logarithmisch transformierten Werte der reellen und virtuellen Flüge normalverteilt sind. Darüber hinaus konnte mithilfe des F-Tests festgestellt werden, dass die Varianzen zwischen reellen und virtuellen Flügen ausreichend unterschiedlich sind, um den t-Test durchzuführen.

Der t-Test für die Echoklasse 5 folgte wie nachstehend:

```
t.test(Max_Data$Max_5_v,Max_Data$Max_5_r, var.equal = FALSE, alternative="greater")
```

```
t.test(Max_Data$Max_6_v,Max_Data$Max_6_r, var.equal = TRUE, alternative="greater")
```

Die Ergebnisse sind wie folgt:

Tabelle 7 Ergebnisse des T-Tests für die Maxima der Hagelpixelanzahlen

T-Test	p-Value	Ergebnis	Interpretation
Echoklasse 5	2,2%	p-Value < α	Virtuelle Zellen zeigen eine signifikant stärkere Zunahme
Echoklasse 6	6,4%	p-Value > α	Virtuelle Zellen zeigen eine tendenziell stärkere Zunahme

Der t-Test bestätigt die Annahme, dass die logarithmisch transformierten Maximalanzahlen der Zellkerne für die Echostufe 5 an reellen Flugtagen höher sind. Für die Echostufe 6 wurde eine Signifikanz von 6% festgestellt, was darauf hinweist, dass die Gewitterzellen an virtuell nachsimulierten Tagen tendenziell größer sind als die an reellen Tagen. Obwohl die Nullhypothese abgelehnt wird, da der p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau von

5% ist, zeigt die ermittelte Signifikanz, dass es eine gewisse Evidenz dafür gibt, dass die virtuell nachsimulierten Proben im Durchschnitt größer sind als die der realen Proben.

Es kommt jedoch vor, dass Gewitterzellen während ihres Lebenszyklus nur für kurze Zeit Hagelpixel der Echostufe 6 aufweisen und die Zellkerne zum Zeitpunkt des Maximums nur wenige Hagelpixel enthalten. Sollte dies vermehrt für Zellen an realen Flugtagen zutreffen, könnte darauf geschlossen werden, dass die Impfung die Bildung von Echostufe 6 vorzeitig hemmt und die Entwicklung frühzeitig stoppen kann. In Kapitel 5 wird diese Annahme genauer untersucht.

Die Effektstärke wurde wie folgt ermittelt:

```
cohensD(Max_Data$Max_5_r, Max_Data$Max_5_v)
```

Nach Cohen konnte die folgende Effektstärke ermittelt werden:

Tabelle 8 Ergebnisse der Cohen's Effektstärke für die Maxima der Hagelpixelanzahlen

Cohen's Effektstärke	d-Wert	Interpretation
Echoklasse 5	0.40	Leichter bis mittlerer Effekt
Echoklasse 6	0.32	Leichter bis mittlerer Effekt

Für den Einfluss der Hagelabwehr auf die logarithmischen Maximalanzahlen der Hagelpixel der Echostufe 5 und 6 konnte eine leichte bis mittlere Effektstärke ermittelt werden.

4.5 Ergebnisse aus der Auswertung

Der Verlauf der Intensität konnte gut durch den Verlauf der Anzahl der Hagelpixel im Zellkern einer Gewitterzelle nachvollzogen werden. In der Regel erreicht die Anzahl der Hagelpixel ein Maximum und nimmt anschließend wieder ab.

Mithilfe von statistischen Tests wurde festgestellt, dass während der Zunahme Phase die virtuell nachgestellten Flüge im Vergleich zu den tatsächlich stattgefundenen Flügen merklich stärker zugenommen haben, was ein Indiz für die Hagelabwehr ist. Nach Cohens konnte eine mittlere Effektstärke für die Echostufe 5 und eine mittlere bis hohe Effektstärke für die Echostufe 6 ermittelt werden.

Auf der anderen Seite konnte aus den Boxplots abgelesen werden, dass die virtuellen Flugtage eine minimale größere Abnahme im Median aufwiesen im Vergleich zu den realen Flugtagen. Jedoch ergab der durchgeführte t-Test keine signifikanten Unterschiede, sodass das Ergebnis darauf hindeutet, dass der beobachtete Unterschied auf zufällige Variationen oder Stichprobenschwankungen zurückzuführen ist.

Für die Maximalanzahlen der Hagelpixel pro Zellkern einer Gewitterzelle ist aus den Boxplots ersichtlich, dass für beide Echostufen vermehrt die Anzahl höher bei den virtuellen Flugtagen ist. Der t-Test konnte die Annahme für die Echostufe 5 bestätigen, dass die logarithmisch transformierten Maximalanzahlen der realen Gewitterzellen mit hoher Wahrscheinlichkeit größer sind als die der virtuellen Gewitterzellen. Für die Echos der Stufe 6 hingegen konnte nach dem T-Test für die log-transformierten Maximalanzahlen ein P-Wert von 6% ermittelt werden, der über dem Signifikanzniveau von 5% liegt. Somit wird die Nullhypothese abgelehnt. Dennoch deutet eine Signifikanz von 6% darauf hin, dass die Gewitterzellen der virtuell nachsimulierten Flugtage tendenziell größer sind als die der realen Flugtage.

5 Untersuchung der Empfindlichkeit der Effektivität

Für die bisherige Auswertung wurde angenommen, dass die Mindestimpfdauer der untersuchten Zellen 10 Minuten beträgt und die Impfgeometrie einen Radius von 10 km aufweist. Nun wird im Folgenden die Sensitivität des Maßes bei Änderungen der beiden Parameter untersucht.

5.1 Einfluss des Abstands zwischen Flugzeug und Zelle

Die in Kapitel 3.3.2 beschriebene Impfgeometrie legt die Entfernung fest, bei der davon ausgegangen wird, dass die Impfung mittel Silberjodid einen Einfluss auf die Bildung und Entwicklung von Hagelkörnern hat. Im Folgenden wird das Maß für die Radien 15km und 20km untersucht, um den Einfluss des Parameters zu ermitteln. Dabei wird die vorher angenommene Mindestimpfdauer der Zellen von 10 Minuten beibehalten.

5.1.1 Variieren der Impfgeometrie

Die folgende Grafik zeigt die Mediane der Zunahmen für die verschiedenen Radien der Impfgeometrie:

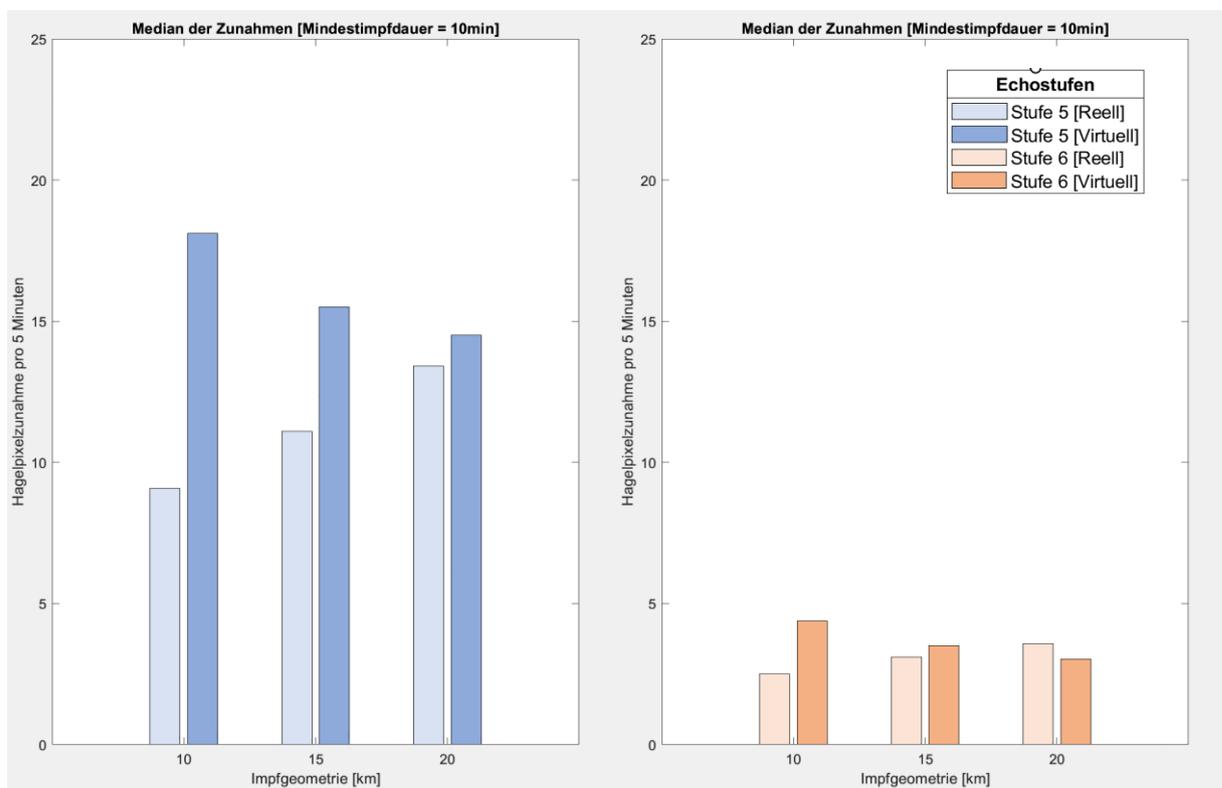


Abbildung 19 Mediane der Zunahmen für verschiedene Impfgeometrien (Eigene Darstellung)

Anhand der Mediane fällt auf, dass bei der Wahl größerer Impfgeometrien (15 km und 20 km) der Unterschied zwischen reellen und virtuellen Flügen für beide Echoklassen sehr gering wird. Für eine Impfgeometrie von 20 km ist sogar für die Echoklasse 5 eine leicht erhöhte Zunahme auf Seiten der reellen Flüge zu verzeichnen. Die folgende Tabelle zeigt die Auswertung mithilfe von Signifikanztests und die Effektstärke für verschiedene Impfgeometrien. Die Ergebnisse des Shapiro-Tests werden als "NV" für "Normalverteilt" und "Nicht NV" für "nicht normalverteilt" sortiert.

Tabelle 9 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Zunahme bei Variieren der Impfgeometrie

Impfgeometrie	Echoklasse	Shapiro-Test P-Value	F-Test P-Value	T-Test/ Wilcoxon-Test P-Value	Effektstärke d
10km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	0.3%	0.65
	Echo 5 virtuell	Nicht NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	3,4%	0.37
	Echo 6 virtuell	NV			
15km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	20%	-
	Echo 5 virtuell	Nicht NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	34%	-
	Echo 6 virtuell	NV			
20km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	73%	-
	Echo 5 virtuell	Nicht NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	83%	-
	Echo 6 virtuell	Nicht NV			

Für die Impfgeometrie von 10 km wurde sowohl für die Echoklasse 5 als auch für die Echoklasse 6 eine statistische Signifikanz festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass an Tagen, an denen keine Hagelflieger eingesetzt wurden, eine stärkere Zunahme der Hagelanzahlen im Zellkern einer Gewitterzelle zu beobachten ist.

Ein möglicher Grund für das Fehlen eines Lageunterschieds bei der Wahl einer großen Impfgeometrie könnte darin liegen, dass Zellen berücksichtigt wurden, die aufgrund ihres

großen Abstands zum Flugzeug vermutlich nicht ausreichend beimpft wurden, um die Zunahme der Hagelkörner zu verringern. Aus der Auswertung lässt sich ableiten, dass die effektive Impfreichweite zwischen 10 km und 15 km liegt.

Aus der folgenden Grafik sind die Mediane der Abnahmen für die verschiedenen Radien der Impfgeometrie ersichtlich:

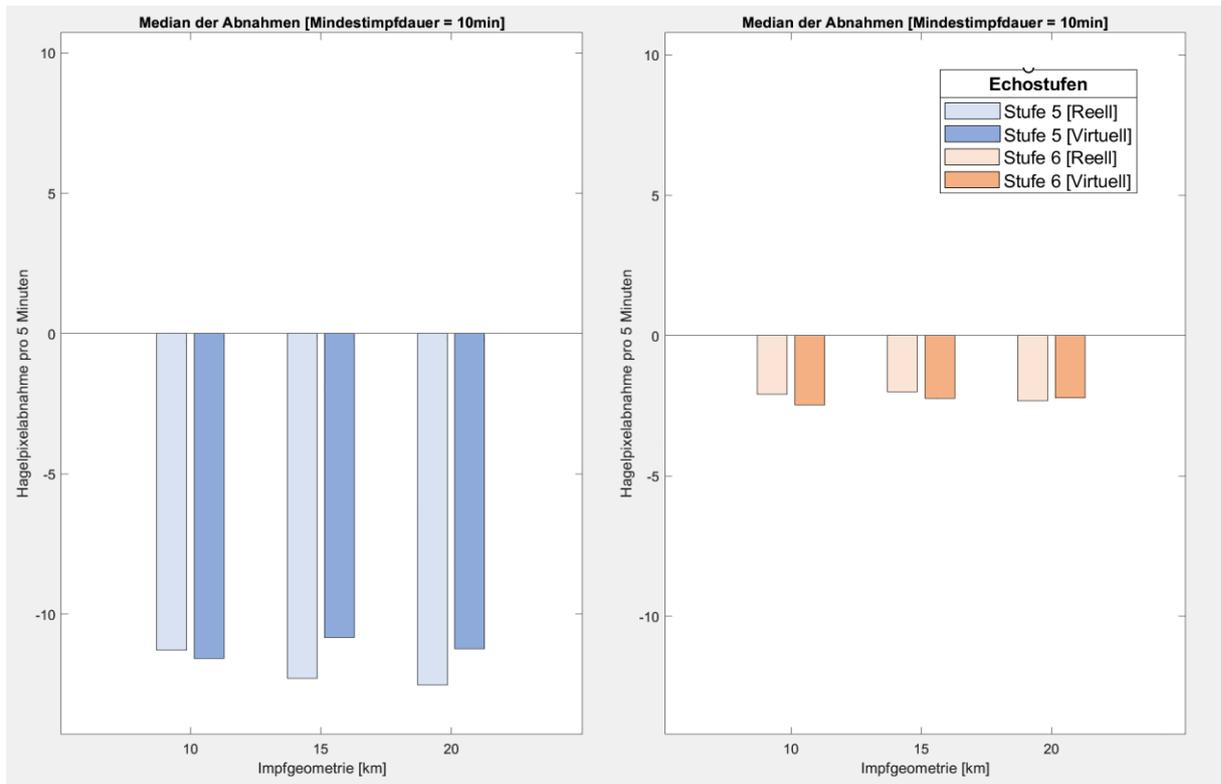


Abbildung 20 Mediane der Abnahmen für verschiedene Impfgeometrien (Eigene Darstellung)

Aus der Verteilung ist erkennbar, dass die Verläufe der Hagelpixel der Echostufe 6 an den virtuell nachsimulierten Flugtagen für einige Betrachtungsräume leicht stärker abnehmen. Jedoch ist der Unterschied sehr gering, was darauf hinweist, dass es keine statistische Signifikanz für einen systematischen Lageunterschied gibt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Auswertung der Abnahmen für verschiedene Impfgeometrien aufgeführt, um mögliche systematische Lageunterschiede zu ermitteln:

Tabelle 10 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Abnahme bei Variieren der Impfgeometrie

Impfgeometrie	Echoklasse	Shapiro-Test P-Value	F-Test P-Value	T-Test / Wilcoxon-Test P-Value	Effektstärke d
10km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	76%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	17%	-
	Echo 6 virtuell	NV			
15km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	91%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	72%	-
	Echo 6 virtuell	Nicht NV			
20km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	81%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	74%	-
	Echo 6 virtuell	Nicht NV			

Für die meisten untersuchten Fälle wurde nach dem Shapiro-Test eine Normalverteilung festgestellt, und da die Varianzen zwischen den realen und virtuellen Daten gleich waren, konnte der t-Test mit gleicher Varianz verwendet werden. Liegt keine Normalverteilung vor, wurde der Wilcoxon-Rang-Test angewendet. Die ermittelten p-Werte lagen alle über 0,5, was darauf hinweist, dass sich die Mediane für jede Impfgeometrie zwar leicht unterschieden, aber aus der Verteilung der Daten keine statistisch signifikanten Lageunterschiede erkennbar waren. Dies bedeutet, dass die Abnahmen der Hagelpixelanzahlen in den verschiedenen Betrachtungsräumen zwischen den realen und virtuellen Flugtagen statistisch gesehen nicht signifikant verschieden waren.

Anschließend wird der Einfluss des Variierens der Impfgeometrie auf die Maximalanzahl der Hagelpixel im Zellkern untersucht. Dazu im Folgenden die Mediane für unterschiedlichen Impfgeometrien.

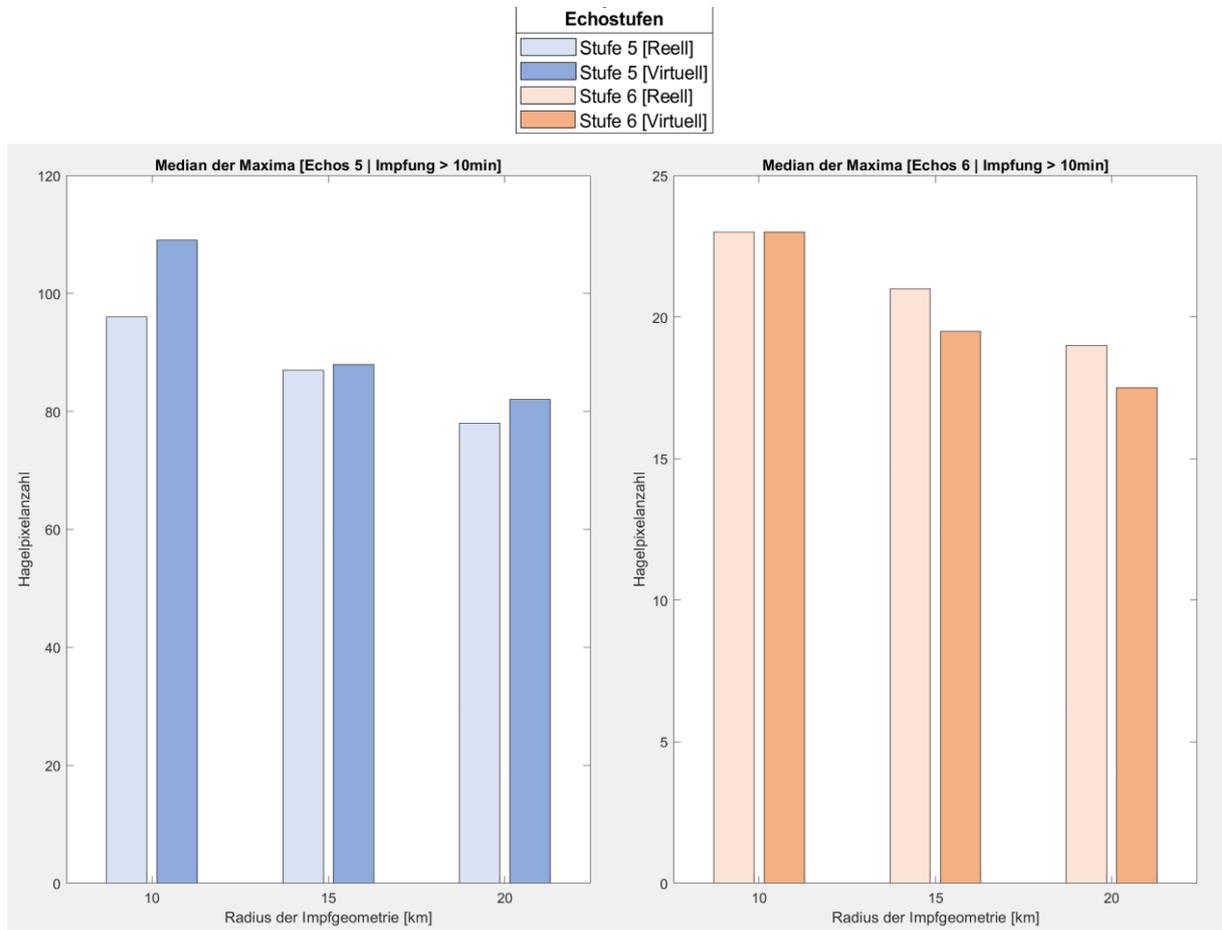


Abbildung 21 Mediane der Maximalanzahlen an Hagelpixel im Zellkern für verschiedene Impfgeometrien (Eigene Darstellung)

Bei der Wahl einer größeren Impfgeometrie sind für die Gewitterzellen der realen Flugtage erhöhte Mediane der Maximalwerte der Echostufen 6 zu erkennen. Für die Echoklasse 5 hingegen ist eine Annäherung der Mediane zu erkennen.

Eine mögliche Ursache für die Annäherung der Medianwerte bei einer größeren Impfgeometrie liegt im Einfluss von Gewitterzellen, die sich weit entfernt vom Flugzeug befinden. Diese werden aufgrund der großzügigen Impfgeometrie als geimpft betrachtet. Dadurch wird das Gewicht der nahen Zellen mit geringen Maximalwerten bei der Berechnung des Medians verringert, was letztendlich zu einem größeren Median führt.

Die statistischen Ergebnisse der Analyse der Lageunterschiede sind wie folgt:

Tabelle 11 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern bei Variieren der Impfgeometrie

Impfgeometrie	Echoklasse	Shapiro-Test P-Value	F-Test P-Value	T-Test/ Wilcoxon-Test p-Value	Effektstärke d
10km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	2,3%	0.4
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	6,4%	0.32
	Echo 6 virtuell	NV			
15km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	28%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	Nicht NV	Gleiche Varianz	95%	-
	Echo 6 virtuell	NV			
20km	Echo 5 reell	Nicht NV	Gleiche Varianz	67%	-
	Echo 5 virtuell	Nicht NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	53%	-
	Echo 6 virtuell	NV			

Eine größere Impfgeometrie führt dazu, dass der Lageunterschied zwischen den Gewitterzellen an realen und virtuell nachsimulierten Flugtagen statistisch weniger signifikant ist. Dies stärkt die Vermutung, dass der effektive Impfbereich zwischen 10 km und 15 km liegt. Obwohl es aufgrund der Mediane so erscheint, als wären die Zellen der realen Tage signifikant größer, kann dies statistisch nicht bestätigt werden. Der Grund dafür liegt in der Verteilung und der damit verbundenen großen Streuung der einzelnen Maxima der Gewitterzellen beider Gruppen. Aufgrund dieser Tatsache lässt sich kein nachweisbarer Einfluss der Hagelabwehr auf die Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern für große Impfgeometrien erkennen.

5.1.2 Ergebnisse bei der Betrachtung einer größeren Impfgeometrie

Durch die Variation der Impfgeometrie konnten Indizien über die Wirksamkeit der Impfung mittels Hagelflieger ermittelt werden. Bei der Betrachtung der Zunahme konnte ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Zellen der realen und virtuellen Flugtage nur für eine Impfgeometrie von 10 km festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass eine tatsächliche Wirkung der Impfreichweite im Bereich von 10 bis 15 Kilometern vermutet werden kann.

Es stellte sich heraus, dass die Variation der Impfgeometrie keinen merklichen Einfluss auf die Abnahmen beider Echoklassen hatte. Wie erwartet wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den realen und virtuellen Flügen festgestellt, da die Impfung nicht darauf abzielt, die Größe der Hagelkörner zu verringern.

Bei den Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern konnte für eine Impfgeometrie von 10km eine höhere Signifikanz für einen Lageunterschied der Mediane zwischen den realen und virtuellen Flügen beobachtet werden. Es wird vermutet, dass die Entscheidung für eine größere Impfgeometrie dazu führt, dass vermehrt Zellen einbezogen werden, die aufgrund des großen Abstands zum Flugzeug vermutlich nicht tatsächlich beimpft wurden. Dies hat zur Folge, dass der Median der realen Zellen nach oben verschoben wird und sich dem Median der virtuellen Flüge annähert oder sogar leicht übersteigt. Aufgrund einer größeren Verteilung konnte wie erwartet kein statistisch signifikanter Unterschied in der Lage bei einer größeren Impfgeometrie festgestellt werden.

5.2 Einfluss der Wahl einer größeren Mindestimpfdauer

Bislang wurden in der Auswertung die Zellen untersucht, welche für mindestens Zehn Minuten beimpft wurden. Da jedoch die Dauer der Impfung und damit die Menge des Silberjodids von sehr vielen Faktoren wie beispielweise der Größe der Gewitterzellen abhängig ist, werden nun die Gewitterzellen der reellen und virtuellen Flugtage für drei verschiedene Mindestimpfdauern untersucht.

Um den Einfluss des Parameters zu untersuchen, wird im Folgenden die Effektstärke für die Mindestimpfdauer der zu betrachteten Zellen bei 10 Minuten, 15 Minuten und 20 Minuten ermittelt. Der Radius der Impfgeometrie wird in allen Fällen 10 Kilometer betragen.

5.2.1 Variieren der Mindestimpfdauer

Nachliegend sind die Mediane der Zunahmen für unterschiedliche Mindestimpfdauern dargestellt.

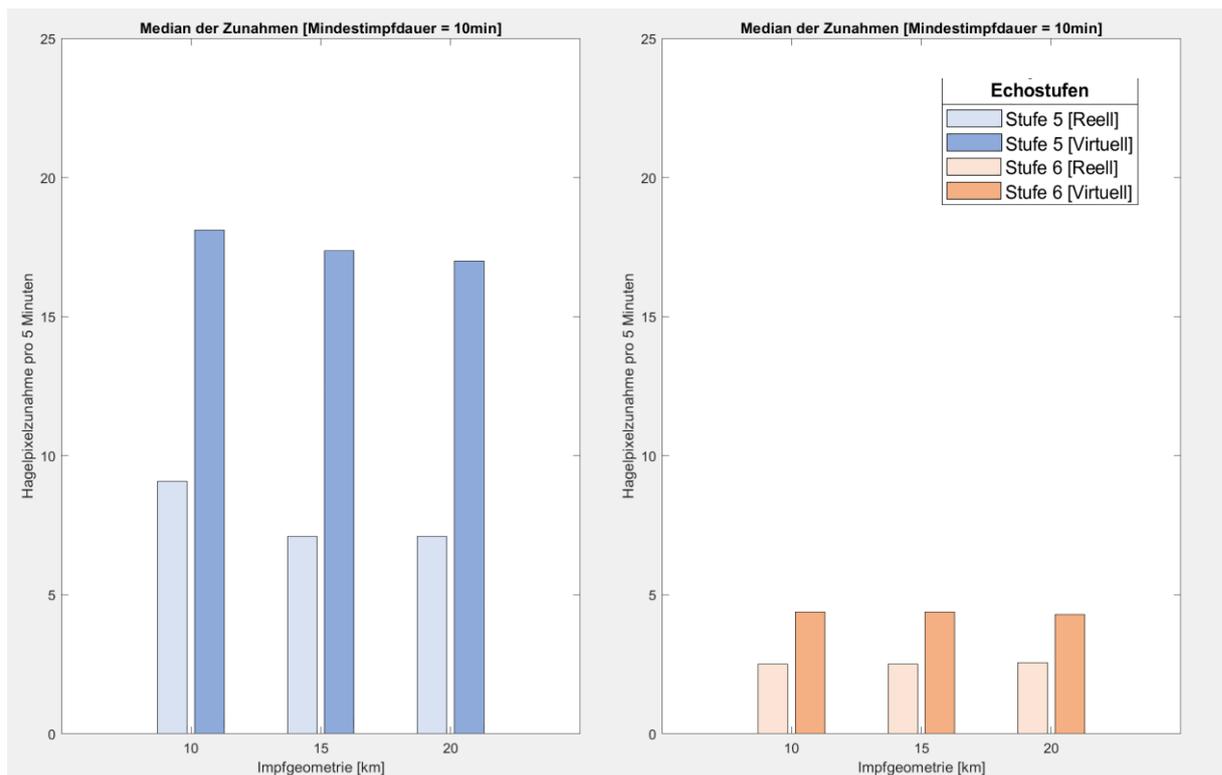


Abbildung 22 Mediane der Zunahmen für verschiedene Mindestimpfdauern (Eigene Darstellung)

Es sind keine auffälligen Unterschiede in den Verläufen der Zunahmen für verschiedene Mindestimpfdauern feststellbar. Basierend auf diesen Beobachtungen kann angenommen werden, dass eine Impfdauer von lediglich 10 Minuten ausreichend ist, um eine geringere Zunahme der Hagelpixel zu erzielen. Es ist anzunehmen, dass eine längere Impfdauer keinen weiteren positiven Einfluss auf die Zunahme der Gewitterzellen hat.

Die Ergebnisse der Lageunterschiede und der Effektstärke fasst die folgende Tabelle zusammen.

Tabelle 12 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Zunahme bei Variieren der Impfgeometrie

Impfgeometrie	Echoklasse	Shapiro-Test P-Value	F-Test P-Value	T-Test P-Value	Effektstärke d
10km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	0.3%	0.65
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	3,4%	0.37
	Echo 6 virtuell	NV			
15km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	0.2%	0.7
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	4,7%	0.36
	Echo 6 virtuell	NV			
20km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	1,2%	0.64
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	12%	0.29
	Echo 6 virtuell	NV			

Auch hier sind keine bemerkenswerten Unterschiede erkennbar. In jedem Fall ist eine mittlere Effektstärke festzustellen, ohne dabei signifikante Unterschiede für den d-Wert zu haben. Die Hypothese, dass eine Impfdauer von 10 Minuten ausreicht, um die Zunahme der Gewitterzellen zu reduzieren, sollte jedoch vorsichtig betrachtet werden. Die natürliche Zunahme hängt zudem von verschiedenen wetterabhängigen Parametern wie Temperatur und Windstärke ab.

Die Mediane der Phase der Abnahme sind wie folgt für die Wahl verschiedener Mindestimpfdauer aufgeteilt:

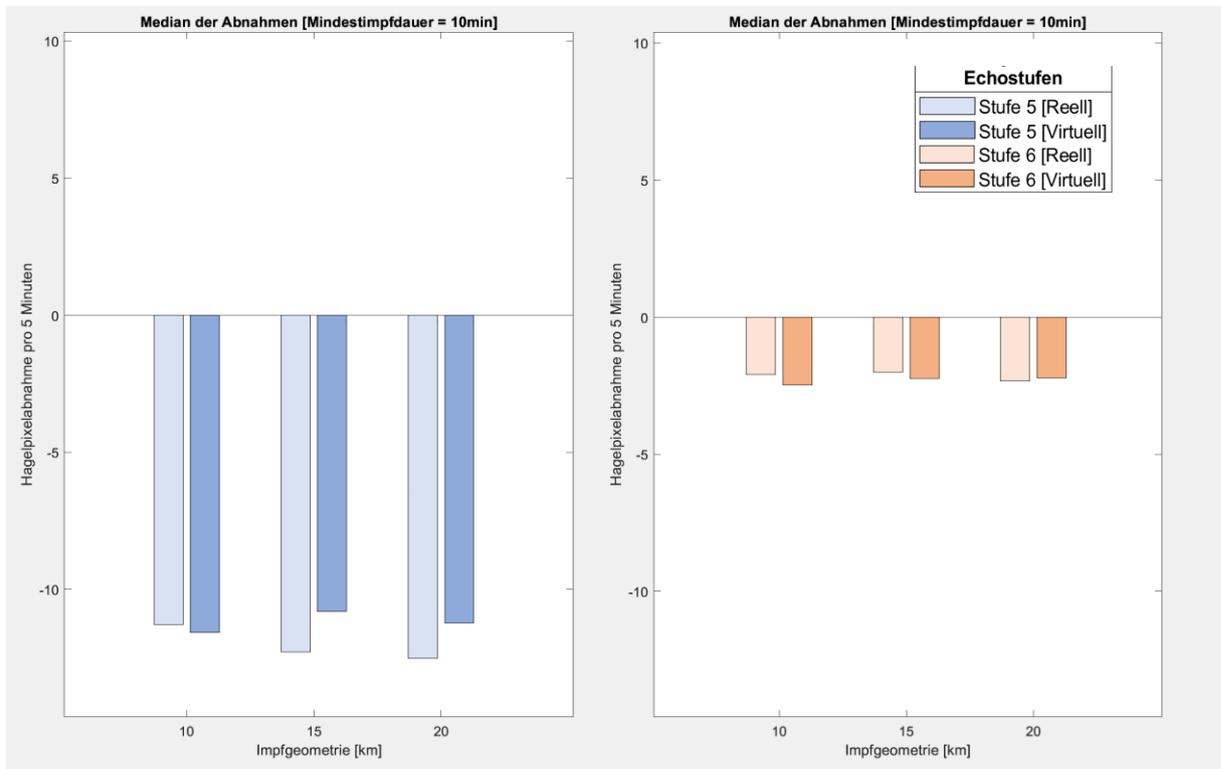


Abbildung 23 Mediane der Abnahmen für verschiedene Mindestimpfdauern (Eigene Darstellung)

Es wird angenommen, dass die Betrachtung von Zellen, die entweder für mindestens 15 Minuten oder sogar 20 Minuten beimpft wurden, keinen erkennbaren Einfluss auf die Phase der Abnahmen beider Echoklassen hat. Anhand der Mediane lässt sich vermuten, dass die Unterschiede in den Lageeigenschaften zwischen reellen und virtuellen Flügen keine statistische Signifikanz aufweisen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass wie erwartet, die Zeitspanne der Zellbeimpfung keinen Effekt auf die Rückgänge der Echoklassen 5 und 6 hat. Obwohl eine leicht erhöhte Abnahme in den Medianen der Echoklassen 6 bei den virtuellen Flügen festgestellt wird, ist dieser Unterschied so gering, dass wahrscheinlich statistische Tests keine signifikante Ungleichheit zwischen den beiden Zellproben ergeben würden. Es ist anzunehmen, dass diese Abweichungen höchstwahrscheinlich zufälliger Natur sind.

Die Auswertung der Lageunterschiede für die Abnahmen beider Echoklassen ergab folgendes Ergebnis:

Tabelle 13 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Abnahmen bei Variieren der Impfgeometrie

Impfgeometrie	Echoklasse	Shapiro-Test P-Value	F-Test P-Value	T-Test/ Wilcoxon-Test P-Value	Effektstärke d
10km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	76%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	17%	-
	Echo 6 virtuell	NV			
15km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	91%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	Nicht NV	Gleiche Varianz	57%	-
	Echo 6 virtuell	Nicht NV			
20km	Echo 5 reell	Nicht NV	Gleiche Varianz	81%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	69%	-
	Echo 6 virtuell	Nicht NV			

Wie bereits zuvor vermutet wurde, konnten bei keiner der untersuchten Fälle statistisch signifikante Unterschiede in Bezug auf den Lageunterschied zwischen realen und virtuellen Bedingungen festgestellt werden. Diese Ergebnisse bestätigen erneut die Hypothese, dass die Änderung der Mindestimpfdauer der betrachteten Zellen keinen Einfluss auf die Abnahme der Hagelpixelanzahlen im Zellkern hat.

Für die Maximalanzahlen wurden ebenfalls die Mediane für verschiedene Mindestimpfdauern grafisch untersucht.

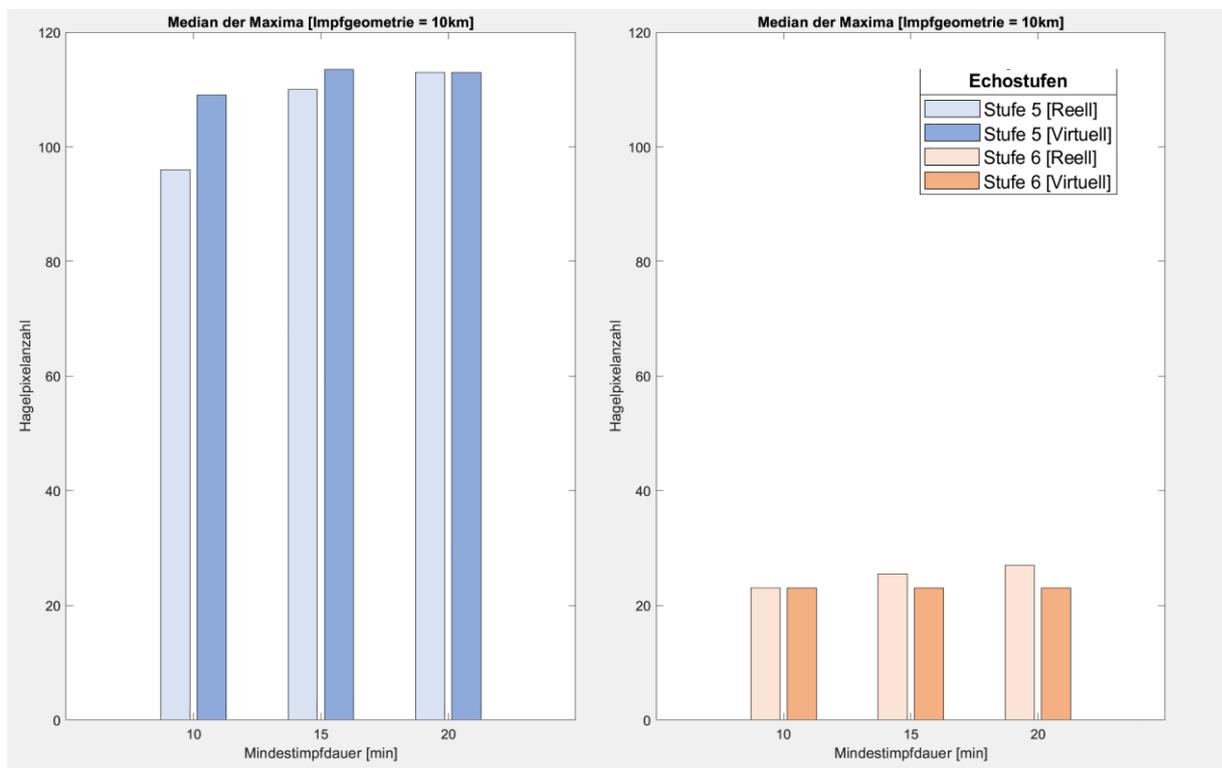


Abbildung 24 Mediane der Maximalanzahlen an Hagelpixel im Zellkern für verschiedene Mindestimpfdauern (Eigene Darstellung)

Wie erwartet zeigt sich kein Unterschied für die betrachteten Zellen der virtuellen Flugtage. Beide Echoklassen zeigen nahezu konstante Werte für verschiedene Mindestimpfdauern. Lediglich in der Echoklasse 5 ist ein minimaler Unterschied zwischen den Mindestimpfdauern von 10 Minuten und 15 Minuten erkennbar.

Bei Betrachtung der Tage, an denen tatsächlich Hagelabwehrflieger zum Einsatz kamen, zeigen sich erhöhte Mediane der Hagelpixelanzahlen bei einer längeren Mindestimpfdauer. Besonders auffällig sind die Unterschiede der Maxima zwischen einer Mindestimpfdauer von 10 Minuten und 15 Minuten für die Echoklasse 5. Es lässt sich vermuten, dass bereits nach einer Impfdauer von zehn Minuten ein Teil der Gewitterzellen geschwächt werden konnte. Für die restlichen Zellen kann angenommen werden, dass aufgrund ihrer Größe und Intensität eine weitaus längere Impfung und somit eine größere Menge an Silberjodid erforderlich ist.

Im Kapitel 5.3 werden die Anzahl und der Einfluss kurzlebiger Gewitterzellen genauer untersucht.

Um dennoch mögliche Lageunterschiede zu erkennen, werden auch hier die Proben statistisch auf Lageunterschiede untersucht:

Tabelle 14 Ergebnisse aus den Signifikanztests für die Maximalanzahlen der Hagelpixel im Zellkern bei Variieren der Mindestimpfdauer

Impfgeometrie	Echoklasse	Shapiro-Test P-Value	F-Test P-Value	T-Test/ Wilcoxon-Test P-Value	Effektstärke d
10km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	2,3%	0.4
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	6,4%	-
	Echo 6 virtuell	NV			
15km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	12%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	NV	Gleiche Varianz	77%	-
	Echo 6 virtuell	Nicht NV			
20km	Echo 5 reell	NV	Gleiche Varianz	22%	-
	Echo 5 virtuell	NV			
	Echo 6 reell	Nicht NV	Gleiche Varianz	54%	-
	Echo 6 virtuell	NV			

Die Vermutungen aus der Grafik bezüglich der Mediane werden durch die Ergebnisse der statistischen Auswertung bestätigt. Wenn eine größere Mindestimpfdauer gewählt wird, um die Zellen genauer einzuschränken, verringert sich die statistische Signifikanz (p-Wert) eines potenziellen Lageunterschieds.

5.2.2 Ergebnisse bei der Wahl einer größeren Mindestimpfdauer

Die Auswertung der Gewitterzellen für verschiedene Mindestimpfdauern ergab keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Zunahme der Hagelpixel. Es konnte angenommen werden, dass eine Impfdauer von 10 Minuten ausreichend ist, um eine geringere Zunahme der Gewitterzellen zu erzielen, und dass eine längere Impfdauer keinen weiteren positiven Einfluss hat. Die Phase der Abnahme der Echoklassen zeigte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede für unterschiedliche Mindestimpfdauern.

Darüber hinaus wurde bei der Analyse der Lageunterschiede in Bezug auf die Maximalanzahlen der Hagelpixel zwischen den reellen und virtuellen Flugtagen festgestellt, dass eine Erhöhung der Mindestimpfdauer zu einer Abnahme der Signifikanz führt. Dies deutet darauf hin, dass für einen Teil der Gewitterzellen eine Impfdauer von 10 bis 15 Minuten ausreichte, um die Bildung von großen Hagelkörnern zu verhindern. Für die restlichen Zellen ist wahrscheinlich eine weitaus längere Impfung notwendig. Diese Erkenntnis trägt dazu bei, das Verständnis der optimalen Impfdauer für die Bekämpfung von Hagelpixeln zu verbessern. Es sollte jedoch angemerkt werden, dass keine weiteren signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Mindestimpfdauern beobachtet wurden.

5.3 Einfluss kurz auftretender Echostufen: Eine vertiefte Betrachtung

Da die Lebensdauer der Echostufe 6 in verschiedenen Zellen stark variieren kann, wird untersucht, wie viele Zellen herausgefiltert werden, wenn die Mindestlebensdauer der Echostufe 6 erhöht wird. Dadurch kann erkannt werden, ob an realen Flugtagen vermehrt Zellen auftreten, die nur für eine kurze Zeit Hagelpixel der Stufe 6 aufweisen. Zusätzlich wurde auch die Anzahl der Zellen untersucht, die zum Zeitpunkt des Maximums nur sehr wenige Hagelpixel enthalten. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der gefilterten Zellen abhängig von der Mindestlebensdauer der Echostufe 6 und der Mindestanzahl an Hagelpixel zum Zeitpunkt des Maximums.

Tabelle 15 Anzahl der herausgefilterter Gewitterzellen bei Erhöhung der Mindestlebensdauer der Echostufe 6 und Erhöhung der Mindestanzahl an Hagelpixel im Zellkern

Echo 6 reell		Mindest Lebensdauerzyklus			
		10min	15min	20min	25min
Mindest Anzahl der Hagelpixel	1	4	4	7	12
	2	8	8	9	13
	3	8	8	9	13
	4	8	8	9	13
	5	9	9	10	13
	6	12	12	13	14
	7	13	13	13	14
	8	15	15	15	16

Echo 6 virtuell		Mindest Lebensdauerzyklus			
		10min	15min	20min	25min
Mindest Anzahl der Hagelpixel	1	2	3	4	5
	2	2	3	4	5
	3	2	3	4	5
	4	2	3	4	5
	5	3	3	4	5
	6	3	3	4	5
	7	3	3	4	5
	8	5	5	5	6

Wenn die Mindestlebensdauer zur Eingrenzung der zu betrachtenden Gewitterzellen erhöht wird, fällt auf, dass die Anzahl der herausgefilterten Zellen mit zunehmender Mindestlebensdauer steigt. Insbesondere für die Zellen an realen Flugtagen ist die Anzahl der gefilterten Tage höher als die bei virtuellen Flugtagen. Dies lässt vermuten, dass die Hagelabwehr dazu beiträgt, die Entwicklung von sehr schweren Echos der Stufe 6 zu hemmen und somit die Bildung einer bedrohlichen Zelle zu verhindern.

Darüber hinaus zeigt sich bei Erhöhung der Mindestanzahl an Hagelpixeln zum Zeitpunkt des Maximums, dass vermehrt Gewitterzellen der realen Flugtage herausgefiltert werden. Dies lässt ebenfalls vermuten, dass die Hagelabwehr die Bildung von intensiven Echoklassen und damit schweren Hagelkörnern verhindert hat.

Die nachstehende Tabelle stellt die jeweiligen P-Werte aus dem T-Test oder Wilcoxon-Rang-Test für die verschiedenen Mindestlebensdauer der Echostufe 6 und Mindestanzahlen an Hagelpixel zum Zeitpunkt des Maximums dar.

Tabelle 16 P-Werte der Signifikanztests bei Erhöhung der Mindestlebensdauer der Echostufe 6 und Erhöhung der Mindestanzahl an Hagelpixel im Zellkern

EchoStufe 6		Mindestzeitspanne der Echostufe 6 im Zellkern			
		10min	15min	20min	25min
geringster Maximalwert der Anzahl der Hagelpixel	0	0.06991	0.0973	0.2044	0.2541
	1	0.06961	0.0973	0.2044	0.2541
	2	0.1052	0.0973	0.2044	0.2541
	3	0.1052	0.0973	0.2044	0.2541
	4	0.1052	0.0973	0.2044	0.2541
	5	0.1402	0.1317	0.2044	0.3246
	6	0.29	0.2842	0.2645	0.3246
	7	0.3536	0.2842	0.2645	0.8685
	8	0.3334	0.3334	0.3118	0.8685

In den meisten Fällen lässt sich für die P-Werte von links nach rechts eine Zunahme feststellen. Dies deutet darauf hin, dass die Signifikanz eines potenziellen Lageunterschieds zwischen Gewitterzellen an realen und virtuellen Flugtagen abnimmt. Es kann daher vermutet werden, dass die Zugabe der Silberjodid-Aceton-Lösung dazu führt, dass vermehrt Gewitterzellen an realen Flugtagen über eine kürzere Zeit Hagelpixel der Echoklasse 6 im Zellkern aufweisen.

Betrachtet man die Signifikanz in der Tabelle von oben nach unten, lässt sich ebenfalls eine Zunahme feststellen. Somit konnte festgestellt werden, dass die Signifikanz des Lageunterschieds abnimmt, wenn die Mindestanzahl der Hagelpixel zum Zeitpunkt des Maximums erhöht wird.

Daraus lässt sich vermuten, dass an zunehmend realen Flugtagen Gewitterzellen vorhanden sind, die zum Zeitpunkt des Maximums nur wenige Hagelpixel der Echoklasse 6 aufweisen. Dies könnte ein Indiz für die Wirksamkeit der Hagelabwehr sein.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und es werden potenzielle Ansätze zur Verbesserung der Methodik aufgezeigt.

6.1 Zusammenfassung und Fazit

Um die Effektivität der Hagelabwehrmethode zu bewerten, wurden vergangene Gewitterzellen an Tagen, an denen tatsächlich geflogen wurde, mit Gewitterzellen an Tagen verglichen, an denen keine Hagelabwehrmethode angewendet wurde. Hierfür wurde eine Simulation des Flugwegs für Tage durchgeführt, an denen Gewitter auftraten, aber keine Hagelabwehrmaßnahmen eingesetzt wurden. Dies wurde mithilfe des entwickelten Programms "VirtualFlighCreator" realisiert, um anschließend die Anzahl der Hagelpixel in den Zellkernen der Echoklassen 5 und 6 miteinander zu vergleichen. Der Zeitpunkt des Beginns und des Endes der Impfung wurde durch den Ein- und Austritt der Gewitterzelle in eine definierte Impfgeometrie, die einer Kugel um das Flugzeug entspricht, festgelegt. Es wurde untersucht, wie stark die Anzahl der Hagelpixel bis zum Zeitpunkt des maximalen Auftretens zunimmt und wie die Abnahme von diesem Zeitpunkt bis zur Auflösung der Gewitterzelle erfolgt. Außerdem wurde der Median der maximalen Anzahl der Gewitterzellen untersucht.

Bei der Betrachtung der Gewitterzellen, die mindestens 10 Minuten lang beimpft wurden und bei denen ein Impfradius von 10 km gewählt wurde, konnte festgestellt werden, dass die Steigung der Gewitterzellen an virtuellen Flugtagen signifikant höher ist als die an realen Flugtagen. Die Effektstärken betragen dabei 0,45 für Echoklasse 5 und 0,64 für Echoklasse 6. Für die Abnahmephase konnte wie erwartet kein Unterschied festgestellt werden. Der Unterschied in den maximalen Anzahlen der Hagelpixel erreichte eine Signifikanz von 2 % für Echoklasse 5 und 6 % für Echoklasse 6. Dies deutet darauf hin, dass die Maxima der Gewitterzellen an virtuellen Flugtagen tendenziell größer sind als die an realen Flugtagen. Für beide Echoklassen konnte eine leichte bis mittlere Effektstärke ermittelt werden.

(Echo5: $d = 0,4$, Echo6: $d = 0,36$)

Anschließend wurde bei Variation der Impfgeometrie für 15 km und 20 km festgestellt, dass mit zunehmender Impfgeometrie der signifikante Lageunterschied der Steigung der Zunahme geringer wurde. Es konnte kein statistisch signifikanter Unterschied in der Steigung der Abnahme bei größerer Impfgeometrie zwischen den Gewitterzellen, die an realen und virtuellen Flugtagen auftraten, festgestellt werden. Es konnte auch kein Unterschied in der Anzahl der Hagelpixel zum Zeitpunkt des Maximums erkannt werden. Daraus lässt sich schließen, dass die vermutlich wirksame Impfreichweite zwischen 10 km und 15 km liegt.

In Bezug auf die Begrenzung der Gewitterzellen auf solche, die mindestens 15 Minuten oder sogar 20 Minuten lang beimpft wurden, wurde festgestellt, dass die Signifikanz der Zunahme und der maximalen Anzahlen mit zunehmender Begrenzung leicht abnahm. Dies legt nahe, dass an realen Flugtagen vermehrt kurzlebige Echoverläufe auftreten. Diese Vermutung wurde am Ende noch einmal bestätigt, indem erkannt wurde, dass an realen Flugtagen vermehrt Gewitterzellen mit kurzen Verläufen der Echoklasse 6 auftreten und dass vermehrt maximale Anzahlen kleiner oder gleich 8 vorhanden sind.

6.2 Ausblick

Durch den Vergleich vergangener Gewitterzellen an tatsächlichen und virtuell nachsimulierten Flugtagen konnte ein umfangreiches Maß für die Effektivität der Hagelabwehr mittels Einbringung von Silberjodid durch Flugzeuge ermittelt werden. Die Analyse der Daten aus dem KONRAD-System, das vom Deutschen Wetterdienst erstellt wurde, liefert wertvolle Informationen nicht nur über die Intensität von Gewitterwolken, sondern auch über deren Zugrichtung. Neben der Anzahl von Hagelpixeln im Zellkern werden in den KONRAD-Daten auch umfassende Hinweise auf möglichen Hagel, Starkregen und Windböen bereitgestellt. Als Teil der fortlaufenden Verbesserungen plant der DWD die Entwicklung des hochmodernen KONRAD3D-Systems, das Messungen aus verschiedenen Höhen berücksichtigen wird, um eine noch präzisere Analyse der Gewitterzellintensität zu ermöglichen.

Um eine noch präzisere Auswertung der Gewitterverläufe zu gewährleisten, wird empfohlen, die Intensitätsstufen der Radarechodaten weiter zu verfeinern. Für den Wirkungsbereich der Wolkenimpfung wurde eine variable Impfgeometrie definiert, bei der eine potenzielle tatsächliche Wirkreichweite zwischen 10 km und 15 km ermittelt wurde. Da die Verteilung der Silberjodidpartikel von verschiedenen Faktoren wie Fluggeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit beeinflusst wird, ist es von entscheidender Bedeutung, eine Methodik zu entwickeln, um die Partikelverteilung besser zu verstehen und somit genauere Rückschlüsse auf die Impfreichweite ziehen zu können. Bei Impfzeiten von über zehn Minuten konnte kein weiterer signifikanter Einfluss der Hagelabwehr auf die Intensität der Gewitterzellen festgestellt werden. Es kann daher angenommen werden, dass eine Impfungsdauer von etwa 10 Minuten für die meisten Gewitterzellen ausreichend ist, um die Intensität zu mindern, und dass eine längere Impfung keinen zusätzlichen Effekt erzielt. Allerdings bedarf es weiterer Untersuchungen, um die genaue erforderliche Impfdauer sowie die entsprechende Menge an Silberjodid zu bestimmen, um optimale Ergebnisse zu erzielen und die Wirksamkeit der Hagelabwehr weiter zu verbessern.

IV Literaturverzeichnis

- Duller, C. (2008). *Einstichprobenprobleme - Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R* (S. 107–149). Physica-Verlag HD.
- Eick, C.-C. (2021, Oktober 15). *Unwetter in Bayern: Versicherer melden drastische Schadenssumme – „Das ist schon eine Hausnummer“*. Merkur.de.
<https://www.merkur.de/lokales/wolfratshausen/wolfratshausen-bayern-unwetter-schaden-summe-150-millionen-euro-autos-beschaedigt-kfz-versicherer-zr-91051185.html>
- Federer, B. (1986). *Main Results of Grossversuch IV*. havos.ch.
https://www.havos.ch/fileadmin/havos/40-hagelabwehr/30_wissenschaft/Studie_Main_Results_of_Grossversuch_IV.pdf
- Fröhlich Michael, A. P. (2009). *Cohen's Effektstärken als Mass der Bewertung von praktischer Relevanz – Implikationen für die Praxis*.
https://www.researchgate.net/publication/233894409_Cohen's_Effektstarken_als_Mas_s_der_Bewertung_von_praktischer_Relevanz_-_Implikationen_fur_die_Praxis
- Hagelabwehr Rosenheim - Crew*. (o. J.). Hagelabwehr-rosenheim.de
<https://www.hagelabwehr-rosenheim.de/crew.php>
- Hagelabwehr Rosenheim - Einsatzgebiet*. (o. J.). Hagelabwehr-rosenheim.de
<https://www.hagelabwehr-rosenheim.de/einsatzgebiet.php>
- Hagelabwehr Rosenheim - Flugzeuge*. (o. J.). Hagelabwehr-rosenheim.de.
<https://www.hagelabwehr-rosenheim.de/flugzeuge.php>
- Hagelabwehr Rosenheim – Geschichtliches*. (o. J.). Hagelabwehr-rosenheim.de
<https://www.hagelabwehr-rosenheim.de/Geschichtliches.php>
- Hagelnavigator RO-BERTA für ein Hagelabwehrflugzeug in Kombination mit einem Niederschlagsmeldesystem für Süd-Oberbayern*. (2021, August 23). Crisis-prevention.de. <https://crisis-prevention.de/katastrophenschutz/hagelnavigator-ro-berta-fuer-ein-hagelabwehrflugzeug.html>

Konvektive Entwicklung (KONRAD). (o. J.). Dwd.de

https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/met_fachverfahren/nowcasting/konrad_node.html

Lothar Sachs, J. H. (2006). *Angewandte Statistik, Methodensammlung mit R*. Springer Berlin Heidelberg.

Neue Generatoren für die Hagelflieger. (2016, Januar 7). Merkur.de.

<https://www.merkur.de/lokales/region-miesbach/neue-generatoren-rosenheimer-hagelflieger-6013745.html>

Pachatz, G. C. (10.2005). *Analyse der Effizienz der Hagelabwehr in der Steiermark anhand von Fallbeispielen*. Uni-graz.at. <https://wegcwww.uni-graz.at/publ/wegcreports/2005/WCV-WissBer-No03-GPachatz-Okt2005.pdf>

Peter Lang, Otto Plörer, Herbert Munier, Johann Riedl. (2003). *KONRAD*

Konvektionsentwicklung in Radarprodukte - ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten.

Dwd.de.

https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/222_pdf.html

Pruscha, H. (2006). *Statistisches Methodenbuch*. Springer Berlin Heidelberg.

Bernatzky A. (2018). *Untersuchung des Einflusses der Hagelabwehr auf Hagelschäden und meteorologische Daten im Landkreis Rosenheim*.

https://www.th-rosenheim.de/fileadmin/fakultaeten/ing/Bilder/02_Labore/Mess-_und_Regelungstechnik/Abschlussarbeiten/Untersuchung_des_Einflusses_der_Hagelabwehr_auf_Hagelschaeden_und_meteorologische_Daten_im_Landkreis_Rosenheim.pdf

Schmid, M. (2020, August 28). *Hagel und seine Entstehung*. Dwd.de.

https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2020/8/28.html

Technische Hochschule Rosenheim [@TechnischeHochschuleRosenheim]. (2021, Februar 24). *Hagel wirksam bekämpfen - das Projekt RO-BERTA*. Youtube.

<https://www.youtube.com/watch?v=X5X5rPhDXqM>

Westphal, U. (2003, August 28). *Sie fliegen gegen den Hagel*. Hamburger Abendblatt.

<https://www.abendblatt.de/ratgeber/wissen/article106708277/Sie-fliegen-gegen-den-Hagel.html>

Yazar, S. (2017). *Studienarbeit Literaturrecherche zur Wirkungsweise der Hagelabwehr mit Silberjodid-(AgI) Generatoren*. Hochschule Furtwangen.

V Anhang

Matlab Programme und Zelldaten

App VirtuaFlightCreator	A\Matlab\VirtualFlightCreator.mat
App FindHaildays	A\Matlab\FindHailday.mat
Auswertung Zu und Abnahmen	A\Matlab\Zu_Abnahme_10min_10km.mat
Zu-/Abnahme (Impfgeometrien variabel)	A\Matlab\Verlauf_Impfgeometrie.mat
Zu-/Abnahme (Mindestimpfdauer variabel)	A\Matlab\Verlauf_Mindestimpfdauer.mat
Auswertung Maxima	A\Matlab\Maxima_Hagelpixel.mat
Maxima (Impfgeometrie variabel)	A\Matlab\Maxima_Impfgeometrie.mat
Maxima (Mindestimpfdauer variabel)	A\Matlab\Maxima_Mindestimpfdauer.mat
Ermittlung geimpfter Gewitterzellen	A\Matlab\Run_Supercell.mat
Hagelpixelverläufe der beimpften Zellen	A\Zelldaten

Alle betrachteten reellen Zellen (Impfgeometrie 20 km, Mindestimpfdauer 5 min)

ID	timeMean				
		360	21.07.2006	518	03.07.2009
2031	16.06.2006	1899	31.07.2006	113	30.06.2010
2077	16.06.2006	375	24.08.2006	20	16.07.2010
2103	16.06.2006	458	24.08.2006	13	21.07.2010
2112	16.06.2006	474	24.08.2006	18	22.07.2010
2150	16.06.2006	528	24.08.2006	89	22.07.2010
2168	16.06.2006	628	24.08.2006	99	22.07.2010
2204	16.06.2006	1128	27.05.2007	2	26.05.2011
382	25.06.2006	1185	27.05.2007	684	09.06.2013
2248	27.06.2006	1228	27.05.2007	714	09.06.2013
2249	27.06.2006	228	20.06.2007	736	09.06.2013
2302	27.06.2006	195	25.06.2007	786	09.06.2013
742	12.07.2006	278	25.06.2007	821	09.06.2013
815	12.07.2006	554	25.06.2007	831	09.06.2013
892	12.07.2006	350	20.07.2007	51	02.07.2013
979	12.07.2006	369	20.07.2007	281	24.07.2013
1014	12.07.2006	432	20.07.2007	479	24.07.2013
2935	14.07.2006	439	20.07.2007	536	24.07.2013
2942	14.07.2006	451	20.07.2007	865	06.08.2013
2985	14.07.2006	457	20.07.2007	31	02.08.2014
3008	14.07.2006	943	22.05.2009	60	02.08.2014
3031	14.07.2006	1016	22.05.2009	1566	03.08.2014
3050	14.07.2006	1019	22.05.2009	52	13.05.2015
3082	14.07.2006	205	03.07.2009	91	13.05.2015
355	21.07.2006	433	03.07.2009	165	13.05.2015
82	01.06.2015	1504	26.07.2016	279	08.06.2018
88	01.06.2015	1672	26.07.2016	293	08.06.2018
6	14.06.2015	2965	27.07.2016	300	08.06.2018
20	27.06.2015	3018	27.07.2016	3008	10.06.2018
16	11.07.2015	244	14.05.2017	208	11.06.2018
20	11.07.2015	324	14.05.2017	408	11.06.2018
23	11.07.2015	473	19.05.2017	431	11.06.2018
27	11.07.2015	496	19.05.2017	142	17.06.2018
39	19.07.2015	1178	30.05.2017	207	21.06.2018
149	27.05.2016	1268	30.05.2017	985	05.07.2018
147	28.05.2016	27	05.06.2017	1058	05.07.2018
663	29.05.2016	47	27.06.2017	483	15.07.2018
683	29.05.2016	92	27.06.2017	165	28.07.2018
698	29.05.2016	141	27.06.2017	171	13.08.2018
709	29.05.2016	164	27.06.2017	225	13.08.2018
754	17.06.2016	778	07.07.2017	359	23.08.2018
2658	25.06.2016	1863	09.07.2017	396	23.08.2018
2824	25.06.2016	43	06.06.2018	402	23.08.2018
2865	25.06.2016	56	06.06.2018	417	23.08.2018

2972	25.06.2016	78	06.06.2018	443	23.08.2018
178	02.07.2016	148	06.06.2018	356	01.08.2020
51	11.07.2016	204	06.06.2018	1524	09.06.2021
674	21.07.2016	1087	07.06.2018	883	22.06.2021
1594	22.07.2016	113	08.06.2018	899	22.06.2021
1271	23.07.2016	163	08.06.2018	980	24.06.2021
1047	24.06.2021				
1085	24.06.2021				
1152	24.06.2021				
1229	24.06.2021				

Alle betrachteten virtuellen Zellen (Impfgeometrie 20 km, Mindestimpfdauer 5 min)

ID	timeMean	3698	05.08.2014	117	01.07.2019
87	21.07.2007	3708	05.08.2014	130	01.07.2019
3	20.07.2008	3750	05.08.2014	158	01.07.2019
30	08.08.2010	224	19.09.2014	331	01.07.2019
1113	05.06.2011	260	19.09.2014	400	01.07.2019
1289	05.06.2011	52	13.05.2015	401	01.07.2019
1365	05.06.2011	91	13.05.2015	25	20.07.2019
30	16.06.2011	165	13.05.2015	14	24.08.2019
22	19.08.2011	388	07.07.2015	16	24.08.2019
164	12.06.2014	470	07.07.2015	30	09.05.2020
181	12.06.2014	130	08.07.2015	53	13.06.2020
186	12.06.2014	144	04.06.2016	8	15.07.2020
189	12.06.2014	240	04.06.2016	27	15.08.2020
191	12.06.2014	44	12.05.2018	2192	18.08.2020
2646	12.06.2014	51	12.05.2018	2222	18.08.2020
180	14.07.2014	69	12.05.2018	2232	18.08.2020
188	14.07.2014	72	14.07.2018	2251	18.08.2020
189	14.07.2014	102	14.07.2018	2702	18.08.2020
199	14.07.2014	699	09.08.2018	2768	18.08.2020
216	14.07.2014	700	09.08.2018	725	10.06.2021
217	14.07.2014	13	10.06.2019	743	10.06.2021
220	14.07.2014	329	15.06.2019	747	10.06.2021
3336	04.08.2014	349	15.06.2019	103	21.06.2021
3341	04.08.2014	282	22.06.2019	364	21.06.2021
3362	04.08.2014	80	01.07.2019	365	21.06.2021
379	21.06.2021	3669	28.07.2021		
104	24.07.2021	3686	28.07.2021		
505	24.07.2021	129	02.08.2021		
528	24.07.2021	32	22.08.2021		
576	24.07.2021	21	16.05.2022		
629	24.07.2021	15	16.06.2022		
660	24.07.2021				