

Entwicklung eines Modells zur Simulation von postfrontalen Niederschlagsgebieten

Von der Fakultät für Mathematik und Physik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Met. Stephan Himmelsbach
geboren am 24.06.1983, in Hannover

2015

Referent: Prof. Dr. Thomas Hauf

Korreferent: Prof. Dr. Dieter Etling

Tag der Promotion: 18.06.2015

Kurzzusammenfassung

Postfrontale Niederschlagsgebiete setzen sich aus vielen unterschiedlichen Schauerzellen zusammen. Auf den ersten Blick wirkt die Struktur dieser Niederschlagsgebiete auf Niederschlagsradarbildern und Satellitenbildern chaotisch. Frühere Untersuchungen haben durch Tracking von einzelnen konvektiven Zellen und Analysen von kompletten postfrontalen Niederschlagsgebieten jedoch gezeigt, dass die Charakteristika dieser Niederschlagsgebiete analytisch sowohl im Mittel als auch durch Verteilungen in räumlicher und zeitlicher Hinsicht beschrieben werden können. Zu den untersuchten Charakteristika zählen u.a. Zellgrößen- und Lebensdauerverteilungen als auch Übergangswahrscheinlichkeiten der Reflektivitätsmaxima von Zelle.

Bei der räumlichen und zeitlichen Simulation von postfrontalen Niederschlagsgebieten wird für gewöhnlich auf numerische Wettervorhersagemodelle zurückgegriffen, welche bei entsprechender Gitterweite die konvektive Niederschlagsstruktur auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen simulieren können. Die Charakteristika dieser postfrontalen Niederschlagsstruktur kann gleichzeitig durch die oben genannte analytische Beschreibung wiedergegeben werden. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass ein alternativer Ansatz für die Simulation des postfrontalen Niederschlagsgebiets möglich ist, welcher nur auf der analytischen Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Charakteristika postfrontaler Niederschlagsgebiete sowie statistischer Werte beruht. Dazu wird die räumliche und zeitliche Beschreibung der Charakteristika aus vorangegangenen Forschungen aufgegriffen und anschließend in ein Schauermodell zur Simulation eines postfrontalen Niederschlagsfeldes überführt. Darüber hinaus findet im Schauermodell eine Integration von Merging- und Splittingprozessen von Niederschlagszellen statt. Das Schauermodell stellt ein Hybridmodell dar, da ein statistischer Ansatz zur Beschreibung der Charakteristika des Niederschlagsfeldes verwendet und gleichzeitig eine individuelle Zellentwicklung inklusive einer räumlichen Zellverlagerung umgesetzt wird. Es soll allerdings nicht den Zweck eines Nowcasting- oder Wettervorhersagemodells erfüllen.

Schlagnworte: Konvektive Zellen, Simulation, Niederschlagsstruktur

Abstract

Post-frontal precipitation structures consist of several different shower cells. At first glance, the structure of rainfall areas seems to be chaotic on precipitation radar and satellite images. Previous research is based on tracking of individual convective cells and analysis of the entire post-frontal precipitation areas. It shows that the spatial and temporal characteristics of these rainfall areas can be described analytically by means and distributions. Despite this research there exist only models for simulating single aspects of a post-frontal precipitation area. Parts of the investigated characteristics are, for example, cell size and lifetime distributions as well as transition probabilities of reflectivity maxima of cells. Usually numerical weather prediction models are used for the spatial and temporal simulation of post-frontal precipitation areas which are based on the Navier-Stokes equations. The characteristic of this post-frontal precipitation structure can be simultaneously represented by the analytical description mentioned above. The work presented here shows that an alternative approach for the simulation of post-frontal precipitation areas is possible. The approach based only on the analytical description of the spatial and temporal characteristics of post-frontal precipitation areas as well as statistical values. For this purpose, the spatial and temporal characteristics of showers from previous research are transferred to a shower model for simulating a post-frontal precipitation area. In addition, the merging and splitting of precipitation cells is integrated in the model. The shower model can be described as a hybrid model because it uses a statistical approach for simulating the precipitation area characteristics and an individual cell evolution at once. An operation as nowcasting or numerical weather prediction model is not possible.

Keywords: convective cells, simulation, precipitation structure

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Postfrontale Schauer	1
1.2 Modelle zur Simulation von Niederschlagsgebieten	8
1.2.1 COSMO-DE	9
1.2.2 HYCELL	10
1.2.3 MultiEXCELL	11
1.2.4 GANDOLF	11
1.2.5 Hydrologische Niederschlagsmodelle	12
1.3 Stand der Forschung und Zielsetzung	13
2 Charakteristika postfrontaler Niederschlagsgebiete	18
2.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer	20
2.2 Tagesgang der postfrontalen Niederschlagsfläche	21
2.3 Clustergrößenverteilungen	22
2.4 Übergangsmatrix	23
2.5 Lebensdauerverteilung	26
3 Modellbeschreibung	28
3.1 Modellspezifikationen	28
3.2 Übergangsmatrix als Modellinput	31
3.3 Zeitliche Simulation	39
3.3.1 Zellenentwicklung	41
3.3.2 Mergingerkennung	42
3.3.3 Merging	44
3.3.4 Splitting	47
3.3.5 Berechnung der Übergangsmatrix	49
3.3.6 Generierung von Zellen	50
3.3.7 Modellinitialisierung	56
3.3.8 Modelloutput	57
3.3.9 Externe Unterprogramme	57

4	Modellüberprüfung	58
4.1	Geometrische Struktur	58
4.1.1	Relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer	58
4.1.2	Clustergrößenverteilung	63
4.1.3	Lebensdauerverteilung	65
4.1.4	Übergangsmatrix	66
4.1.5	Niederschlagsmenge und Niederschlagszeit	69
4.2	Zeitliche Struktur	73
4.2.1	Mittlerer Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche	73
4.2.2	Tagesgang der Zellenanzahl und der Niederschlagsfläche	85
5	Anwendung und Ausblick	88
5.1	Anwendung	88
5.1.1	Luftfahrt	88
5.1.2	Niederschlagsabfluss	90
5.1.3	Ausbreitung von EM-Wellen	91
5.2	Ausblick	91
6	Zusammenfassung	95
	Abbildungsverzeichnis	102
	Literaturverzeichnis	105

Abkürzungsverzeichnis

Cb	Cumulonimbus
COSMO	Consortium for Small Scale Modelling
DIVMET	DIVert METeorology
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetterdienst
FFT	Fast Fourier Transformation
GANDOLF	Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land-based Flood forecasts
ID	Identifikationsnummer
ID	Interactive Data Language
IMuK-LUH	Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover
LUH	Leibniz Universität Hannover
Met Office	Nationaler britischer Wetterdienst
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
PND	Relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer (Peak Number Distribution)
PRMS	Precipitation-Runoff Modeling System
UTC	Coordinated Universal Time
VFR	Sichtflugregeln (Visual Flight Rules)
WRF	Weather Research and Forecasting Modell

1 Einleitung

1.1 Postfrontale Schauer

Wenn kalte Luftmassen über einen warmen Untergrund strömen, kommt es zur Erwärmung der darüber liegenden Luftmassen. Die daraus resultierenden horizontalen und vertikalen Dichteunterschiede stellen eine Labilisierung der Luftschichten dar. Die sich daraus in Kombination mit dem Gravitationsfeld der Erde ergebene Ausgleichszirkulation wird Konvektion genannt und führt großflächig gesehen zu einem vertikalen Energieaustausch. Abhängig davon, ob es beim Aufsteigen der Luftmassen zur Kondensation des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes kommt, wird zwischen trockener und feuchter Konvektion unterschieden. In Abhängigkeit von der Schichtung der Atmosphäre, dem Energiefluss von der Erdoberfläche in die darüber befindlichen Luftmassen und des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes kommt es zur Bildung von Wolken mit unterschiedlicher vertikaler Erstreckung und auch zu unterschiedlichen Wolkenstrukturen. Wolken, welche sich in einer konvektiven Schicht mit vertikalen Erstreckung von ca. 1 km bis 2 km (Atmosphärische Grenzschicht) bilden, gehören nach ATKINSON und ZHANG (1996) zur mesoskaligen flachen Konvektion und können eine horizontale Erstreckung von einigen Kilometern erreichen. Von oben betrachtet können die Wolken eine lineare oder hexagonale Zellstruktur aufweisen. Im ersten Fall handelt es sich um Wolkenbänder bestehend aus Stratocumuli (siehe Abbildung 1.1 (a)) welche sich durch einen Kaltluftausbruch bilden können (ATKINSON und ZHANG 1996; YOUNG *et al.* 2002). Ihrem Erscheinungsbild nach werden sie auch als Wolkenstraßen bezeichnet. Im Fall der hexagonalen Zellstruktur sind offene und geschlossene Zellzirkulationen möglich (siehe Abbildung 1.1 (b)), welche durch eine aufwärts gerichtete Strömung und Wolkenbildung im Zellinneren bzw. durch den umgekehrten Fall der abwärts gerichteten Strömung und Wolkenlosigkeit charakterisiert werden können. Offene Zellen bilden sich laut AGEE *et al.* (1973) und ROSENFELD *et al.* (2006) wenn die Konvektion hauptsächlich durch eine wärmere Erdoberfläche angetrieben wird und geschlossene Zellen wenn der Antrieb der Konvektion größtenteils auf eine Abkühlung der Wolkenobergrenze durch Ausstrahlung zurückzuführen ist. Die zellartige Struk-

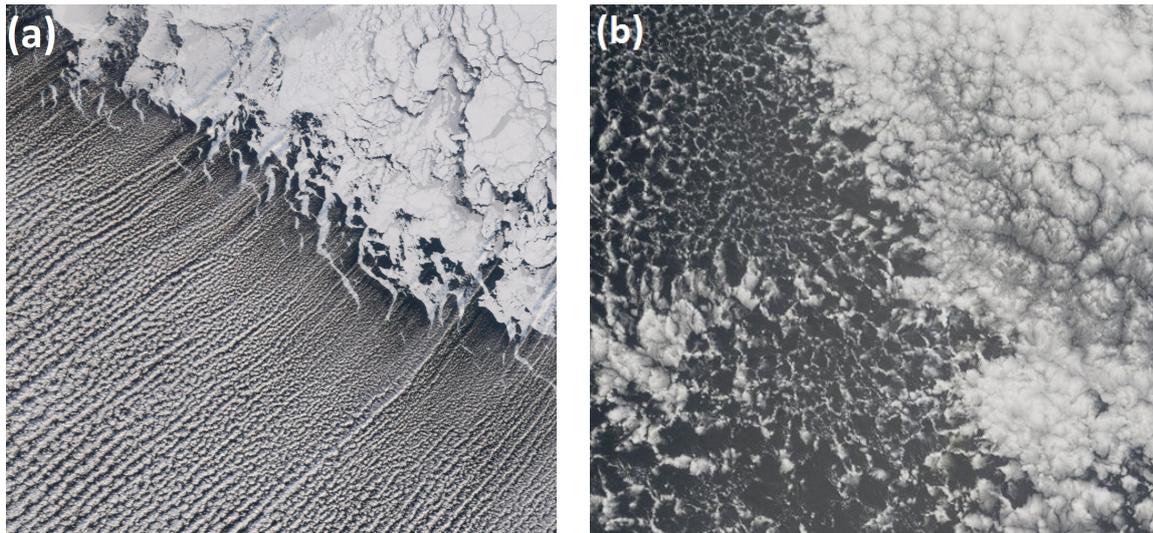


Abbildung 1.1: Satellitenbild von Wolkenstraßen (a) vor der Küste von St. Matthew Island in der Beringsee (20. Jan. 2006), welche in der seewärts gerichteten Luftströmung in der atmosphärischen Grenzschicht entstanden sind. Abbildung (b) zeigt ein Satellitenbild einer offenen (links) und geschlossenen (rechts) Zellstruktur vor der südamerikanischen Westküste (30. Sept. 2005). Quelle: NASA

tur kann auch mit der Rayleigh-Benard-Zirkulation in Verbindung gebracht werden (ROSENFELD *et al.* 2006). Das Auftreten von linearen oder zellartigen Wolkenstrukturen ist dabei nach ATKINSON und ZHANG (1996) hauptsächlich von der vertikalen Windscherung $\frac{\partial u}{\partial z}$ bzw. $\frac{\partial v}{\partial z}$ in der atmosphärischen Grenzschicht abhängig. Ein weiteres Beispiel in der atmosphärischen Grenzschicht ist nach LÜPKES *et al.* (2008) Konvektion, welche durch eisfreie Rinnen im Packeis ausgelöst wird. Diese Rinnen weisen Längen in der Größenordnung von 100 m bis 100 km auf und besitzen Breiten von bis zu einigen Kilometern. Die Unterschiede der Oberflächentemperatur zwischen eisfreien Rinnen und dem Eis können bis zu 40 K betragen (LÜPKES *et al.* 2008).

Je nach Schichtung der Atmosphäre, dem Energiefluss in bodennahe Luftmassen und der Freisetzung von latenter Energie ist Konvektion auch über die Atmosphärische Grenzschicht hinaus möglich. Sich ggf. bildende Wolken sind nicht mehr auf Stratocumuli beschränkt, sondern weisen einen wesentlich größeren vertikalen Konvektionsraum auf. Zu diesen Wolken, die nicht auf die Atmosphärische Grenzschicht beschränkt sind, zählt die Art Cumulus congestus und im Falle des Vereisens der Wolken die Familie der Cumulonimben (Cb). Ein Beispiel für das eben genannten Spektrum an Wolkenarten ist die postfrontale Situation. In den gemäßigten Breiten tritt diese meteorologische Situation im rückwärtigen Bereich einer Kaltfront, dem sogenannten postfrontalen Bereich, auf. Eine Ausnahme bildet eine sogenannte maskierte Kaltfront, bei der der Energiefluss von der Atmosphäre zur Erdoberfläche gerichtet ist und es infolgedessen

nicht zur Labilisierung der darüber befindlichen Luftschichten kommt. Die im postfrontalen Bereich auftretende Konvektion kann bei ausreichend Wasserdampf in der Luft das Einsetzen von Kondensation und im weiteren Verlauf die Bildung von Niederschlag ermöglichen, der in diesem Zusammenhang als postfrontaler Niederschlag bezeichnet wird. Trotz des großen Spektrums an Wolkenarten geht der Niederschlag hauptsächlich von Cumulus congestus und Cbs aus. Das Besondere an einer postfrontalen Situation ist nicht, dass Konvektion auftritt, sondern dass es zu einer chaotischen Wolken bzw. Niederschlagsstruktur kommt, welche nicht die oben angesprochene zellartige Struktur aufweist.

In den erwähnten, unterschiedlichen Situationen bildet sich durch Konvektion eine Vielzahl von unterschiedlichen Wolkenstrukturen. Nachfolgend geht es speziell um die postfrontale Situation und die daraus resultierenden Niederschlagsgebiete.

Eine typische postfrontale Situation über Norddeutschland, mit der zugehörigen zellenartigen Wolkenstruktur ist im Satellitenbild in Abbildung 1.2 zu sehen. Das in der Abbildung gezeigte postfrontale Gebiet über Deutschland, den Niederlanden und der deutschen Bucht steht in Verbindung mit einer Kaltfront eines Tiefdruckgebietes über Nordskandinavien. Die Kaltfront verläuft von Nordskandinavien über die baltischen Staaten und die Alpen bis zu den Pyrenäen. In dem Bildausschnitt verläuft die Kaltfront in West-Ost-Richtung über den Alpen. Das zum gleichen Zeitpunkt gehörige Niederschlagsradarbild, welches vom Radarverbund des DWD erfasst wurde, ist in Abbildung 1.3 zu sehen. In diesem Radarbild grenzt die Kaltfront an den südlichen Erfassungsbereich des Radarverbundes und der zugehörige frontgebundene Niederschlag liegt somit außerhalb des Erfassungsbereichs.

Bei der Entstehung des postfrontalen Niederschlages spielt die anfängliche Labilisierung der unteren Troposphäre eine essentielle Rolle. Im Falle einer postfrontalen Situation über Zentraleuropa geschieht diese Labilisierung der Troposphäre durch den Herantransport von kälteren, polaren Luftmassen, welche sich nach dem Austausch der ursprünglich wärmeren Luftmassen über einer relativ warmen Erdoberfläche befinden. Die notwendige Labilisierung der Luftmassen muss nicht zwingendermaßen von einer Landoberfläche hervorgerufen werden, alternativ kann diese Labilisierung auch eine wärmere Meeresoberfläche bewirken. Die Entwicklung hin zu einer labilen Schichtung (bzw. eine feuchtlabile Schichtung, wenn das Kondensationsniveau nicht in Auslösehöhe¹ liegt) der Luftschichten ist eine Voraussetzung für die Entwicklung von konvektiven Zellen. Zwei weitere Voraussetzungen für konvektive Zellen sind nach BARTHLOTT *et al.* (2006) zum einen ausreichend Feuchtigkeit in bodennahen Luft-

¹Höhe, in der die anfängliche Auslenkung der aufsteigenden Luft stattfindet, z.B. orografisch bedingt.

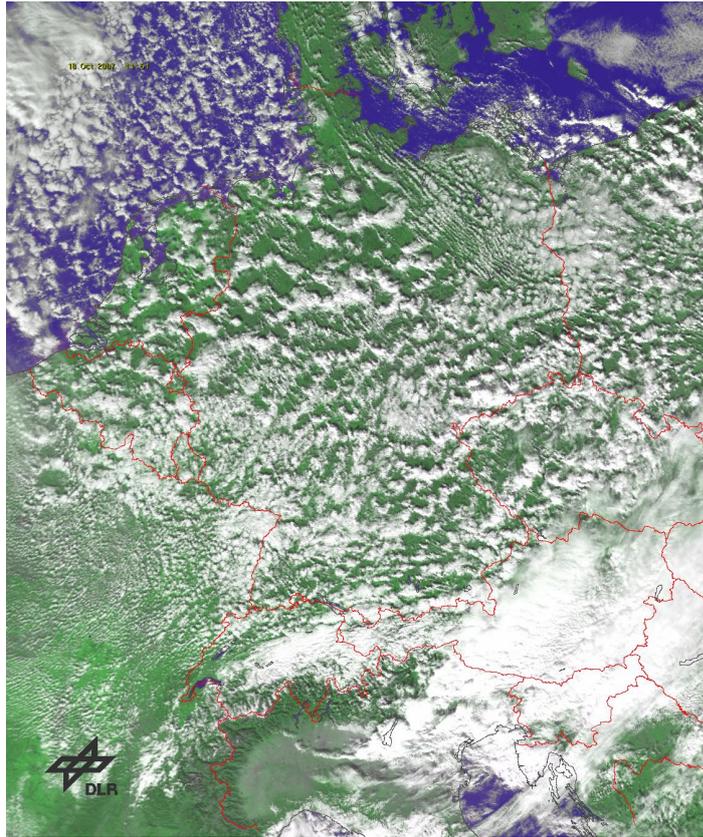


Abbildung 1.2: Dieses Satellitenbild, aufgenommen am 18. Okt. 2007 um 12 UTC, zeigt die Wolkenstruktur einer postfrontalen Situation über Deutschland, den Niederlanden und der deutschen Bucht. Im postfrontalen Bereich ist die zellenartige Wolkenstruktur zu erkennen. Die zum postfrontalen Bereich gehörige Kaltfront eines Tiefs über Nordskandinavien befindet sich in diesem Bildausschnitt mit einer West-Ost-Orientierung über den Alpen. (Quelle: NOAA AVHRR Daten ©NOAA 2007, zur Verfügung gestellt durch das DLR)

schichten, so dass Kondensation beim Heben von Luftmassen überhaupt erst stattfinden kann. Zum anderen ist ein Auslöseprozess notwendig, der z.B. durch eine inhomogene Erwärmung der Erdoberfläche oder großräumiges Heben aufgrund von Orografie von Luftmassen initiiert wird.

Zur Veranschaulichung der oben genannten postfrontalen Situation über Zentraleuropa, ist in Abbildung 1.4 die geopotentielle Höhe und die Temperatur für den 18. Oktober 2007 um 12 UTC im Höhengniveau von 850 hPa dargestellt. Zu sehen ist ein Tiefdruckgebiet über Nordskandinavien und ein Hochdruckgebiet über der Bretagne, welche für eine Kaltluftadvektion aus nordwestlicher Richtung über Norddeutschland sorgen und somit zu postfrontalen Bedingungen führen.

Die Labilisierung der unteren Troposphäre für die oben erwähnte postfrontale Situation äußert sich auch im vertikalen Temperatur- und Feuchteprofil (Temp) am Standort Bergen in Niedersachsen (Abb. 1.5). Bis in den Höhenbereich von ca. 440 hPa ist die

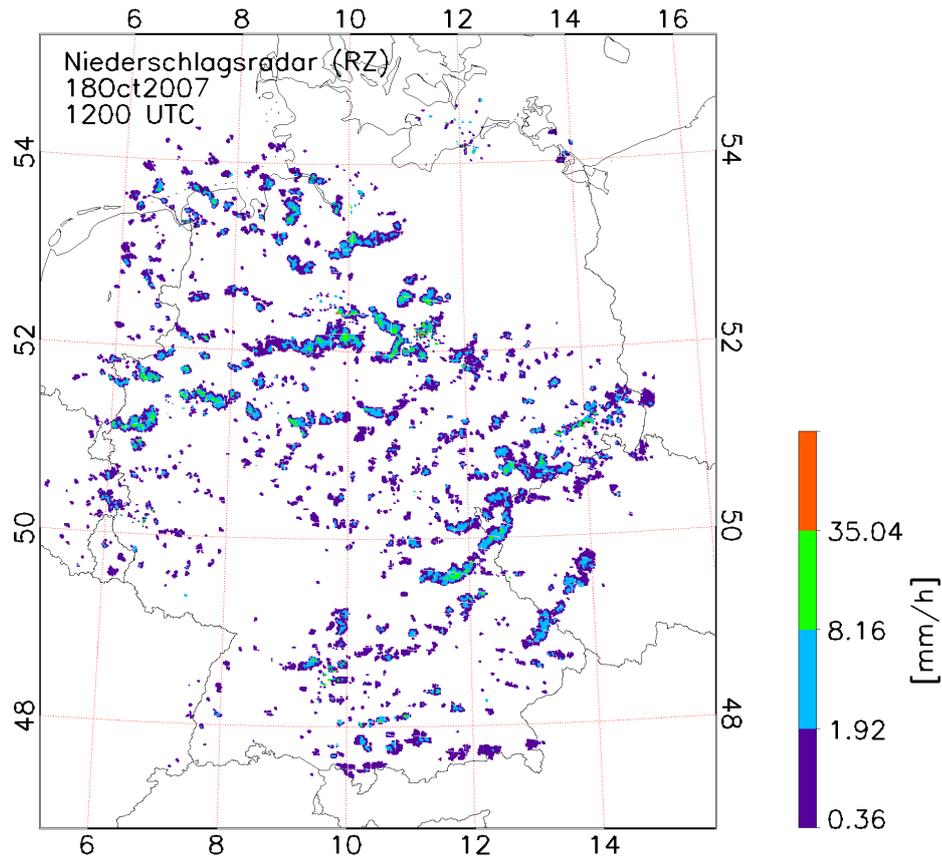


Abbildung 1.3: Dieses Niederschlagsradarbild vom 18. Okt. 2007 um 12 UTC, zeigt das vom Radarverbund des DWD erfasste Niederschlagsfeld der in Abbildung 1.2 zu sehenden postfrontalen Situation. Über Deutschland ist die typische zellenartige Niederschlagsstruktur zu erkennen. (Datenquelle: DWD)

Atmosphäre in weiten Bereichen neutral bzw. feuchtneutral geschichtet, welches die Entwicklung postfrontaler Konvektion begünstigt.

Einzelne konvektive Zellen, welche sich hin bis zu einem Cb entwickeln können, haben nach THEUSNER (2007) eine typische Lebensdauer von ca. 60 Minuten. Dennoch gibt es konvektive Zellen, die eine deutlich längere Lebensdauer aufweisen als die genannten 60 Minuten. Zurückzuführen ist dies u.a. auf den Einfluss der Abwinde auf die umgebene Luft. In Zellen vorhandene Abwinde führen beim Erreichen der Erdoberfläche zu einer Divergenz des horizontalen bodennahen Windfeldes. Die Vorderseite dieser sich entlang der Erdoberfläche ausbreitenden Strömung, welche als Böenfront bezeichnet wird, verursacht die Anhebung der umgebenen warmen Luft und kann somit zur Bildung weiterer konvektiver Schauerzellen in der unmittelbaren Umgebung der auslösenden konvektiven Zelle führen. Das Resultat dieses Prozesses sind Multizellen, die eine Lebensdauer von mehreren Stunden aufweisen können (BENNETT *et al.* 2006).

Ein weiterer und wesentlich häufiger auftretender Prozess, welcher zu mehrstündigen

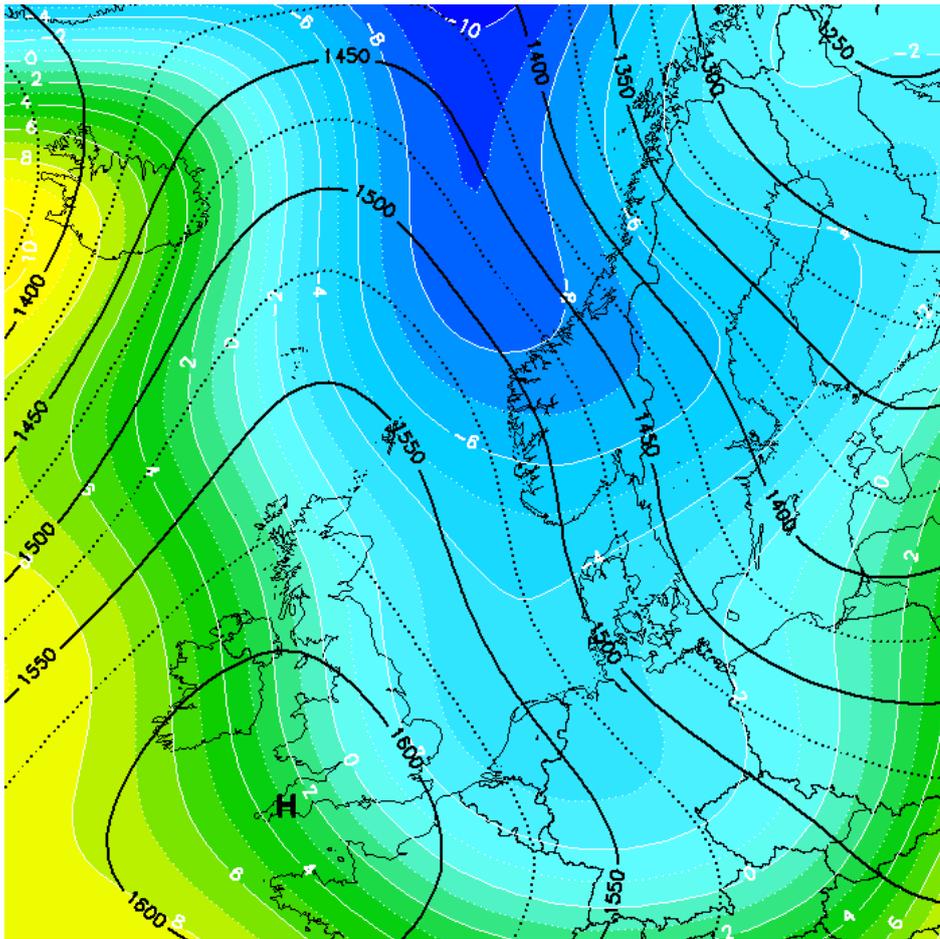


Abbildung 1.4: Geopotentielle Höhe in m (schwarz) und Temperatur in °C (farbig) im Höhengiveau 850 hPa. Im Bereich von Norddeutschland ist eine Kaltluftadvektion zu sehen, welche aus einer Strömung, verursacht durch ein Tiefdruckgebiet über Nordskandinavien und einem Hochdruckgebiet über der Bretagne, resultiert. Datenquelle: NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Lebensdauern führt, ist der *Merging*prozess. Mit Merging ist das Zusammenwachsen zweier benachbarter, sich parallel verlagernder konvektiver Zellen gemeint, welche sich nur aufgrund des Wachstums und der damit verbundenen horizontalen Expansion verbinden. Diese Expansion ist die häufigste Ursache des Mergings konvektiver Zellen. In nur 15% der Fälle kommt das Merging durch konvergierende Zugbahnen oder das Heranwachsen einer neuen konvektiven Zelle, z.B. durch die oben erwähnte Böenfront, zustande (WESTCOTT 1994; WEUSTHOFF und HAUF 2008A). Darüber hinaus gibt es neben dem Merging ebenso *Splitting*prozesse, bei denen sich eine konvektive Zelle in zwei oder mehrere kleinere Zellen aufspaltet.

Merging- und Splittingprozesse treten nach WEUSTHOFF und HAUF (2008A) bei 22 % aller Schauer in postfrontalen Niederschlagsgebieten auf. Bei der ausschließlichen Betrachtung von hochreichender Konvektion treten diese Prozesse jedoch nur in 12 %

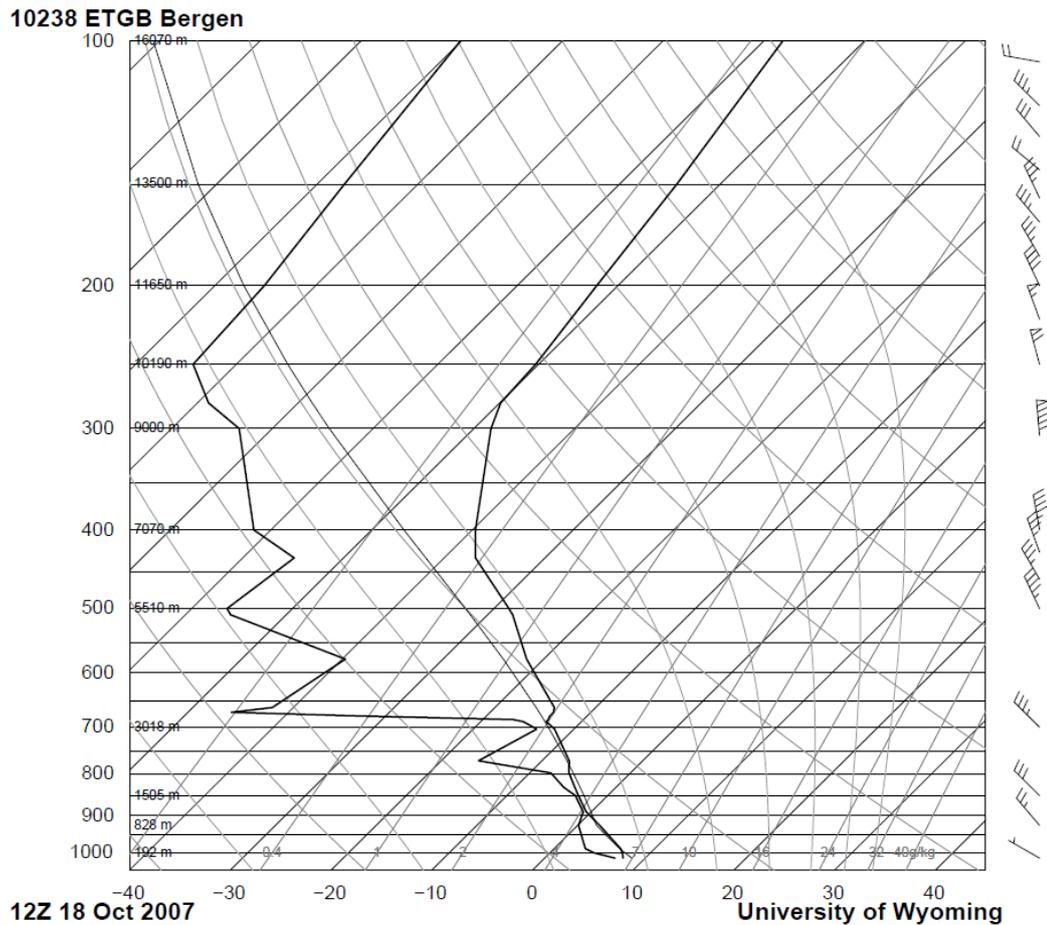


Abbildung 1.5: Temp vom 18. Okt. 2007 um 12 UTC für den Messpunkt Bergen in Niedersachsen für die Messgrößen Temperatur, Taupunkt und Wind. Zu sehen ist eine Profilmessung innerhalb des postfrontalen Bereiches, welche größtenteils bis in Höhen von ca. 440 hPa feuchtneutral geschichtet ist und sich somit Wolken von bis zu 5,5 km vertikaler Erstreckung bilden könnten. (Quelle: DWD, Univ. of Wyoming)

der Fälle auf (DIXON und WIENER 1993).

Zellen im postfrontalen Niederschlagsfeld erreichen nach THEUSNER und HAUF (2004) häufig Niederschlagsraten von bis zu $30 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ und in den Sommermonaten können regelmäßig Niederschlagsraten von mehr als $50 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ beobachtet werden. Trotz individueller Entwicklung jeder einzelnen Niederschlagszelle und unterschiedlichen Lebensdauern lässt sich nach Untersuchungen von WEUSTHOFF und HAUF (2008) die Niederschlagsflächenentwicklung einzelner Zellen bei normierter Lebensdauer und Normierung mit dem Niederschlagsflächenmaximum durch folgende Sinusfunktion (siehe Abbildung 1.6) darstellen:

$$\langle \bar{f}(t^*) \rangle = \sin(t^* \cdot \pi)^{0,45} \quad (1.1)$$

t^* entspricht der mit der Lebensdauer normierten Zeit.

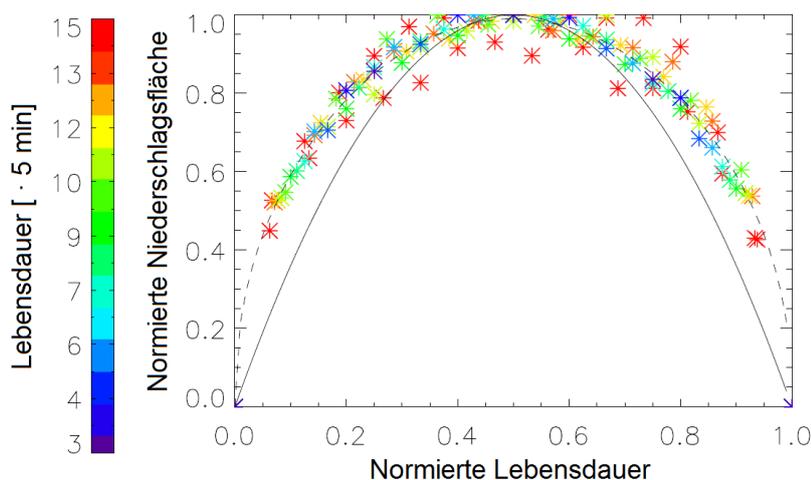


Abbildung 1.6: Bzgl. der Zellebensdauer und dem Niederschlagsflächenmaximum normierte Darstellung der Niederschlagsflächenentwicklung (farbig). Die Niederschlagsflächenentwicklung ist durch eine Sinusfunktion (schwarz gestrichelt) und eine Parabelfunktion (schwarz) angenähert. Abbildung entstammt WEUSTHOFF und HAUF (2008) und wurde übersetzt.

1.2 Modelle zur Simulation von Niederschlagsgebieten

Mit Hilfe von numerischen Wettervorhersagemodellen ist es möglich, eine Vielzahl von meteorologischen Größen für einen bestimmten Zeitpunkt vorherzusagen. Speziell bei Wolken und dem damit ggf. verbundenen Niederschlag spielt die verwendete Auflösung des numerischen Wettervorhersagemodells eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Räumliche Wolkenstrukturen können bis zu einer bestimmten minimalen Größe, welche von der Gitterweite des verwendeten Modells abhängen, explizit aufgelöst werden. Bei der Betrachtung der Anzahl von Gitterpunkten in einer horizontalen Raumrichtung stellt sich heraus, dass in der Größenordnung ca. 6 Gitterpunkte notwendig sind, um dynamische Eigenschaften der Strömung aufzulösen (BLAHAK 2010). Im Falle des vom Deutschen Wetterdienst betriebenen numerischen Wettervorhersagemodell COSMO-DE (DOMS 2011), welches eine horizontale Gitterweite von 2,8 km aufweist, entspricht die minimal auflösbare Wolkenstruktur somit ca. 16,8 km. Diese Gitterweite erlaubt die Auflösung von hochreichender Konvektion (BALDAUF *et al.* 2014). In der Regel basieren die skaligen Wolkenstrukturen bei numerischen Wettervorhersagemodellen auf der Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen. Subskalige Wolkenstrukturen müssen jedoch parametrisiert werden. Für die Parametrisierung kommt eine Reihe von Methoden in Frage. Einen allgemeinen Überblick dazu bietet TIEDTKE (1988). Zur Verringerung des Spektrums an Wolkenstrukturen, welche parametrisiert werden müssen, kann theoretisch die Gitterweite von numerischen Wettervorhersagemodellen reduziert werden. Die Reduktion der Gitterweite bietet die Möglichkeit, ein

größeres Spektrum von Wolkenstrukturen aufzulösen, hat jedoch auch eine Erhöhung der Modelllaufzeit zur Folge. Der Vorteil von explizit aufgelösten Wolkenstrukturen, bzw. daraus folgende Niederschlagsstrukturen, besteht in einer detaillierteren regionalen Niederschlagsverteilung, da parametrisierte Niederschlagsgebiete aufgrund ihrer Positionierung nicht unbedingt mit beobachteten übereinstimmen müssen.

Neben numerischen Wettervorhersagemodellen existieren noch weitere Modellansätze für die Modellierung konvektiver Niederschlagsereignisse, die je nach Einsatzzweck unterschiedliche Zeitskalen abdecken. Dazu zählen statistische Ansätze für die Modellierung von Niederschlagsereignissen an einem Punkt, welche zur Generierung langer Niederschlagsreihen verwendet werden. Desweiteren existieren objekt-orientierte Ansätze zur Modellierung bzw. zum Nowcasting einzelner Niederschlagszellen, bei denen aufgrund einer detaillierten Zellbeschreibung auf eine Parametrisierung verzichtet werden kann. Auf einige Modelle, welche stellvertretend für die erwähnten Modellarten stehen, wird im Folgenden kurz eingegangen.

1.2.1 COSMO-DE

COSMO-DE ist ein vom Deutschen Wetterdienst verwendetes und im operationellen Betrieb befindliches numerisches Wettervorhersagemodell, welches in einem Konsortium (Consortium for Small Scale Modelling) aus mehreren europäischen Wetterdiensten weiterentwickelt wird (DOMS 2011). COSMO-DE wird hier stellvertretend für andere Wettervorhersagemodelle nationaler Wetterdienste genannt, zu denen beispielsweise das Unified Model des MetOffice oder das frei verfügbare Weather Research and Forecasting Modell (WRF) gehören.

Das Modellgebiet von COSMO-DE deckt nach STEPHAN *et al.* (2008) und BALDAUF *et al.* (2014) Deutschland sowie einige Bereiche angrenzender Länder ab. Dies entspricht in 421×461 Gitterpunkten bzw. einer Fläche von $1200 \text{ km} \times 1300 \text{ km}$. Die verwendete horizontale Gitterweite beträgt $2,8 \text{ km}$. In der Vertikalen ist das Modellgebiet in 50 nicht äquidistante Hauptflächen eingeteilt, bei der die untere in 10 m über der Erdoberfläche und die höchste in $21,5 \text{ km}$ über dem Meeresspiegel liegt. Grundlage von COSMO-DE sind die ungefilterten Eulerschen Gleichungen der Hydrothermodynamik, so dass COSMO-DE in die Kategorie nicht-hydrostatischer, kompressibler Ausschnittsmodelle fällt. Aus diesen Gleichungen folgen die prognostischen Grundgleichungen für den Windvektor, die Temperaturabweichung, die Druckabweichung, die spezifische Feuchte sowie andere Größen. Die thermodynamischen Variablen werden dabei als Abweichung von einem höhenabhängigen Grundzustand beschrieben

(BALDAUF *et al.* 2014).

Gegenüber anderen Wettervorhersagemodelle mit einer größeren räumlichen Auflösung, wie z.B. das COSMO-EU (SCHULZ und SCHÄTTLER 2011), besitzt COSMO-DE den Vorteil hochreichende Konvektion aufzulösen. Kleinskalige Konvektion wird allerdings weiterhin parametrisiert (BALDAUF *et al.* 2011; BALDAUF *et al.* 2014).

1.2.2 HYCELL

Eine andere Art von Niederschlagsmodellen stellt das Modell HYCELL dar. In erster Linie ist HYCELL kein Modell zur Simulation für ein gesamtes Niederschlagsfeld, sondern für eine einzelne Niederschlagszelle. Mehrfach angewendet ist jedoch die Simulation eines gesamten Niederschlagsfeldes möglich. HYCELL simuliert nach FÉRAL und SAUVAGEOT (2003) die horizontale Verteilung der Niederschlagsrate in einer einzelnen Niederschlagszelle. Die horizontale Niederschlagsratenverteilung wird dabei durch eine Kombination von Dichtefunktionen der Gaußverteilung und einer zellsymmetrischen Exponentialverteilung beschrieben. Die Dichtefunktion der Gaußverteilung beschreibt die Niederschlagsrate im konvektiven Kern der Zelle vom Mittelpunkt bis zum Zellradius, bei dem die Niederschlagsrate auf das $\frac{1}{e}$ -fache (R_1) abgenommen hat. Der weitere Verlauf der Niederschlagsratenverteilung zum Zellrand hin erfolgt exponentiell bis zu der Niederschlagsrate $R_2 = 1 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$.

$$R(x, y) = \begin{cases} R_G \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a_G^2} + \frac{y^2}{b_G^2} \right) \right], & \text{für } R \geq R_1 \\ R_E \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a_E^2} + \frac{y^2}{b_E^2} \right)^{1/2} \right], & \text{für } R_2 \leq R < R_1 \end{cases} \quad (1.2)$$

R_G und R_E sind die jeweiligen Maxima der betreffenden Dichtefunktionen und a_G , a_E , b_G und b_E die jeweiligen Breiten der Dichtefunktionen, bei der diese auf das $\frac{1}{e}$ -fache abgenommen haben.

Ausgehend von HYCELL, welches die Niederschlagsratenverteilung in einer einzelnen Niederschlagszelle berechnet, ist durch mehrfache Anwendung die Generierung eines kompletten Niederschlagsgebietes möglich. Die Erstellung des Niederschlagsfeldes setzt die Kenntnis der lokalen Verteilung der Niederschlagsrate und die Gebiete, über denen Niederschlag generiert werden soll, voraus. Die eigentliche Generierung der einzelnen Zellen erfolgt durch HYCELL, wobei die Zelldurchmesser einer exponentiellen Verteilung folgen (FÉRAL und SAUVAGEOT 2003A; JEANNIN *et al.* 2006).

Von den oben genannten Autoren wurden die generierten Niederschlagsfelder nicht für die Simulation von Niederschlagsmengen in bestimmten Gebieten verwendet, sondern primär für die Untersuchung zur Ausbreitung von Elektromagnetischen Wellen (EM-Wellen) unter Niederschlagsbedingungen. Einige in der Telekommunikation verwendete Frequenzen des EM-Spektrums erfahren bei der Ausbreitung in Niederschlagsgebieten eine Dämpfung durch Hydrometeore. Davon betroffen sind sowohl terrestrische als auch Satellitenverbindungen (LEMORTON *et al.* 2001). Nach FÉRAL und SAUVAGEOT (2003A) ist eine zeitliche Simulation von Zellen möglich, diese orientiert sich jedoch an der Klimatologie des entsprechenden Standortes und nicht an einer speziellen meteorologischen Situationen.

1.2.3 MultiEXCELL

MultiEXCELL stellt eine Weiterentwicklung des Modells EXCELL (CAPSONI *et al.* 1987) dar, welches bereits als Grundlage von HYCELL diente. Einzelne Zellen sollen wie bei HYCELL den mittleren Charakter einer Niederschlagszelle darstellen und mathematisch handhabbar sein, so dass die Niederschlagsrate $R(\rho)$ wie folgt dargestellt wird:

$$R_k(\rho) = R_m \cdot \exp \left[- \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right] \quad (1.3)$$

mit dem Zellradius ρ , der maximalen Niederschlagsrate im Zentrum der Zelle R_m , dem Zellradius ρ_0 , bei dem $R(\rho)$ den $\frac{1}{e}$ -fache Wert von R_m annimmt, sowie einem Formfaktor k für eine Gaußsche ($k = 1$), exponentielle ($k = 2$) bzw. hyper-exponentielle² Niederschlagsratenverteilung ($k = 3$) innerhalb der Zelle. In die nachfolgende Generierung eines gesamten Niederschlagsfeldes fließen u.a. Untersuchungen aus Niederschlagsradar-daten (Doppler Radar in Spino d'Adda, Italien) zu Distanzen zwischen einzelnen Zellen sowie Zellansammlungen mit ein. Wie auch bei HYCELL liegt der primäre Anwendungsbereich von MultiEXCELL im Bereich der Untersuchungen zur Ausbreitung von EM-Wellen hinsichtlich Telekommunikationsverbindungen (LUINI und CAPSONI 2011).

1.2.4 GANDOLF

Durch den britischen Wetterdienst Met Office und die Environment Agency wurde das Modell GANDOLF (Generating Advanced Nowcasts for Deployment in Operatio-

²Hyperexponentielle Häufigkeitsverteilungen besitzen im Vergleich zu einer exponentiellen Häufigkeitsverteilung einen Variationskoeffizient welcher größer eins ist (TIJMS 2003).

nal Land-based Flood forecasts) entwickelt. Nach HAND (1996) ist GANDOLF zum einen in der Lage ein automatisches Nowcasting von konvektiven Niederschlagszellen durchzuführen und andererseits ermöglicht es auch ein Nowcasting für die ggf. daraus resultierenden Hochwasser. Innerhalb von GANDOLF werden konvektive Zellen durch Niederschlagsradare, Satellitendaten und einer Kombination mit einem Vorhersagemodell identifiziert sowie für das weitere Nowcasting durch Objekte dargestellt. Dadurch ist es nach HAND (1996) und PIERCE *et al.* (2000) möglich ein Nowcasting für konvektive Niederschlagszellen durchzuführen, die jedoch erst beobachtet werden müssen um eine Prognose für die weitere Entwicklung zu bekommen. Die zeitliche Beschreibung bzw. die Prognose der Zellcharakteristika erfolgt über ein konzeptionelles Modell eines Zellenzyklus. Beispielsweise erfolgt die Verlagerung der Zellen mit dem vorhergesagten Windfeld in Zellhöhe, wobei diese Referenzhöhe mit der vertikalen Erstreckung der Zelle variiert. Zu jeder Zelle wird das aktuelle Entwicklungsstadium ermittelt, welches aus Informationen des vertikalen Niederschlagsratenprofils abgeleitet wird. Die zeitliche Änderung der Niederschlagsrate ist abhängig vom jeweiligen Zellstadium. Eine Prognose neu entstehender konvektiver Zellen ist nur eingeschränkt möglich und zwar an Stellen, bei denen eine signifikante, bodennahe Konvergenz vorhergesagt wird.

1.2.5 Hydrologische Niederschlagsmodelle

Für hydrologische Anwendungsbereiche kommen eine Vielzahl an Niederschlagsmodellen zum Einsatz. Bei einem Großteil dieser Niederschlagsmodelle handelt es sich um stochastische Niederschlagsgeneratoren für die Simulation von Niederschlag an einem festen Punkt bzw. an mehreren Punkten in einem Gebiet. Niederschlagsgeneratoren finden gemäß BREINL *et al.* (2013) typischerweise für die Generierung langer Niederschlagsserien Anwendung, wenn beobachtete Niederschlagsdaten den benötigten Zeitraum nicht komplett abdecken können. Dabei erfolgt die stochastische Niederschlagsmodellierung i.d.R. in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird mit Hilfe einer Markov-Kette eine Zeitreihe über das Vorkommen von Niederschlag in definierten Zeiträumen generiert. Dabei findet jedoch noch keine Aussage zur Niederschlagsmenge statt. Die Markov-Kette ist ein stochastischer Prozess, welcher auf Grundlage von Übergangswahrscheinlichkeiten einer bestimmten Größe eine zufällige Zeitreihe mit diskreten Funktionswerten erzeugt (HÜBNER 2003; BREINL *et al.* 2013). Im Fall der Niederschlagsmodellierung entsprechen die diskreten Funktionswerte dem Vorhandensein bzw. dem nicht Vorhandensein von Niederschlag. In einem zweiten Schritt erfolgt nach BREINL *et al.* (2013) für Zeiträume mit Niederschlag die Zuordnung einer Niederschlagsmenge gemäß einer Häufigkeitsverteilung. Gegebenenfalls kann die Generierung

von Niederschlagsvorkommen und -menge in einem Markov-Prozess kombiniert werden, indem an Stelle der zwei oben genannten, diskreten Funktionswerte mehrere für verschiedene Niederschlagsklassen verwendet werden (WILKS und WILBY 1999). Eine Unterscheidung zwischen Niederschlag, welcher durch verschiedene meteorologische Situation hervorgerufen wird, ist in vielen stochastischen Niederschlagsmodellen nicht möglich. Nur einige Niederschlagsmodelle für den hydrologischen Einsatz unterscheiden konvektiven und stratiformen Niederschlag (LISNIAK *et al.* 2013). Die Niederschlagssimulation an mehreren, benachbarten Simulationsorten ist ebenfalls nach dem oben genannten Markov-Prozess möglich, um den Niederschlag in einem definierten Gebiet zu simulieren. Dazu kommt ein sogenanntes *Resampling*-Verfahren zum Einsatz, welches die Zeitpunkte der Niederschlagsereignisse und Niederschlagsmengen in Einklang bringt (WILBY *et al.* 2003; HARPHAM und WILBY 2005).

1.3 Stand der Forschung und Zielsetzung

Bereits entwickelte Modelle verfolgen unterschiedliche Ansätze, um konvektiven Niederschlag zu simulieren. Wie im letzten Kapitel 1.2 beschrieben wurde, konzentrieren sich einige Modelle auf die Simulation einzelner konvektiver Niederschlagszellen und wiederum andere Modelle wählen einen statistischen Ansatz zur Generierung von Niederschlagsserien für einen oder mehrere benachbarte Messpunkte. Je nach Modellansatz bieten sich dadurch Vor- und Nachteile. Der statistische Ansatz beispielsweise ermöglicht die Generierung langer Niederschlagsreihen. Bei der zeitlichen Simulation einzelner sich verlagernder Niederschlagszellen stößt dieser Ansatz jedoch an seine Grenzen, da i.d.R. stündliche bzw. tägliche Niederschlagssummen generiert werden. Numerische Wettervorhersagemodelle können bei entsprechend gewählter Gitterweite auch kleinskalige konvektive Zellen auflösen.

Die Situation eines postfrontalen Niederschlagsgebietes ist für einen Fachkundigen auf Satelliten- und Niederschlagsradarbildern erkennbar, jedoch scheint die konvektive Wolken- und Niederschlagsstruktur chaotisch und analytisch nicht fassbar zu sein (siehe Abbildung 1.2 und 1.3). Da die konvektiven Wolken und Niederschlagsgebiete eine Struktur bilden, kam bei früheren Forschungsvorhaben die Idee auf, dass neben den Navier-Stokes-Gleichungen weitere Gleichungen existieren, welche direkt die geometrische Struktur und die zeitliche Entwicklung postfrontaler konvektiver Zellen beschreiben. Dazu wurden in den vergangenen Jahren u.a. am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover (IMuK-LUH) Niederschlagsradar Daten postfrontaler Situationen untersucht.

Erste Untersuchungen zum postfrontalen Niederschlagsfeld erfolgten am IMuK-LUH bereits in den neunziger Jahren in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Roth. Diese Untersuchungen konnten jedoch aufgrund der damals recht grob aufgelösten meteorologischen Daten (z.B. Niederschlagsradar) nicht in dem detaillierten Umfang erfolgen wie bei den noch später genannten Autoren THEUSNER und WEUSTHOFF, welche mit deutlich höher aufgelösten Daten gearbeitet haben. Dabei wurden laut ROTH und CLAUSEN (2001) verschiedene Ansätze verfolgt, um Charakteristika von konvektiven Niederschlagsfelder zu erkennen. Zu den Ansätzen zählt z.B. ein konzeptionelles Modell, mit dem aus skaligen zur Verfügung stehenden meteorologischen Daten, subskalige Parameter von Niederschlagszellen abgeleitet wurden, oder die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Zellenhöhe und der Niederschlagsrate, Niederschlagsdauer und Zellerstreckung. Desweiteren erfolgten durch HAUF *et al.* (2001) statistische Untersuchungen von konvektiven Niederschlagsereignissen in Norddeutschland, bei denen ein Hauptaugenmerk auf räumlichen und zeitlichen Strukturen lag.

Weitere Forschung zu konvektiven bzw. postfrontalen Niederschlagsgebieten erfolgten durch MESNARD und SAUVAGEOT (2003), THEUSNER und HAUF (2004), THEUSNER (2007), WEUSTHOFF und HAUF (2008), WEUSTHOFF und HAUF (2008A) und WEUSTHOFF (2008B). Diese Autoren konnten auf Niederschlagsradardaten zurückgreifen, welche sowohl räumlich als auch zeitlich höher aufgelöst waren als bei vorangegangenen Untersuchungen und so zeigen, dass die Struktur eines postfrontalen Niederschlagsgebietes zwar chaotisch scheint, aber dennoch eine analytische Beschreibung grundlegender Charakteristika des Niederschlagsgebietes durch mittlere Entwicklungen und Verteilungen möglich ist. Es wurde u.a. erfolgreich gezeigt, wie sich die Abstände von Niederschlagszellen zu direkten Nachbarzellen verhalten, welche Verteilung die Lebensdauern von Niederschlagszellen aufweisen oder wie sich die Niederschlagsflächen zeitlich entwickeln.

Mit dieser analytischen Beschreibung der Charakteristika postfrontaler Niederschlagsgebiete konnten HERBORT und ETLING (2011) zeigen, dass grundlegende statistische Eigenschaften beobachteter postfrontaler Niederschlagsgebiete mit denen durch COSMO-DE wiedergegebenen vergleichbar sind. Der Vergleich bezog sich dabei u.a. auf Häufigkeitsverteilungen von Zellgrößen, Häufigkeitsverteilungen der Reflektivitätsmaxima und mittlere Lebenszyklen der Schauerzellen. Zu einem ähnlichen Ergebnis bzgl. der Verifikation von COSMO-DE sind Untersuchungen von BALDAUF *et al.* (2011) gekommen, bei denen gezeigt werden konnte, dass das numerische Wettervorhersagemodell COSMO-DE bis auf eine Unterschätzung der Wolkengröße in der Lage ist, die postfrontale Wolken- und Niederschlagsstrukturen zu simulieren.

Genau an dieser Stelle setzt die hier vorliegende Arbeit an. Wie oben erwähnt wurde sind numerische Wettervorhersagemodelle in der Lage postfrontalen Niederschlagsgebiete auf Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen zu simulieren. Die vorliegende Arbeit soll zeigen, dass ein alternativer Ansatz für die Simulation von postfrontalen Niederschlagsgebieten möglich ist. Dieser alternative Ansatz basiert nicht auf den Navier-Stokes-Gleichungen sondern auf der analytischen Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Charakteristika postfrontalen Niederschlagsgebiete der oben genannten Autoren MESNARD und SAUVAGEOT (2003), THEUSNER und HAUF (2004), THEUSNER (2007), WEUSTHOFF und HAUF (2008), WEUSTHOFF und HAUF (2008A) und WEUSTHOFF (2008B). Dafür werden die Untersuchungsergebnisse der genannten Autoren in der Art und Weise in ein Schauermodell zur Simulation von postfrontalen Niederschlagsgebieten überführt, dass die typischen Merkmale einer postfrontalen Situation wiedergegeben werden. Zu diesen Merkmalen zählt eine zellbasierte Darstellung von Niederschlagsgebieten mit einer bestimmten Lebensdauer und typischer zeitlicher Zellentwicklung innerhalb dieser Lebensdauer. Ein weiteres Merkmal ist die Verlagerung der Zellen mit dem mittleren Wind und das Auftreten von Merging- und Splittingprozessen.

Die Leistungsfähigkeit dieses alternativen Ansatzes für ein Schauermodell besteht darin, dass kein rechenzeitintensives numerisches Wettervorhersagemodell notwendig ist, sondern auf ein Modell mit adäquater Laufzeit zurückgegriffen werden kann und trotzdem eine detaillierte Simulation von einzelnen Niederschlagszellen eines gesamten postfrontalen Gebietes möglich ist.

Dabei geht es in der hier vorliegenden Arbeit um drei wesentliche Punkte, welche die oben genannten Charakteristika in ein Schauermodell überführen. Diese Punkte lauten:

1. Verwendung von Forschungsergebnisse der oben genannten Autoren (funktionale bzw. statistische Beschreibung von Häufigkeitsverteilungen und Tagesgängen sowie Zellübergängen).
2. Umkehrung der unter 1. genannten Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung eines postfrontalen Niederschlagsfeldes.
3. Daraus folgend, die Entwicklung eines Schauermodells zur Simulation von mittleren, postfrontalen Niederschlagsfeldern mit individuellem Zellwachstum und Wechselwirkung mit anderen Zellen.

Bei den ersten beiden Punkten geht es darum, die von den oben genannten Autoren bestimmten Häufigkeitsverteilungen zu verwenden, um aus diesen Verteilungen ein postfrontales Niederschlagsfeld zu generieren. Mit den genannten Verteilungen,

beispielsweise für die Niederschlagszellengröße, ist allerdings nur eine Generierung eines statischen postfrontalen Niederschlagsfeldes möglich. Zur Berücksichtigung des zeitlichen Aspektes im Modell, also der zeitlichen Entwicklung der postfrontalen Niederschlagszellen, finden die Übergangsmatrix³ und Tagesgänge zur zeitlichen Beschreibung von postfrontalen Niederschlagscharakteristika Anwendung. Zusammengenommen führt dieses zur Entwicklung des im Punkt drei genannten Modells zur Simulation eines mittleren postfrontalen Niederschlagsfeldes. Bei dem entwickelten Schauermodell handelt es sich nicht um ein Nowcasting- oder numerisches Wettervorhersagemodell, sondern um ein Hybridmodell zur Simulation eines postfrontalen Niederschlagsfeldes in einem vordefinierten Simulationsbereich ohne die Berücksichtigung eines Anfangszustandes, bei dem eine individuelle Simulation einzelner Niederschlagszellen erfolgt. Die Bezeichnung als Hybridmodell fußt darauf, dass bei dem Schauermodell zwar ein statistischer Ansatz bzgl. des gesamten Niederschlagsfeldes verfolgt, trotzdem jedoch eine individuelle Entwicklung bei den einzelnen Niederschlagszellen zugelassen wird.

Für die Entwicklung des Schauermodells wurden einige grundlegende Annahmen gemacht bzw. Definitionen aufgestellt. Das Schauermodell soll die mittleren Charakteristika des gesamten postfrontalen Niederschlagsfeldes wiedergeben. Dennoch findet bezogen auf einzelne Niederschlagszellen keine mittlere, sondern eine individuelle Entwicklung statt. Die Simulation des gesamten postfrontalen Niederschlagsfeldes erfolgt auf zwei Ebenen. Die erste Ebene beinhaltet die Zellentwicklung, welche auf der Entwicklung der Reflektivitätsmaxima innerhalb einer Zelle beruht und zu der beispielsweise auch Aufteilungsprozesse von Zellen (Splittingprozess) gehören. Zur zweiten Ebene, welche eine geometrischen Ebene ist, gehören Prozesse bei denen es zum Zusammenwachsen von zwei oder mehr Zellen kommt (Mergingprozesse) und die durch die in der ersten Ebene genannte Entwicklung der Reflektivitätsmaxima nicht beschrieben werden können. Der Begriff geometrische Ebene wurde hier gewählt, da als Merging-Kriterium eine geometrische Überlappung von zwei oder mehr Zellen gewählt wurde. Diese Aspekte werden in Kapitel 3 im Detail erläutert.

Einschränkungen im Schauermodell finden in der Hinsicht statt, dass die simulierten Zellen für eine mathematische Handhabbarkeit durch Kreisflächen dargestellt werden. Die Niederschlagsrate wird im Schauermodell durch eine konstante Rate umgesetzt. Eine ortsabhängige Niederschlagsrate innerhalb von Zellen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern das Hauptaugenmerk liegt auf der korrekten Wiedergabe der Charakteristika von Niederschlagszellen bzw. des gesamten Niederschlagsfeldes.

Das so entwickelte Schauermodell zur Simulation von postfrontalen Niederschlagsge-

³Beschreibt die Entwicklung von Zellübergängen zwischen zwei Zeitschritten, siehe Kapitel 2.4

bieten bietet den Vorteil, ein postfrontales Niederschlagsgebiet mit einer individuellen Zellenentwicklung zu simulieren. Damit können Niederschlagsereignisse nicht nur an einem Punkt simuliert werden, sondern das Modell berücksichtigt die zeitlich individuelle Zellsimulation und die Advektion von Zellen im gesamten Simulationsgebiet (aktuell $500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$). Das postfrontale Niederschlagsereignisse einen nicht zu vernachlässigenden Anteil gegenüber an Fronten gebundenem Niederschlag haben, zeigten Analysen von Niederschlagsereignissen der Jahre 1979 bis 1984 für den Standort Hannover-Herrenhausen, welcher regelmäßig im Bereich von postfrontalen Niederschlägen liegt. 31,1% der Niederschlagsereignisse konnten dabei auf Schauer zurückgeführt werden. Dies entspricht einem Anteil von 23,9% an der Gesamtniederschlagsmenge (TETZLAFF und HAGEMANN 1986). Ähnliche Ergebnisse lieferten Analysen von WALTHER und BENNARTZ (2006) für Niederschlagsradarmessungen im baltischen Raum, bei denen der Anteil von konvektiven Niederschlagsereignissen bei 37% liegt.

Die hier vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung des Schauermodells zur Simulation von Niederschlagsgebieten im postfrontalen Bereich. Kapitel 2 geht auf wichtige, vorangegangene Forschungsergebnisse der Autoren Theusner und Weusthoff zu konvektiven bzw. postfrontalen Niederschlägen ein, die eine essentielle Grundlage für das hier entwickelte Schauermodell darstellen. Kapitel 3 stellt im Anschluss die Modellspezifikationen, den detaillierten Aufbau des Schauermodells sowie den Modellinput dar. Zur Überprüfung des Schauermodells findet in Kapitel 4 eine Untersuchung der vom Schauermodell ausgehenden Niederschlagszellen bzgl. ihrer geometrischen und zeitlichen Struktur statt und wird mit den Untersuchungen aus Kapitel 2 verglichen. Das entwickelte Schauermodell bietet einige Anwendungsmöglichkeiten, auf welche anschließend in Kapitel 5 eingegangen wird.

2 Charakteristika postfrontaler Niederschlagsgebiete

Die bereits in der Einleitung erwähnten vorangegangenen Forschungen zu postfrontalen Niederschlagsgebieten werden in diesem Kapitel ausführlicher erläutert, da sie für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schauermodell essentiell sind.

Grundlage für die hier vorliegende Arbeit sind die vorangegangenen Forschungsergebnisse von THEUSNER (2007) und WEUSTHOFF (2008B), sowie ergänzend dazu WEUSTHOFF und HAUF (2008A). Das Hauptaugenmerk dieser Forschungen lag auf der Untersuchung von postfrontalen Niederschlagsradardaten mit Hilfe des Niederschlagsradarverbundes des DWD. Bei THEUSNER (2007) lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den geometrischen Strukturen von Niederschlagsgebieten postfrontaler, hochreichender konvektiver Zellen (eulersche Betrachtung). In den Untersuchungen von WEUSTHOFF (2008B) lag ein Untersuchungsschwerpunkt ebenfalls auf den geometrischen Strukturen, jedoch mit zeitlich und räumlich höher aufgelösten Niederschlagsradardaten (Scanintervall $\Delta t = 5$ Minuten statt $\Delta t = 15$ Minuten und $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ räumlicher horizontaler Auflösung statt $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$). Der zweite Untersuchungsschwerpunkt lag auf der lagrangeschen Analyse einzelner Zellen, bei der die zeitliche Entwicklung grundlegender Charakteristika mit Hilfe eines Tracking-Algorithmus ermittelt wurde.

Untersuchungen vom MESNARD und SAUVAGEOT (2003) kamen zu dem Ergebnis, dass die geometrische Struktur von konvektiven Niederschlagsgebieten bestimmte Charakteristika aufweisen. Die Autoren verwendeten Niederschlagsradardaten von insgesamt vier Niederschlagsradarstationen, zwei im Südwesten von Frankreich und zwei weitere in den tropischen Gebieten von Westafrika. Weiterführenden Untersuchungen von THEUSNER und HAUF (2004) und THEUSNER (2007) zur geometrischen und zeitlichen Struktur von Niederschlagsgebieten konzentrierten sich ausschließlich auf postfrontale Bereiche, jedoch in größeren, über Deutschland und Teile angrenzender Länder erstreckenden, Untersuchungsgebieten als dieses bei vorherigen Forschungen der Fall war. Herangezogen wurden Niederschlagsradardaten (Kompositprodukte) des

DWD von insgesamt 39 Tagen aus den Sommermonaten 1997 und 1998, die ein Gebiet von ca. $920 \text{ km} \times 920 \text{ km}$ abdecken. Die räumliche horizontale Auflösung lag bei $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ und die zeitliche Auflösung bei 15 Minuten (THEUSNER 2007). Es konnte u.a. gezeigt werden, dass die relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer, welches die Anzahl der Reflektivitätsmaxima innerhalb eines abgeschlossenen Niederschlagsbereiches ist, für die jeweils vier unterschiedlichen Reflektivitätsgrenzwerte durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann. Zudem ist auch eine annähernd funktionale Beschreibung des Tagesgangs der postfrontalen Niederschlagsfläche durch die ersten vier Frequenzen einer Fast Fourier Transformation möglich. Desweiteren entspricht die relative Größenverteilung der abgeschlossenen Niederschlagsgebiete, ausgedrückt durch den Äquivalenzradius, einer Log-Normal-Funktion. Beim Äquivalenzradius wird die Fläche eines Niederschlagsgebietes als Kreisfläche angenommen, der Radius dieses Kreises entspricht dem Äquivalenzradius.

Nachfolgend findet eine ausführlichere Beschreibung der von WEUSTHOFF und HAUF (2008), WEUSTHOFF und HAUF (2008A) und WEUSTHOFF (2008B) erlangten Beschreibungen von postfrontalen Niederschlagsgebieten statt, die eine wesentliche Grundlage der hier vorliegenden Arbeit darstellen und eine Fortführung vom MESNARD und SAUVAGEOT (2003), THEUSNER und HAUF (2004) und THEUSNER (2007) sind bzw. die dortigen Untersuchungen mit höher aufgelösten Niederschlagsradar-daten wiederholen. Der Einfachheit halber werden die erst genannten Autoren in diesem Absatz im Folgenden als WEUST und Letztere als THEUS bezeichnet.

Die zugrundeliegenden Niederschlagsradar-daten des deutschlandweiten RZ-Komposit des DWD bei WEUST, besitzen in Vergleich zu THEUS eine höhere Auflösung, welche in zeitlicher Hinsicht 5 Minuten und in räumlicher Hinsicht $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ beträgt. Die Auflösung der Niederschlagsrate beträgt $0,01 \frac{\text{mm}}{5\text{Min}}$. Insgesamt wurden 17 Tage aus den Jahren 2004 und 2006 mit postfrontalen Situationen untersucht, welches 13 Tage weniger als bei THEUS sind. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung entspricht dieses kürzere Zeitintervall jedoch 4.716 auswertbaren Niederschlagsradar-bildern statt 3.258 bei THEUS. Darüber hinaus wurde ein unterer Grenzwert für die Niederschlagsrate von $0,05 \frac{\text{mm}}{5\text{Min}}$ gewählt, welches einer Reflektivität von 19 dBz entspricht. Die Niederschlagsradar-daten enthalten zwar auch detektierte konvektive Niederschlagsgebiete der geringsten Reflektivitätsklasse (7 dBz bis 19 dBz), der verwendete Grenzwert von 19 dBz ist jedoch ausreichend zum Detektieren konvektiver Zellen, da 95% aller Zellen mindestens Reflektivitäten von 19 dBz aufweisen (THEUSNER 2007).

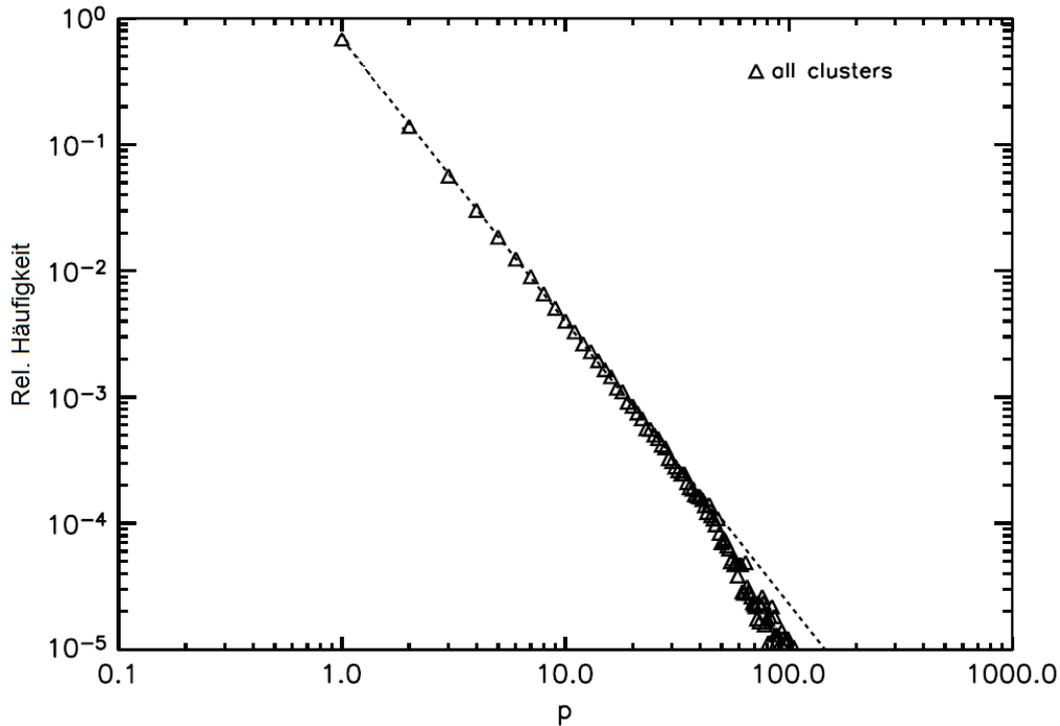


Abbildung 2.1: Resultierende relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer p (Dreiecke) in allen untersuchten 17 Tagen mit postfrontalen Niederschlag. Die zugehörige Regressionsfunktion (gestrichelte Linie) entspricht für Werte der relativen Häufigkeitsverteilung größer als $5 \cdot 10^{-4}$ einer Potenzfunktion. Abbildung entstammt WEUSTHOFF und HAUF (2008A) und wurde überarbeitet.

2.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer

Die bereits erwähnte Peak-Nummer p ist ein Wert für die Anzahl der Reflektivitätsmaxima innerhalb eines abgeschlossenen Niederschlagsbereiches und kann somit als indirekte Angabe der in einem abgeschlossenen Niederschlagsgebiet befindlichen konvektiven Bereiche angesehen werden. Die relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer $N(p)$ gemäß WEUST wird im Englischen *peak number distribution* oder *cell number distribution* (kurz PND) genannt und kann nach WEUST für Werte der relativen Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer p oberhalb von $5 \cdot 10^{-4}$ durch eine Potenzfunktion mit den Parametern $a = 0,69$ und $b = -2,24$ (siehe gestrichelte Linie in Abbildung 2.1) wie folgt angenähert werden:

$$N(p) = a \cdot p^b \quad (2.1)$$

Im weiteren Text wird die PND als die hier beschriebene Funktion verwendet. Diese Verteilung gemäß der Potentialgleichung 2.1 wurde bei allen untersuchten Zeitskalen (Stunde, Tag und mehrtägiger Datensatz) gefunden (THEUSNER 2007). Desweiteren

fällt auf, dass die beobachtete PND eine geringe Streuung aufweist. In Abbildung 2.1 ist zu sehen, dass die Einzeller an der Gesamtanzahl der Niederschlagsgebiete einen Anteil von ca. 69 % haben. Bei der gesamten Niederschlagsfläche machen sie jedoch nur einen Anteil von ca. 15 % aus (WEUSTHOFF und HAUF 2008A).

2.2 Tagesgang der postfrontalen Niederschlagsfläche

Untersuchungen des mittleren Tagesganges der gesamten postfrontalen Niederschlagsfläche wurden ebenfalls von WEUST durchgeführt und bestätigen die Ergebnisse von THEUSNER (2007), dass der Tagesgang $f(t)$ durch eine Fast Fourier Transformation (FFT) beschrieben werden kann:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} \cdot \left(1 + \sum_{n=1}^5 [a_n \cdot \cos(n\omega t - \phi_n)] \right) \quad (2.2)$$

mit dem Skalierungsparametern a_0 und a_n , sowie $\omega = \frac{2\pi}{86400\text{s}}$ und dem Offsetparameter ϕ_n . Nach WEUST sind für die Darstellung die ersten fünf und nach THEUSNER (2007) die ersten vier Frequenzen der FFT ausreichend. Das Maximum des Tagesganges für den unteren Reflektivitätsgrenzwert von 19 dBz ist gegen 14 UTC erreicht (siehe Abbildung 2.2) und fällt nach THEUSNER (2007) mit dem Maximum der durch Einstrahlung hervorgerufenen Konvektion zusammen. Kurz nach 0 UTC wird das Minimum des mittleren Tagesganges erreicht. Desweiteren charakteristisch für den Tagesgang ist die Stagnation der Niederschlagsfläche im Zeitraum 3 UTC bis 6 UTC. Im Vergleich zum ermittelten Tagesgang von WEUST liegt das Maximum des Tagesganges 15.000 km² höher bei ca. 44.000 km². Der Unterschied zwischen den Maxima kommt durch eine Radarabdeckungsdifferenz bei den jeweils verwendeten Radarprodukten zustande. Die Radarabdeckung des Radarverbundes, die bei WEUST verwendet wurde, lag bei 557.304 km² (WEUSTHOFF und HAUF 2008A), die Gesamtabdeckung von THEUSNER (2007) jedoch bei ca. 864.400 km².

Die von THEUSNER (2007) ermittelten Skalierungsparameter a_0 und a_n sowie ω und der Offsetparameter ϕ der Gleichung 2.2 sind in Tabelle 2.1 ersichtlich. Die ebenfalls von WEUST verwendete Gleichung 2.2 wurde durch die Autorin korrigiert. Diese Korrektur betrifft zum einen den Faktor der Kosinus-Funktion, der in der hier aufgeführten Gleichung a_n entspricht ($\frac{2}{a_0}$ wird bereits in den Skalierungsparametern a_n berücksichtigt) und zum anderen den Offsetparameter, welcher für $n = 1$ und $n = 3$ mit einer Phasenkorrektur von $+\pi$ addiert wird.

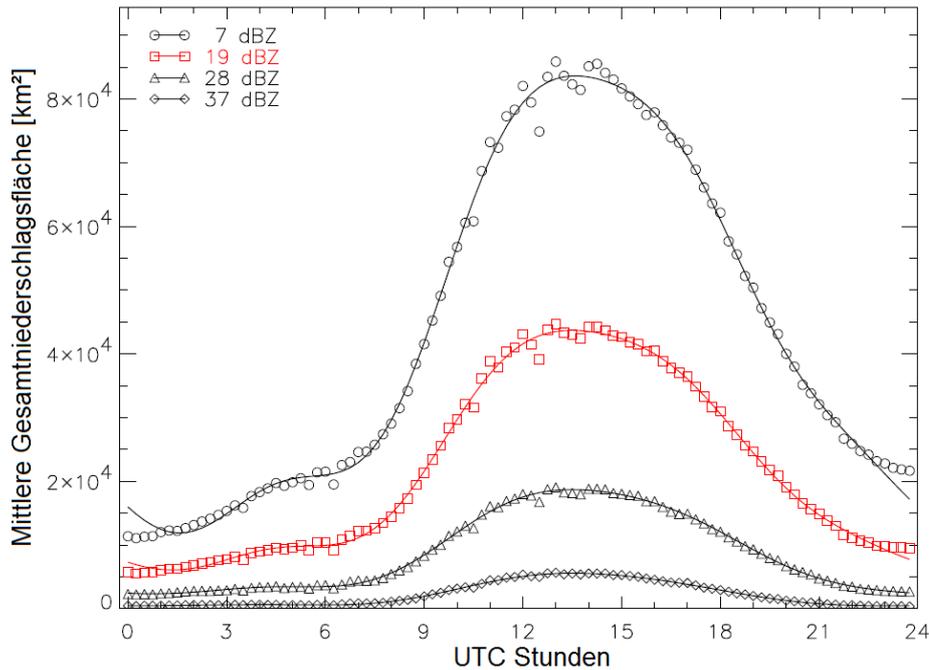


Abbildung 2.2: Tagesgang der mittleren Gesamtniederschlagsfläche für vier verschiedene untere Grenzwerte von Reflektivitäten bzw. Niederschlagsraten. Abbildung entstammt THEUSNER (2007) und wurde übersetzt.

$a_0/2$	a_1	a_2	a_3	a_4	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
21980,54	0,86	0,18	0,057	0,048	0,57	1,03	-0,19	-1,20

Tabelle 2.1: Skalierungsparameter der Fast Fourier Transformation (Gleichung 2.2) für den Tagesgang der Gesamtniederschlagsfläche mit einem unteren Grenzwert von 19 dBz. $a_0/2$ in km^2 (THEUSNER 2007).

Wie bereits erwähnt, stellt der in Abbildung 2.2 gezeigte Tagesgang die mittlere Niederschlagsfläche der analysierten Tage mit postfrontalen Bedingungen im Untersuchungsgebiet dar. Hierbei hat der Zeitpunkt des Kaltfrontdurchganges keinen signifikanten Einfluss auf den Tagesgang (WEUSTHOFF 2008B).

2.3 Clustergrößenverteilungen

Eine weitere Beschreibung der geometrischen Struktur von WEUST ist durch die Clustergrößenverteilung¹ möglich, welche einer Häufigkeitsverteilung der Größen von Niederschlagsgebieten entspricht. Bei dieser Häufigkeitsverteilung wird zwischen Niederschlagsgebieten mit unterschiedlichen Peak-Nummern unterschieden, was in vorangegangenen Untersuchungen nicht erfolgte. Die Größe eines Niederschlagsgebietes wird dabei durch den Äquivalenzradius repräsentiert. Die Häufigkeitsverteilung des Äqui-

¹Als Cluster wird eine Niederschlagszelle mit mehr als einem Reflektivitätsmaximum bezeichnet.

c_1	c_2	c_3	c_4	d_1	d_2	d_3
0,38	4,32	0,61	0,14	-0,33	0,33	0,06

Tabelle 2.2: Parameter der Varianz σ_p und des Erwartungswertes μ_p der Log-Normalverteilung der Clustergrößenverteilung für Gleichungen 2.4 und 2.5 (WEUSTHOFF 2008B).

valenzradius $N(D_p)$ entspricht der Log-Normalverteilung

$$N(D_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot D_p \cdot \sigma_p} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(D_p) - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (2.3)$$

mit der Varianz σ_p und dem Erwartungswert μ_p , welche sich durch eine Potenzfunktion bzw. modifizierte Potenzfunktion beschreiben lassen (WEUSTHOFF 2008B). Desweiteren sind

$$\sigma_p = c_1 \cdot p^{d_1}, \quad (2.4)$$

$$\mu_p = c_2 \cdot p^{d_2} \cdot \left(1 - c_3 \cdot p^{d_3} - \frac{c_4}{p}\right) \quad (2.5)$$

wobei die Werte für c_i und d_i in Tabelle 2.2 aufgeführt sind.

Abbildung 2.3 zeigt ausgewählte Clustergrößenverteilungen für Cluster mit gleicher Peak-Nummer ebenso wie die zugehörige Log-Normalverteilung gemäß Gleichung 2.3. Bei steigender Peak-Nummer kommt es zu einer Verschiebung des Maximums der Clustergrößenverteilungen hin zu größeren Äquivalenzradien bei gleichzeitiger Verringerung der Amplitude.

2.4 Übergangsmatrix

WEUST führte nicht nur eine Eulersche Analyse zur Ermittlung geometrischer Charakteristika von postfrontalen Niederschlagsgebieten durch, sondern verwendete ebenfalls eine Lagrangesche Analyse, bei der das Hauptaugenmerk auf der Entwicklung einzelner Zellen während ihrer gesamten Lebensdauer lag. Für diese Lagrangeschen Analysen war eine Verfolgung einzelner Zellen notwendig, was die Entwicklung eines Tracking-Algorithmus erforderte. Dieser Tracking-Algorithmus ist speziell für postfrontale Situation entwickelt worden. Bereits verfügbare Tracking-Algorithmen für hochreichende Konvektion, wie z.B. das am National Center for Atmospheric Research (NCAR) entwickelte TITAN (DIXON und WIENER 1993), verwenden einen hohen unteren Grenzwert der Radarreflektivität bzw. Niederschlagsrate. Im Fall von TITAN liegt dieser

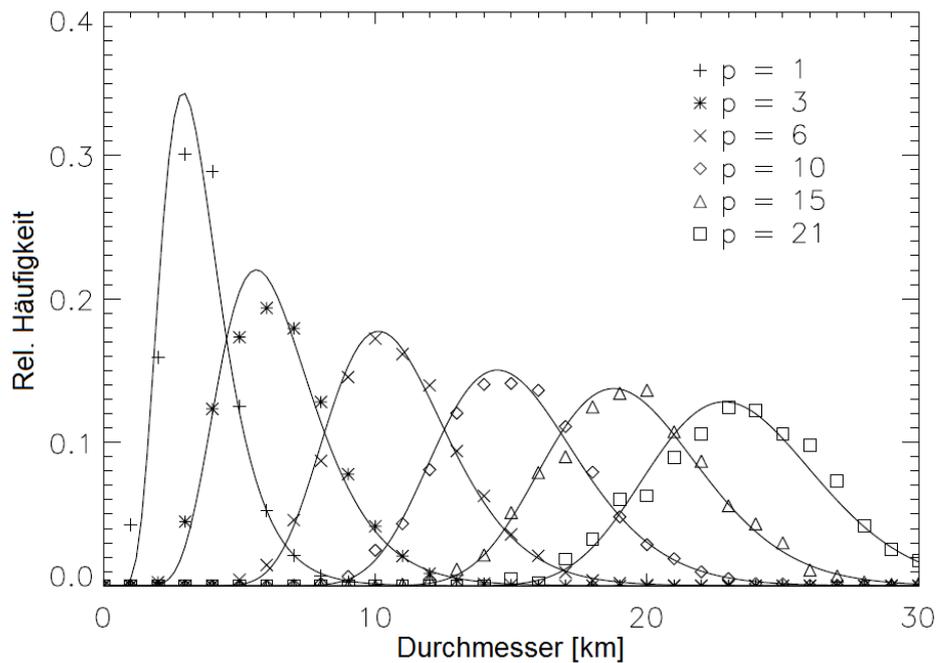


Abbildung 2.3: Häufigkeitsverteilung der Durchmesser für Cluster mit gleicher Peak-Nummer. Die dargestellten unterschiedlichen Symbole entsprechen sechs verschiedenen Peak-Nummern. Die Verteilungen einzelner Peak-Nummern entsprechen jeweils einer Log-Normalverteilung. Abbildung entstammt WEUSTHOFF (2008B) und wurde bearbeitet.

Grenzwert bei 35 dBz. Somit sind diese Tracking-Algorithmen für postfrontale Niederschlagsgebiete nur eingeschränkt verwendbar, da postfrontale Schauer i.d.R. geringere Niederschlagsdauern und kleinere Niederschlagsflächen mit geringerer Radarreflektivität aufweisen als Niederschlagsgebiete von hochreichender Konvektion. Im Fall von TITAN liegt der untere Grenzwert der Radarreflektivität bei 35 dBz, wohingegen von WEUST ein unterer Grenzwert von 19 dBz verwendet wird.

An dieser Stelle soll die Notation von WEUSTHOFF und HAUF (2008) für die Benennung von postfrontalen, konvektiven Niederschlagsgebieten eingeführt werden. Somit werden Niederschlagsgebiete, welche ihre gesamte Lebensdauer über nur ein Reflektivitätsmaximum ($p_n = 1$) besitzen, als Einzeller (Abbildung 2.4a) und Niederschlagsgebiete, die durch internes Wachstum mehr als ein Reflektivitätsmaxima aufweisen ($p_n > 1$), als *Single-Cluster* (Abbildung 2.4b) bezeichnet. Niederschlagsgebiete, bei denen Mergingprozesse größere Niederschlagsgebiete bilden oder sich bei Splittingprozessen aufspalten, werden *Multi-Cluster* genannt. Der Einfachheit halber werden *Single-Cluster* und *Multi-Cluster* gelegentlich als *Cluster* zusammengefasst. Wird von Zellen oder Niederschlagsgebieten gesprochen, so sind damit alle oben erwähnten Arten von postfrontalen Niederschlagsgebieten gemeint.

Durch die Trackingmethode von WEUST ist es möglich, die Entwicklung einzelner Nie-

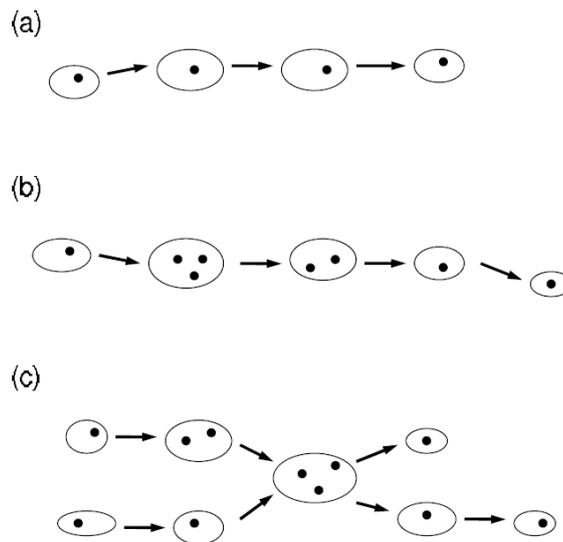


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung konvektiver Niederschlagsgebiete: a) Einzeller, b) Single-Cluster und c) Multi-Cluster. Abbildung entstammt WEUSTHOFF und HAUF (2008) und wurde bearbeitet.

derschlagsgebiete sowie deren Peak-Nummer Entwicklung von Zeitschritt zu Zeitschritt ($\Delta t = 5 \text{ min}$) zu untersuchen. Die jeweils auf diese Weise ermittelten Entwicklungen der Peak-Nummer können in einer einzelnen zweidimensionalen Übergangsmatrix beschrieben werden (siehe Abbildung 2.5). Die Beschreibung erfolgt in der Hinsicht, dass eine Zelle mit n Maxima, welche sich zu einer Zelle mit m Maxima entwickelt, zu einem Ereignis (Eintrag $n \rightarrow m$) in der Übergangsmatrix führt. Ein internes Wachstum im positiven wie auch im negativen Sinne führt ebenfalls zu einem Ereignis in der Übergangsmatrix. Merging- und Splittingprozesse führen zu mehreren Ereignissen und damit mehreren Einträgen in der Übergangsmatrix. Beim Merging von mehreren Zellen zu einem Multi-Cluster wird die Entwicklung jeder einzelnen Zelle hin zum Multi-Cluster separat gezählt (WEUSTHOFF und HAUF 2008A). Beispielsweise führt das Merging zweier Zellen mit $pn_{\text{Zelle1}} = 3$ und $pn_{\text{Zelle2}} = 5$ hin zu einem Multi-Cluster mit $pn_{\text{MClu}} = 8$ zu zwei separaten Ereignissen ($3 \rightarrow 8$ und $5 \rightarrow 8$) in der Übergangsmatrix. Durch parallel zum Merging stattfindendes Wachstum der Zellen ist auch eine Peak-Nummer Entwicklung von $pn_{\text{Zelle1}} + pn_{\text{Zelle2}} \neq pn_{\text{MClu}}$ möglich (Beispiel: $3 \rightarrow 10$ und $5 \rightarrow 10$). Beim Splitting eines Multi-Clusters in z.B. drei Zellen wird dieses durch drei Ereignisse in der Übergangsmatrix berücksichtigt (Beispiel: $9 \rightarrow 5$, $9 \rightarrow 1$ und $9 \rightarrow 3$). Werte auf der Hauptdiagonalen der Übergangsmatrix bedeuten Stagnation, Werte die sich oberhalb der Hauptdiagonalen befinden entsprechen einer Verringerung und Werte unterhalb der Hauptdiagonalen entsprechen einem Wachstum der Peak-Nummer innerhalb des untersuchten Zeitschrittes von fünf Minuten. Charakteristika der in Abbildung 2.5 zu sehenden Übergangsmatrix werden in Kapitel 3 näher erläutert.

$m \backslash n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	222484	11240	1420	344	135	102	45	37	32	24
1	273325	430815	70532	21166	10213	6286	4260	3129	2538	2069	1620
2	13575	78748	56519	20340	7529	3592	1931	1270	902	712	530
3	1631	24353	20857	17932	8809	3856	1869	1037	667	434	367
4	367	11411	7528	9082	7949	4839	2315	1282	588	412	267
5	131	6755	3473	3995	4827	4174	2812	1508	809	444	283
6	90	4511	1853	1803	2435	2811	2534	1847	992	631	347
7	57	3474	1330	988	1223	1557	1843	1660	1327	805	425
8	31	2534	825	618	595	838	1106	1265	1159	904	574
9	39	2048	674	453	402	454	581	766	870	785	677
10	17	1697	512	337	277	270	338	491	574	643	592

Abbildung 2.5: Übergangsmatrix zur Beschreibung der Peak-Nummer Entwicklung zwischen zwei Zeitschritten von n nach m . Werte auf der Hauptdiagonalen bedeuten Stagnation, Werte oberhalb der Hauptdiagonalen stellen eine Verringerung der Peak-Nummer und Werte unterhalb der Hauptdiagonalen ein Wachstum dar. Exemplarisch ist die Übergangsmatrix hier für $n, m \leq 10$ dargestellt. Datenquelle: WEUSTHOFF (2011).

2.5 Lebensdauerverteilung

Die Lebensdauer einer Niederschlagszelle l entspricht der Zeit von der Entstehung der Zelle bis hin zu deren Auflösung. In den Untersuchungen von WEUST zur Lebensdauerverteilung aller Zellen, kam die oben genannte Trackingmethode zur Bestimmung der individuellen Lebensdauern zum Einsatz. Bedingt durch den Tracking-Algorithmus beträgt die minimale Lebensdauer, welche durch den Tracking-Algorithmus erfasst werden kann, 15 Minuten. Diese Zeit rührt daher, dass bei der Identifizierung der Zellenbewegung eine Zelle zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten detektiert werden muss. Die minimal feststellbare Lebensdauer beträgt somit 15 Minuten, was drei Übergängen (Entstehung, Wachstum und Auflösen) zu je 5 Minuten entspricht. Die sich daraus ergebene relative Häufigkeitsverteilung der Zellenlebensdauern ist in Abbildung 2.6 zu sehen. Die relative Häufigkeitsverteilung lässt sich aufgrund der geringen

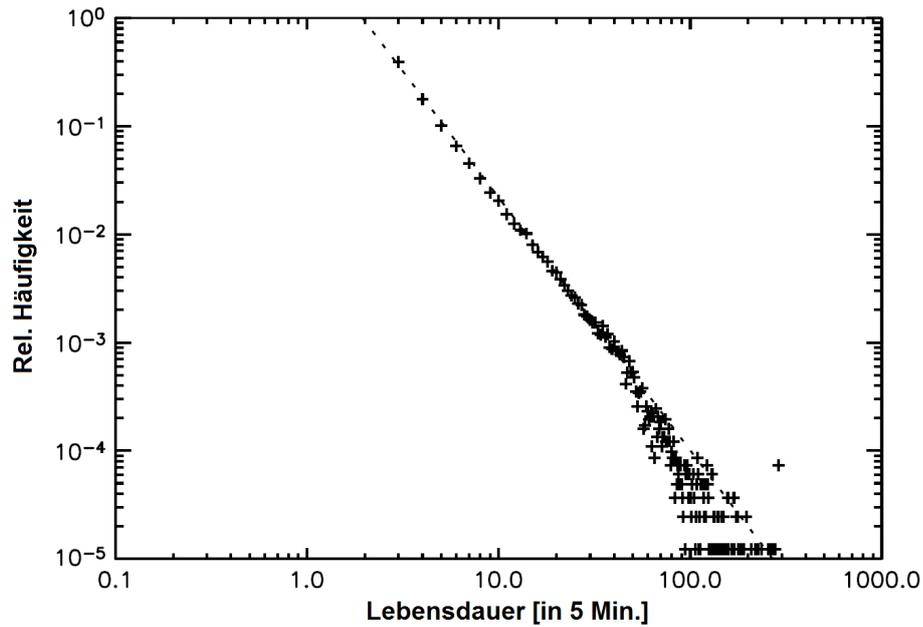


Abbildung 2.6: Lebensdauerverteilung von postfrontalen Niederschlagsgebieten für die untersuchten Tage (schwarze Kreuze). Dargestellt werden kann die Lebensdauerverteilung durch eine Regressionsfunktion (gestrichelte Linie), welche einer Potenzfunktion entspricht (WEUSTHOFF und HAUF 2008A).

Streuung gut durch eine Potenzfunktion (Gleichung 2.1) mit den Parametern $a = 3,94$ und $b = -2,28$ für $15\text{min} \leq l \leq \infty$ darstellen, wobei die Grundlage für die Regressionsfunktion Werte mit $N(l) > 5 \cdot 10^{-4}$ sind.

In diesem Kapitel wurde auf die Untersuchungsergebnisse von THEUSNER (2007), WEUSTHOFF (2008B) und WEUSTHOFF und HAUF (2008A) zu Niederschlagsradar-daten postfrontaler Situationen eingegangen, die sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Beschreibung einiger Charakteristika der erwähnten Niederschlagsgebiete ermöglichen. Eine besondere Rolle spielt dabei die Übergangsmatrix zur Beschreibung der Peak-Nummer Entwicklungen der Niederschlagszellen zwischen zwei Zeitschritten, welche eine wesentliche Grundlage für das in dieser Arbeit beschriebene Schauermodell ist und worauf im nächsten Kapitel eingegangen wird.

3 Modellbeschreibung

Das folgende Kapitel beschreibt das entwickelte Schauermodell zur Simulation von postfrontalen konvektiven Niederschlagszellen. Zuerst erfolgt eine kurze Erläuterung zu den Modellspezifikationen bevor im weiteren Verlauf des Kapitels anhand eines Modellschemas einzelne Programmdetails beschrieben werden.

3.1 Modellspezifikationen

Modellgebiet

Die in Kapitel 2 beschriebenen geometrischen und zeitlichen Untersuchungen von THEUSNER und HAUF (2004), THEUSNER (2007) und WEUST zu postfrontalen Niederschlagszellen beziehen sich auf ein postfrontales Untersuchungsgebiet mit sich ständig ändernder Ausdehnung. Die Ursache hierfür liegt im instationären, postfrontalen Gebiet (Bereich mit und ohne Niederschlag), welches sich durch einen stationären Detektionsbereich des Niederschlagsradarverbundes bewegt. Im Falle einer von Nordwest kommenden Kaltfront, welche sich über Norddeutschland hinweg nach Südosten verlagert, variiert die Schnittmenge von postfrontalem Gebiet und Radardetektionsbereich kontinuierlich. Genau diese Schnittmenge entspricht dem postfrontalen Untersuchungsgebiet der oben genannten Autoren. Im Mittel hat das untersuchte postfrontale Gebiet eine Ausdehnung von ca. 70.000 km^2 in der Nacht und mehr als 300.000 km^2 gegen 16 UTC (THEUSNER und HAUF 2004).

Für das nachfolgend beschriebene Modell wird die Annahme getroffen, dass es sich um ein stationäres Simulationsgebiet handelt, welches eine horizontale Ausdehnung von $500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$ aufweist und einem Gebiet über Norddeutschland entspricht (siehe Abbildung 3.1). Orographische Gegebenheiten, welche z.B. durch Hebung konvektiven

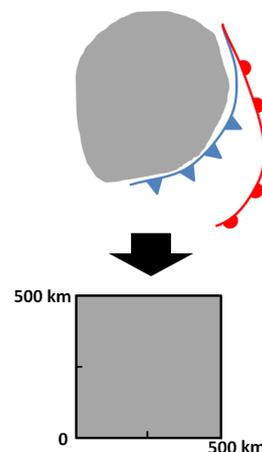


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Überführung des postfrontalen Gebietes in das Modellgebiet.

Niederschlag auslösen können (siehe Kapitel 1.1), werden indirekt über die verwendeten Untersuchungsergebnisse (Häufigkeitsverteilungen und Tagesgänge) der oben genannten Autoren berücksichtigt.

Schauerzellen

Niederschlagsgebiete werden im Schauermodell als individuelle Zellen dargestellt. Die Darstellung entspricht dabei einer zweidimensionalen Niederschlagszelle mit einer Radarreflektivität von mehr als 19 dBz bzw. $0,36 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$. Um die Niederschlagsflächen im Schauermodell mathematisch handhabbar zu machen sowie die benötigte Rechenkapazität in einem adäquaten Bereich zu halten, werden die Zellen durch eine Kreisfläche beschrieben und auf eine detaillierte Form der Niederschlagsfläche verzichtet (siehe Abbildung 3.2). Die im Modell zweidimensional simulierten Zellen entsprechen dem Niederschlagsbereich eines Schauers und nicht einer Zelle wie sie auf einem Satellitenbild zu sehen wäre. Dieser Unterschied rührt daher, dass durch Niederschlagsradarmessungen und Satellitenbilder unterschiedliche Hydrometeore einer Zelle registriert werden. Satelliten registrieren Wolkentröpfchen und durch das Niederschlagsradar wird Niederschlag detektiert, welche nach LILJEQUIST und CEHAK (1979) einen Radius von 0,02 mm bis 0,5 mm bzw. größer als 0,5 mm aufweisen.



Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Überführung einer Niederschlagszelle in eine kreisförmige Zelle.

Advektion

Die Verlagerung der Niederschlagszellen im Schauermodell erfolgt mit dem mittleren Wind in 925 hPa Höhe. Diese Annahme beruht auf Untersuchungen von WEUSTHOFF (2008B), die eine annähernde Übereinstimmung von Zellzugbahnen und Windrichtung im 925 hPa-Niveau gefunden hat. Darüber hinaus wird im Schauermodell ein homogenes Windfeld angenommen, welches keine vertikale Windscherung aufweist ($\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ bzw. $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$). Zyklische Randbedingungen stellen über das gesamte postfrontale Simulationsgebiet eine homogene Verteilung der Zellen, sowohl bei der Anzahl als auch bei den Lebensstadien, sicher. Letzteres

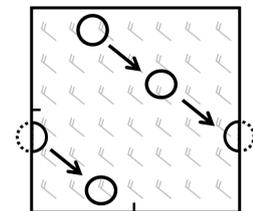


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Randbedingungen und des zugrundeliegenden homogenen Windfeldes.

würde bei nicht-zyklischen Randbedingungen zu einer Unterrepräsentation von langlebigen Zellen im Einströmungsbereich führen, solange dieses nicht kompensiert wird.

Wachstum

Im Schauermodell findet ein individuelles Zellwachstum statt, welches die Lebensdauer einer Zelle von deren Entstehung bis zur Auflösung simuliert. Dieses Zellwachstum basiert auf einer Übergangsmatrix mit der eine zeitliche Simulation der Reflektivitätsmaxima innerhalb einer Zelle erfolgt (siehe Abbildung 3.4). Die Zuordnung von Niederschlagsflächenentwicklungen wird durch eine Häufigkeitsverteilung von Niederschlagsfläche realisiert.



Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Zellentwicklung.

Merging/Splitting

Sämtliche im Schauermodell simulierte Zellen weisen eine individuelle Zellentwicklung auf. Um das in den Niederschlagsradardaten beobachtete Phänomen des Merging von Zellen im Schauermodell abbilden zu können wird ein geometrisches Kriterium verwendet, welches bei der geometrischen Überlappung zweier oder mehrerer Zellen ein Mergingprozess durchführt. Splittingprozesse werden durch ein Grenzwertkriterium bei der Peak-Nummerentwicklung einer Zelle berücksichtigt. Überschreitet die zeitliche Entwicklung der Peak-Nummer innerhalb eines Zeitschrittes einen definierten Grenzwert, so resultiert daraus ein Splittingprozess, bei dem die Zelle in zwei separate Zellen aufgeteilt wird.

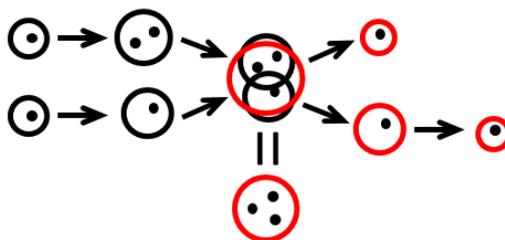


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung eines Merging- und Splittingprozesses.

Eingangsgrößen

Für die Entwicklung einzelner Niederschlagszellen kommen die Übergangsmatrix zur Beschreibung der Peak-Nummernübergänge und die Clustergrößenverteilung als Eingangsgrößen zum Einsatz. Für die Verlagerung der Zellen sind die Windgeschwindigkeit und -richtung des homogenen Windfeldes als Eingangsgrößen erforderlich. Ebenfalls

als Eingangsgröße dient der Tagesgang der Zellenanzahl zur Beschreibung des gesamten Schauerfeldes.

Ausgangsgrößen

Explizite Ausgangsgrößen des Modelles sind zellspezifische Größen zur Beschreibung von Zellen. Dazu zählt die Schwerpunktposition der Zellen, die Zelniederschlagsfläche sowie deren Verlagerungsgeschwindigkeit und -richtung. Sekundär lassen sich aus diesen Ausgangsgrößen weitere Größen zum gesamten simulierten Niederschlagsgebiet ableiten. Dazu zählen beispielsweise die relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer, die relative Lebensdauerverteilung oder die Clustergrößenverteilung.

Initialisierung

Bei der Initialisierung des Schauermodells wird zuerst ein Zellenpool mit 150.000 individuellen Zellentwicklungen (Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung) erzeugt. Aus diesem Zellpool werden zufällig Zellen ausgewählt, mit einer zufälligen Zellposition versehen und für die Anfangssituation im Simulationsgebiet positioniert. Die Anzahl von Zellen, welche aus dem Zellenpool entnommen werden, richtet sich nach einer Funktion $Q_{\text{Soll}}(t)$, die den Tagesgang der Zellenanzahl im Simulationsgebiet beschreibt. Ausgehend von der so generierten Niederschlagsituation startet der Modelllauf bei der internen Uhrzeit 00 UTC mit einem Zeitschritt von $\Delta t = 5$ Minuten.

Nicht simulierte Größen

Bei der Simulation des postfrontalen Niederschlagsfeldes wird auf eine nicht kreisförmige Simulation der Niederschlagszellen verzichtet und die Niederschlagszellen weisen keine inhomogene Verteilung der Niederschlagsrate auf. Desweiteren findet keine positive oder negative Beeinflussung der Bildung von Wolken bzw. konvektiven Niederschlagsgebieten durch die synoptischen Bedingungen statt, wie dieses beispielsweise bei WITHA (2007) erwähnt wird.

3.2 Übergangsmatrix als Modellinput

Zentrale Grundlage für den Modellinput ist die Übergangsmatrix (Abbildung 2.5) mit einer originalen Größe von 256×256 Peak-Nummereinträgen, wobei der Einfachheit

halber nur ein Ausschnitt von 51×51 abgebildet ist. Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben wurde, ist die Übergangsmatrix das Resultat einer lagrangeschen Analyse von 17 unterschiedlichen Tagen mit postfrontalen Niederschlagszellen, bei der ein Tracking-Algorithmus auf die in einem Zeitabstand von fünf Minuten vorliegenden Niederschlagsradar-daten angewendet wurde. Die Übergangsmatrix beschreibt die Übergänge der Peak-Nummer aller Zellentwicklungen (WEUST). Eine Zelle mit n Maxima, welche sich innerhalb eines Zeitschrittes zu einer Zelle mit m Maxima entwickelt, führt in der Übergangsmatrix zu einem Eintrag von $n \rightarrow m$. Abweichend dazu führen Merging- und Splittingprozesse in Abhängigkeit von den Vorgängern und Nachfolgern zu mehreren Einträgen. Jeder Übergang vom Vorgänger zum Multi-Cluster wird beim Merging separat in der Übergangsmatrix berücksichtigt. Splitting eines Clusters in zwei oder mehrere Nachfolger ergibt ebenfalls pro Nachfolger einen Eintrag (Beispiel in Kapitel 2.4).

Abbildung 3.6 zeigt die im Kapitel 2 (Abbildung 2.5) dargestellte Übergangsmatrix als Isolinenplot. In der Übergangsmatrix sind alle Stadien der Zellentwicklung von der Zellgenese über das Wachstum, das Schrumpfen bis hin zur Zellauflösung vorhanden. Deutlich zu erkennen ist, dass ein Großteil der Wachstumsprozesse unter Beteiligung von Zellen mit einstelliger Peak-Nummer stattfindet (rot-oranger Bereich). Darüber hinaus lassen sich einzelne Bereiche der Übergangsmatrix den eben angesprochenen Zellstadien zuordnen. Bei Einträgen auf der Hauptdiagonale handelt es sich um Stagnationsprozesse, wohingegen Einträge oberhalb dieser Hauptdiagonale ein Schrumpfen und Einträge unterhalb ein Wachsen der Zellen bzgl. der Peak-Nummer bedeutet. Wird in einer Spalte der Übergangsmatrix ein gleich großer Bereich oberhalb und unterhalb der Hauptdiagonale betrachtet, so ist zu erkennen, dass eine größere Anzahl von registrierten Übergängen dem Schrumpfen zugeordnet wurde. Diese höhere Wahrscheinlichkeit für das Schrumpfen spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Entwicklung der Zellen, da so das Auflösen der Zellen in deren Lebenszyklus sichergestellt wird und unendlich lange Lebensdauern verhindert werden. Desweiteren weist die Übergangsmatrix im Bereich der Zeile $m = 1$ und der Spalte $n = 1$ eine Häufung von Übergängen auf, was einer Peak-Nummerentwicklung hin zu einem Einzeller bzw. von einem Einzeller hin zu einer Zelle mit einer Peak-Nummer ungleich eins bedeutet. Zur besseren Veranschaulichung der beschriebenen Merkmale der Übergangsmatrix ist in Abbildung 3.7 eine dreidimensionale Darstellung zu sehen. Auf den ersten Blick scheint ein weiteres Merkmal der Übergangsmatrix eine symmetrische Struktur bzgl. der Hauptdiagonalen zu sein. Bei der Betrachtung zweier Nebendiagonalen, beispielsweise punktuell herausgegriffen die Einträge zu den Übergängen von $5 \rightarrow 3$ und $3 \rightarrow 5$, ist zu erkennen, dass die Anzahl der ermittelten Einträge zwar ähnlich groß, jedoch die Übergangsmatrix

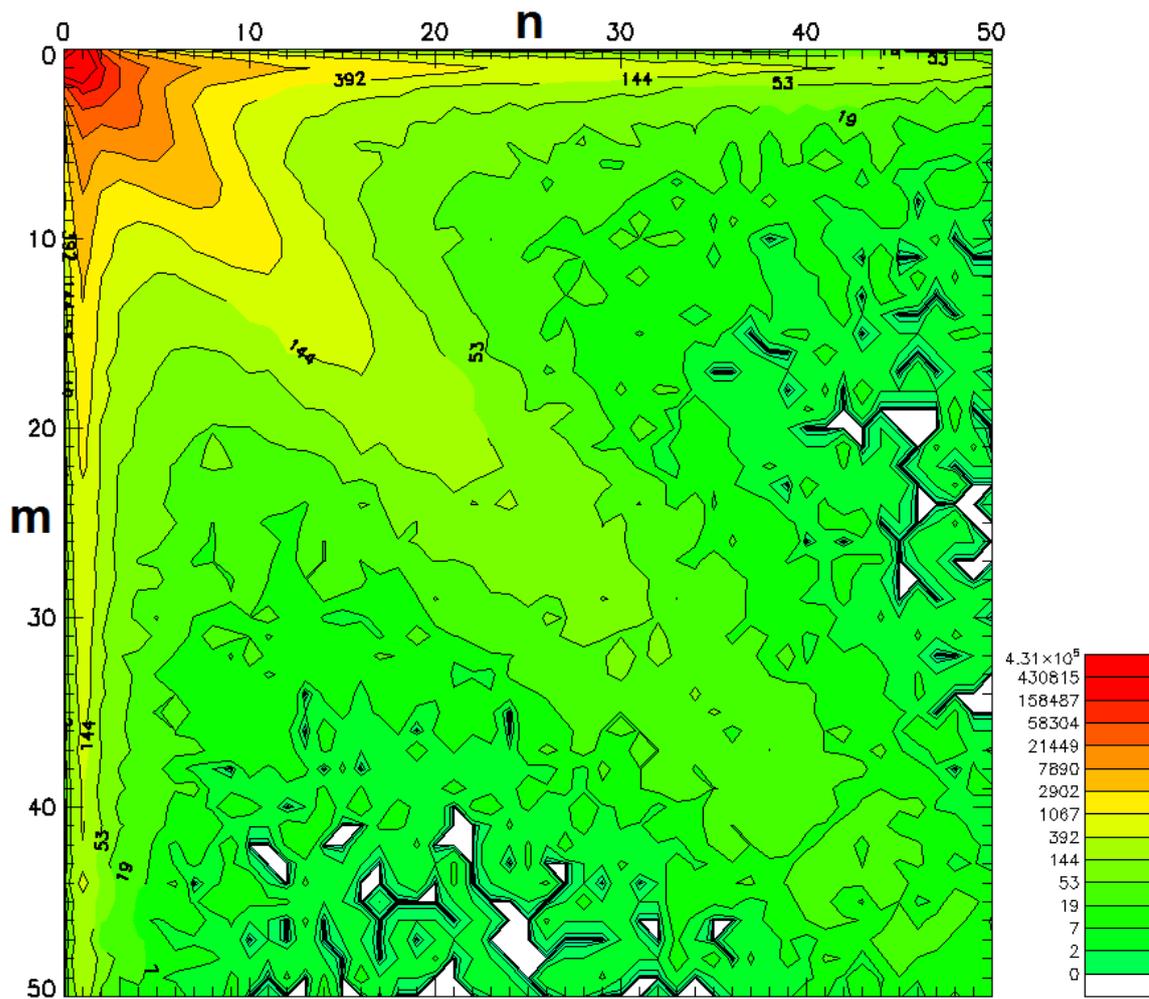


Abbildung 3.6: Isolinienplot der von WEUST ermittelten Übergangsmatrix aus Abbildung 2.5. Charakteristisch für die Übergangsmatrix ist die ausgeprägte Hauptdiagonale, welche die vorkommende Stagnation widerspiegelt. Der Einfachheit halber wird die Peak-Nummer nur bis 50 dargestellt. Datenquelle: WEUSTHOFF (2011).

nicht symmetrisch ist. Der dabei im Wachstumsbereich der Übergangsmatrix gelegene Wert weist i.d.R. einen höheren Wert auf als der symmetrisch gelegene Eintrag im Bereich mit negativer Peak-Nummer Wachstum. Das Überwiegen des Wachstumsbereich gegenüber des Bereiches mit negativem Wachstum bedeutet keinen Widerspruch zu der oben genannten höheren Wahrscheinlichkeit für das Schrumpfen, da für die Beschreibung der Peak-Nummerentwicklung eine spaltenweise Betrachtung ($n \rightarrow m$) erforderlich ist. Bei dieser spaltenweisen Betrachtung überwiegt die Wahrscheinlichkeit für ein negatives Wachstum.

Die Verwendung der Übergangsmatrix als Input für das Schauermodell macht eine Anpassung in einigen Matrixeinträgen notwendig. Die Notwendigkeit besteht, da die

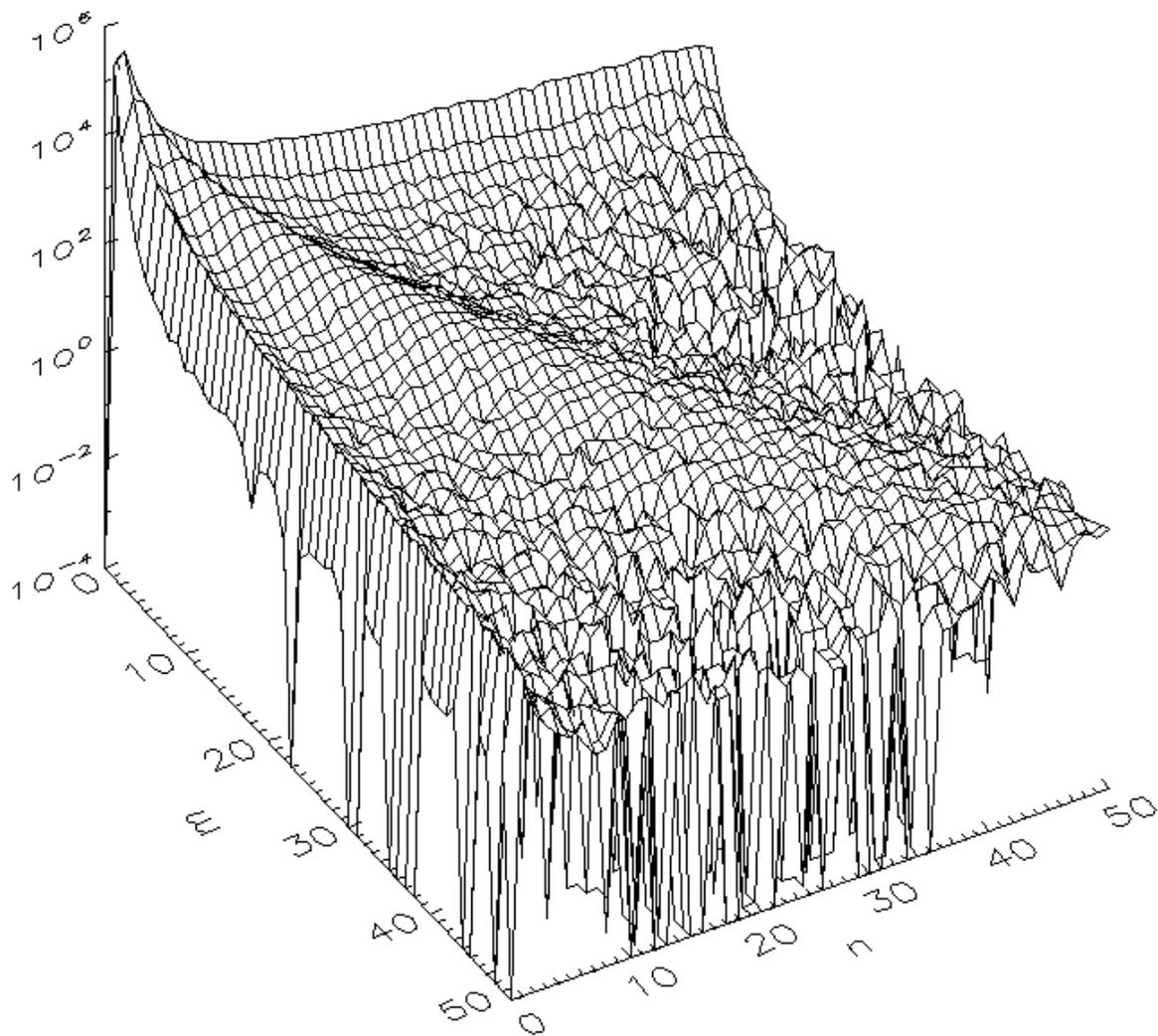


Abbildung 3.7: Dreidimensionale Darstellung der Übergangsmatrix aus Abbildung 2.5. Es ist die Peak-Nummer bis 50 dargestellt. Datenquelle: WEUSTHOFF (2011).

in der Matrix vorhandenen Übergänge aus Beobachtungen stammen und somit hohen Peak-Nummern eine geringe Auftrittswahrscheinlichkeit besitzen. Die geringe Auftrittswahrscheinlichkeit hat zur Folge, dass trotz der großen Grundgesamtheit von Zellen die von WEUST ermittelten Übergangsmatrix Übergänge aufweist, welche selten bzw. gar nicht auftreten und somit Nullstellen darstellen. In der Übergangsmatrix äußert sich das in den Spalten für hohe Peak-Nummern, in denen zum Teil nur ein bzw. gar kein Übergang vorhanden ist. In einigen Fällen kann dieses dazu führen, dass der Prozess für die Generierung von Peak-Nummerentwicklungen einer Zelle einen Peak-Nummernverlauf erstellt, der ab einem bestimmten Zeitpunkt nur noch wechselweise zwei Peak-Nummern annimmt.

Zur Vermeidung der erwähnten Problematik findet eine Idealisierung der Übergangsmatrix

trix statt, welche auf der einen Seite die Eliminierung der Nullstellen bewirken soll, auf der anderen Seite jedoch die typische Charakteristik der Übergangsmatrix unverändert lässt. Der Einfachheit halber wird die ursprüngliche Übergangsmatrix im Folgenden als $MO_{n,m}$ bezeichnet. Für diese Idealisierung wurde zuerst eine Untersuchung von $MO_{n,m}$ hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, dass sich bei einem Peak-Nummer-Übergang eine Zelle hin zu größeren bzw. hin zu kleineren Peak-Nummern entwickelt, durchgeführt. Der sich daraus ergebende Zusammenhang zwischen Wachsen und Schrumpfen ist in Abbildung 3.8 (b) zu sehen. Dabei wurde das Verhältnis der jeweiligen Spaltensumme oberhalb ($\sum_{m=0}^{n-1} MO_{n,m}$) mit der zugehörigen Spaltensumme unterhalb der Hauptdiagonalen ($\sum_{m=n+1}^{\max m} MO_{n,m}$) betrachtet, was dem Schrumpfen bzw. Wachsen der Zellen entspricht. Die Spaltensummen für das Schrumpfen und Wachsen sind separat in Abbildung 3.8 (a) dargestellt, wobei schwarz der Summe der Übergänge mit negativem Wachstum und grün der Übergänge mit positivem Wachstum zugeordnet wird. Es ist dabei zu sehen, dass bei den Übergängen das Schrumpfen überwiegt. Die Idealisierung der Übergangsmatrix $MO_{n,m}$ wurde ab der Peak-Nummerspalte 40 durchgeführt, da ab dieser Spalte Nulleinträge im möglichen Wachstumsbereich der Niederschlagszellen auftreten. Die idealisierte Form von $MO_{n,m}$ wird als $M_{n,m}$ bezeichnet. Die Idealisierung erfolgte, indem zu sämtlichen, in der jeweiligen Spalte vorhandenen Einträgen (auch der Nulleinträge), Übergänge hinzuaddiert wurden. Dabei wurden im Wachstumsbereich von $MO_{n,m}$ (unterhalb der Hauptdiagonalen) sämtliche Einträge einer Spalte mit eins addiert, um Nulleinträge zu unterbinden. Zu den zugehörigen Spalteneinträgen im Bereich des Schrumpfens (oberhalb der Hauptdiagonalen) wurden homogene Einträge hinzuaddiert, so dass das Verhältnis von Wachstum zu Schrumpfen in der neuen Übergangsmatrix $M_{n,m}$ bei 1:5 liegt. Dieses Verhältnis entspricht den Schrumpfen-Wachstums-Verhältnis des Peak-Nummern-Bereiches 25 bis 50. Abbildung 3.8 (c) zeigt die Spaltensummen von $M_{n,m}$ oberhalb und unterhalb der Hauptdiagonalen, wobei schwarz wieder Schrumpfen und grün Wachsen entspricht. Es fällt auf, dass durch die Idealisierung die Spaltensummen bei einer Peak-Nummer von 40 einen Sprung aufweisen, was auf das Anheben der absoluten Anzahl von Übergangseignissen im Rahmen der Idealisierung zurückzuführen ist. Für das Schauermodell ist dieser Umstand vernachlässigbar, da nur das Verhältnis von Wachsen zu Schrumpfen relevant ist. Die in Abbildung 3.8 (c) und (d) zu sehenden schwarzen Verteilungen weisen bei hohen Peak-Nummern Welleneffekte auf, welche von der Idealisierung der Übergangsmatrix herrühren. Der spaltenweise Wachstumsbereich unterhalb der Hauptdiagonalen steht, wie oben erwähnt, zum Schrumpfbereich im Verhältnis von 1:5. Da für hohe Peak-Nummern nur wenige Ereignisse in der originalen Übergangsmatrix auftauchen

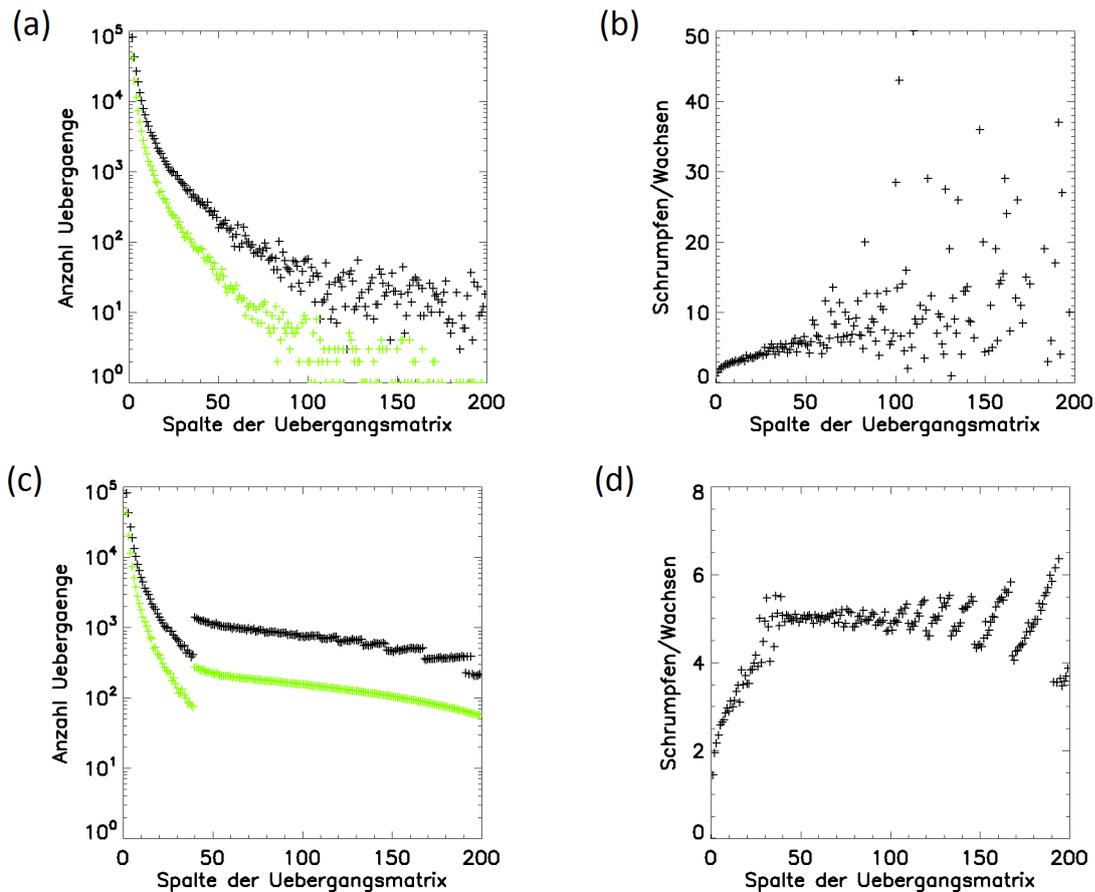


Abbildung 3.8: (a) Darstellung der Spaltensummen der Übergangsmatrix oberhalb und unterhalb der Hauptdiagonalen, was den Summen der Übergängen mit negativem Peak-Nummer-Wachstum (schwarz) bzw. positivem Peak-Nummerwachstum (grün) entspricht. (b) Verhältnis von negativem und positivem Peak-Nummerwachstum. (c) Gleiche Darstellung wie (a), nur mit angepassten Einträgen der Übergangsmatrix in einem Verhältnis des positivem zum negativem Wachstum von 1:5. (d) Wie (b) nur mit angepasster Übergangsmatrix.

und die angepassten Einträge der Übergangsmatrix nur um ganzzahlige Werte erhöht werden können, kommt es zu den erwähnten Welleneffekten.

Anhand des Modellschemas (Abbildung 3.11) wird nun der Modellablauf erläutert. Von zentraler Bedeutung ist dabei die eben diskutierte und idealisierte Übergangsmatrix $M_{n,m}$, mit der im Voraus ein Pool von Zellenentwicklungen berechnet wird. Zu diesen Zellenentwicklungen gehören jeweils sowohl eine Peak-Nummerentwicklung als auch eine Niederschlagsflächenentwicklung. Diesem Pool von Zellenentwicklungen werden zu einem späteren Zeitpunkt je nach Bedarf Zellen entnommen und im Schauermodell als neu entstandene Zellen platziert.

Ausgangspunkt für die Berechnung einer einzelnen Zellenentwicklung für den Pool ist eine Start Peak-Nummer. Diese Start Peak-Nummer ergibt sich aus der ersten Spalte der

Übergangsmatrix, welches den Übergängen $0 \rightarrow m$ entspricht, wobei die Einschränkung $1 \leq m \leq 3$ gilt. Diese Einschränkung beruht auf WEUSTHOFF und HAUF (2008A), die die Entstehung von Clustern mit einer Peak-Nummer von mehr als drei innerhalb eines 5-Minuten-Zeitraumes als unwahrscheinlich einstufen. Die dennoch in der Übergangsmatrix enthaltenen Einträge mit $0 \rightarrow m$ für $m > 3$ sind nach WEUSTHOFF und HAUF (2008A) wahrscheinlich auf Zellen zurückzuführen, die bereits länger als fünf Minuten existieren, jedoch aufgrund technischer Probleme im Vorfeld nicht detektiert worden sind. Ein Beispiel hierfür ist die Verlagerung eines Clusters in den Detektionsbereich des Niederschlagsradarverbundes hinein. Für die Berechnung der Start Peak-Nummer wird eine Normierung bzgl. der Summe des oben genannten Spaltenbereiches $M_{0,m}$ durchgeführt. Daraus ergibt sich der jeweilige relative Anteil der einzelnen Start Peak-Nummermöglichkeiten für den gewählten Spaltenbereich. In Kombination mit einem Zufallszahlengenerator, welcher gleichverteilte reelle Zahlen im Bereich $x_{\text{zufall}} \in \mathbb{R}$ mit $0 \leq x_{\text{zufall}} \leq 1$ erzeugt, ist die Berechnung einer konkreten Start Peak-Nummer möglich.

In der Übergangsmatrix $M_{n,m}$ (vgl. in Abbildung 2.5) ist keine eindeutige Unterscheidung zwischen internem Wachstum und Merging bzw. zwischen internem Schrumpfen und Splitting möglich. Im Bereich der Hauptdiagonalen ist das Zustandekommen von Übergängen durch internes Wachstum wahrscheinlicher, wohingegen bei einem größeren Abstand innerhalb einer Spalte zur Hauptdiagonalen Merging- und Splittingübergänge wahrscheinlicher sind. Die weitere Entwicklung der Peak-Nummer soll durch internes Wachstum erfolgen. Für die Umsetzung des ausschließlichen internen Wachstums erfolgt die Annahme, dass die weitere Berechnung der Peak-Nummerentwicklung einer Begrenzung der Übergänge $n \rightarrow m$ von $n - 3 \leq m \leq n + 3$ unterliegt. Diese Begrenzung orientiert sich an den Begrenzung der oben genannten Start-Peak-Nummer, wobei in Fall von $n - 3 < 0$ gilt, $0 \leq m \leq n + 3$. Für die mathematische Handhabbarkeit dieser Begrenzung im Schauermodell erfolgt auf Grundlage von $M_{n,m}$ die Berechnung einer modifizierten Übergangsmatrix $M3_{n,m}$, welche nur die Einträge von $M_{n,m}$ im Bereich von ± 3 um die Hauptdiagonale ($m = n \pm 3$) enthält. Die Übergangsmatrizen $M_{n,m}$ und $M3_{n,m}$ unterscheiden sich nicht in dem genannten Bereich um die Hauptdiagonale. Die Notwendigkeit der zusätzlichen Übergangsmatrix $M3_{n,m}$ kommt erst bei der konkreten Berechnung der Peak-Nummern für die einzelnen Entwicklungsschritte einer Zelle zum Tragen, da in die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten der Peak-Nummer nur der genannten Bereich von ± 3 um die Hauptdiagonale mit einfließen darf. Konkret wird die nächste Peak-Nummer nach der Entstehung auf Grundlage der aktuellen Peak-Nummer berechnet, was im ersten Schritt der Zellentwicklung der Start Peak-Nummer entspricht. Ausgehend von dieser aktuel-

(a)		(b)				
m	n	0	1	2		
	0				1	2
0	0	80	19	0,00	0,33	0,12
1	95	100	65	0,86	0,42	0,41
2	15	60	75	0,14	0,25	0,47

Abbildung 3.9: Vereinfachtes Beispiel einer 3×3 Übergangsmatrix mit der absoluten Anzahl von Peak-Nummerübergängen (a) und der zugehörigen relativen Anzahl von Übergängen (b). In rot ist eine mögliche Peak-Nummerentwicklung ($0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0$) dargestellt.

len Peak-Nummer wird mit den Übergangsereignissen $m = n \pm 3$ in $M3_{n,m}$ bzw. mit den sich daraus ergebenden Übergangswahrscheinlichkeiten die nächste Peak-Nummer berechnet. Dieser Schritt wiederholt sich so lange bis die Peak-Nummer null beträgt und somit die Lebensdauer der Zelle erreicht ist.

Zur Veranschaulichung der Peak-Nummerberechnung folgt ein vereinfachtes Beispiel auf Grundlage einer nicht aus Beobachtungen stammenden 3×3 Übergangsmatrix (siehe Abbildung 3.9(a)). Abbildung 3.9(b) zeigt die zugehörigen Übergangswahrscheinlichkeiten für Peak-Nummerübergänge $n \rightarrow m$. Am Anfang der Peak-Nummerentwicklung soll in diesem Beispiel eine Zelle mit der Peak-Nummer eins stehen, welche sich mit einer 86-prozentigen Wahrscheinlichkeit gemäß der Spalte $n = 0$ der Übergangsmatrix gebildet hat. Diese Peak-Nummer bildet nun die Grundlage für die nachfolgende Peak-Nummerentwicklung gemäß der Spalte $n = 1$. Diese Spalte sagt aus, dass eine 33-prozentige Wahrscheinlichkeit für einen Peak-Nummerübergang $1 \rightarrow 0$, eine 42-prozentige Wahrscheinlichkeit für einen Peak-Nummerübergang $1 \rightarrow 1$ und eine 25-prozentige Wahrscheinlichkeit für einen Peak-Nummerübergang $1 \rightarrow 2$ besteht. Der modellinterne Prozess für die Peak-Nummerentwicklung nutzt die aus dieser Spalte resultierende relative Häufigkeitsverteilung um die nachfolgende Peak-Nummer, in diesem Fall zwei, zu berechnen. Ausgehend von der Peak-Nummer zwei erfolgt die Berechnung der Peak-Nummer für den nächsten Zeitschritt. Die Berechnung einer weiteren Peak-Nummer erfolgt so lange bis die Peak-Nummer null erreicht ist. Im hier gezeigten Beispiel ergibt sich eine Peak-Nummerentwicklung von $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0$, welche in Abbildung 3.9(b) rot markiert ist.

Die hier als Beispiel genannte 3×3 Übergangsmatrix diene zu Erklärungszwecken und würde keine Entwicklungen mit größeren Peak-Nummer zulassen. Eine Peak-

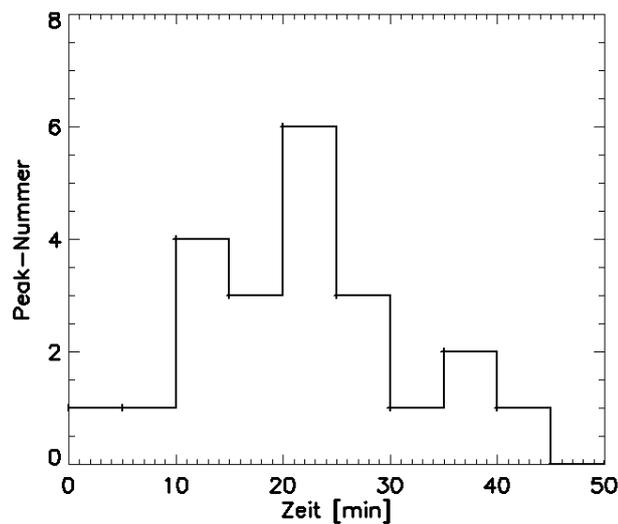


Abbildung 3.10: Peak-Nummerentwicklung die aus der im Schauermodell verwendeten Übergangsmatrix $M_{3_{n,m}}$ berechnet wurde.

Nummerentwicklung wie sie sich aus der im Schauermodell verwendeten Übergangsmatrix $M_{3_{n,m}}$ ergeben würde ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

Der oben genannte Prozess für die Entwicklung der Peak-Nummer wird, ausgehend von einer Start Peak-Nummer gemäß der ersten Spalte der Übergangsmatrix, kontinuierlich wiederholt um einen Pool von Zellentwicklungen zu erzeugen. Dieser Pool umfasst insgesamt 150.000 individuelle Zellentwicklungen, ist als Input für das Schauermodell allerdings erst zu dem Zeitpunkt relevant wenn neue Zellen im Simulationsgebiet des Schauermodells generiert werden müssen. Die beschriebene Berechnung des Pools mit Peak-Nummerentwicklungen findet vor dem eigentlichen Modelllauf statt und ist mit der Minimierung der genutzten Rechenleistung während der zeitlichen Simulation des Niederschlagsfeldes begründet. Werden während des Modelllaufs neue Zellen generiert, so werden zufällig Zellentwicklungen aus dem Pool entnommen und einer neu Generierten Zelle zugeordnet. Eine ausführliche Beschreibung der Zellgeneration wird in Kapitel 3.3.6 beschrieben. Die beschriebene Berechnung eines Pools mit individuellen Zellentwicklungen entspricht in Abbildung 3.11 dem rechten Bereich des dort zu sehenden Modellschemas.

3.3 Zeitliche Simulation

Nach der Beschreibung des Pools für die Zellenentwicklungen, soll nun auf den Hauptteil des Modelles eingegangen werden, welcher in Modellschema (siehe Abbildung 3.11)

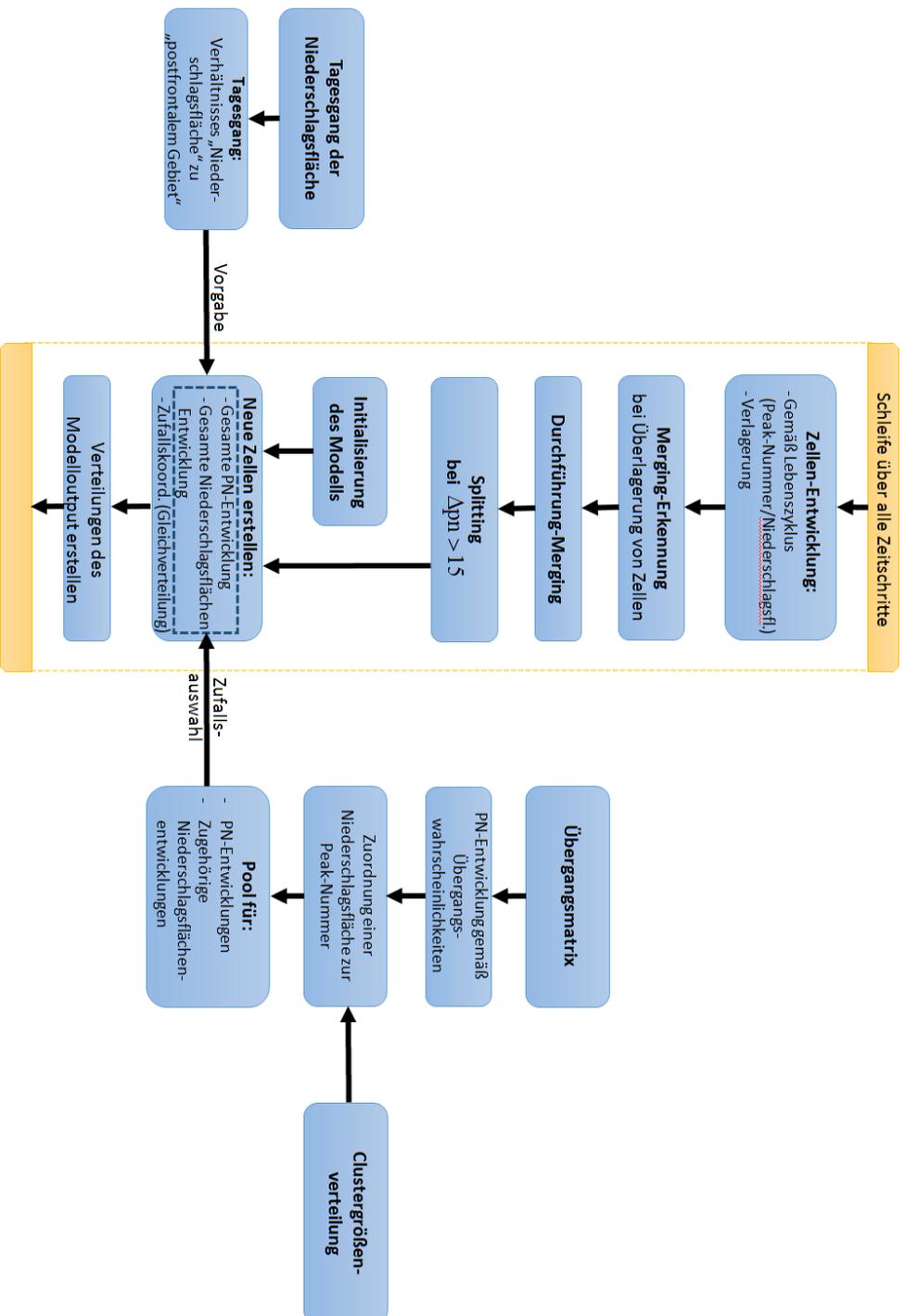


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung des Modells zur Simulation von postfrontalen Niederlagsgebieten. Der orange Bereich kennzeichnet den Hauptteil des Schanemodells in dem die zeitlichen und räumlichen Entwicklungen der Zellen simuliert werden. Rechts des orangen Bereiches ist die Berechnung von Peak-Nummerentwicklungen und der zugehörigen Niederlagsflächenentwicklungen dargestellt und links davon die Flächenvorgabe des zu simulierenden Niederlagsgebietes.

als oranger Bereich dargestellt ist. Auf den ersten Blick scheint die Simulation von postfrontalen Schauern trivial, da bei einer zufälligen Platzierung von Zellen im Simulationsgebiet, der Verwendung einer mittleren zeitlichen Zellentwicklung und einer zusätzlichen Verlagerung von Zellen mit dem Wind recht schnell ein Niederschlagsfeld erzeugt werden könnte. Dieser triviale Ansatz, welcher sich nur auf die genannten drei Punkte bezieht, würde jedoch dazu führen, dass einige sehr wichtige Aspekte nicht berücksichtigt werden. Zu diesen Aspekten gehören z.B. das Merging und Splitting von Zellen. Insbesondere das Merging von Zellen, welches die Bildung von großen Zellen ermöglicht, kann nicht durch eine mittlere zeitliche Entwicklung einer einzelnen Zelle beschrieben werden, da dafür eine Interaktion mit anderen Zellen notwendig ist. Desweiteren muss bei Splittingprozessen oder bei der Interaktion von Zellen die zu Mergingprozessen führt festgelegt werden, was die Kriterien für diese Prozesse sind und wie sich die beteiligten Zellen bei diesen Prozessen entwickeln. Da die erwähnten Aspekte ein sehr wichtiger Teil postfrontaler Situationen sind, sollen diese nicht außen vor gelassen werden, wodurch ein wesentlich diffizilerer Modellansatz notwendig ist, welcher u.a. individuelle Zellenentwicklungen und Interaktionen der Zellen untereinander ermöglicht.

Der Hauptteil des Modells besteht im Wesentlichen aus Komponenten für die zeitliche Entwicklung der einzelnen Zellen bzw. deren Verlagerung, weiteren für die Erkennung und Durchführung von Mergingprozessen, ebenso wie für Splittingprozesse, für die Generation von neuen Zellen, sowie für die Analyse der Simulation. Die Initialisierung des Modells ist in dem Modellschema (siehe Abbildung 3.11) gekennzeichnet und wird im Abschnitt 3.3.7 erläutert.

3.3.1 Zellenentwicklung

Im ersten Programmteil finden die Zellenentwicklung und die Verlagerung der Zellen statt. Die im Modell generierten Zellen besitzen eine Peak-Nummer- und eine Niederschlagsflächenentwicklung, welche für die gesamte Lebensdauer vorberechnet wurden (siehe Kapitel 3.2 bzw. Abschnitt 3.3.6). Dadurch kann an dieser Stelle des Modelles die Rechenzeit verringert werden, da nur noch der Wert für den nächsten Zeitschritt der Peak-Nummer und der Niederschlagsfläche übernommen werden muss. Desweiteren findet in diesem Modellabschnitt eine Verlagerung der Zellen mit dem Wind statt. Die Annahme für das Modell ist eine Windgeschwindigkeit von $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aus nordwestlicher Richtung, betrachtet in einer Höhe von 925 hPa. Diese Werte für Windgeschwindigkeit und -richtung sind typisch für eine postfrontale Situation. Diese Annahme der Verlagerungsart folgt den Untersuchungen von WEUSTHOFF (2008B), die eine annähernde

Übereinstimmung von Zellzugbahnen und Strömungsrichtung des Windes im 925 hPa-Niveau gefunden hat. Darüber hinaus wird eine einheitliche Windgeschwindigkeit und -richtung in der Vertikalen angenommen, so dass insgesamt gesehen ein homogenes Windfeld ohne vertikale Windscherung vorhanden ist. Zellen die am Ende ihrer individuellen Lebensdauer angelangt sind, welches einer Peak-Nummer von Null entspricht, werden in diesem Programmteil nicht gelöscht, sondern als aufgelöste Zellen markiert. Zur Berücksichtigung der aufgelösten Zellen in der später beschriebenen Analyse des simulierten Niederschlagsgebietes wird die Markierung einem Löschen vorgezogen. Die vollständige Löschung und somit Freigabe des Speicherplatzes erfolgt nach der eben erwähnten Analyse. Zellentwicklungen, Verlagerungen und ggf. Markierungen der Zellen werden sowohl für Einzeller als auch für Cluster durchgeführt. Ebenfalls findet eine Markierung von Zellen statt, welche im aktuellen Zeitschritt geteilt (Splittingprozess) werden. Detaillierter wird auf die Kriterien des Splitting im Abschnitt 3.3.4 eingegangen.

3.3.2 Mergingerkennung

Vor dem eigentlichen Mergingprozess findet eine Berechnung statt, bei der alle Zellen bestimmt werden, die in dem aktuellen Zeitschritt an Mergingprozessen beteiligt sind. Merging ist im Modell als die räumliche Überlagerung zweier oder mehrerer Zellen definiert. Diese Überlagerung kann, wie im Kapitel 1.1 beschrieben wurde, durch verschiedene Prozesse, wie z.B. durch die horizontale Expansion von Zellen, durch konvergierende Zugbahnen oder das Heranwachsen eines neuen konvektiven Schauers neben einer bestehenden Zelle, zustande kommen. Aufgrund des im Modell angenommenen homogenen Windfeldes findet Merging nur durch horizontale Expansion der Zellen statt. Diese Beschränkung des Modelles auf eine Mergingursache kann als angemessen angenommen werden, da Untersuchungen von WESTCOTT (1994) und WEUSTHOFF und HAUF (2008A) ergeben haben, dass die horizontale Expansion der Zellen der Hauptgrund für Mergingprozesse sind. Bei dieser Berechnung läuft es auf Vergleichsprozesse hinaus, bei der alle Zellen bzgl. des Abstandes zueinander verglichen werden. Dazu wird jede sich in der Simulation befindliche Zelle einzeln darauf überprüft, ob es zu Überlagerungen mit anderen Zellen kommt. Zur Laufzeitoptimierung des Modelles wird dazu erst eine Methode mit geringer Laufzeit angewendet, mit deren Hilfe Zellen von vornherein ausgeschlossen werden können, die sich definitiv nicht mit den gerade betrachteten Zellen überlagern. Nur Zellen, welche dicht genug an der zu überprüfenden Zelle liegen, um überhaupt in Betracht zu kommen (sog. Zellkandidaten), werden intensiver bzgl. ihrer Abstände untersucht. Die Zellkandidaten werden folgendermaßen

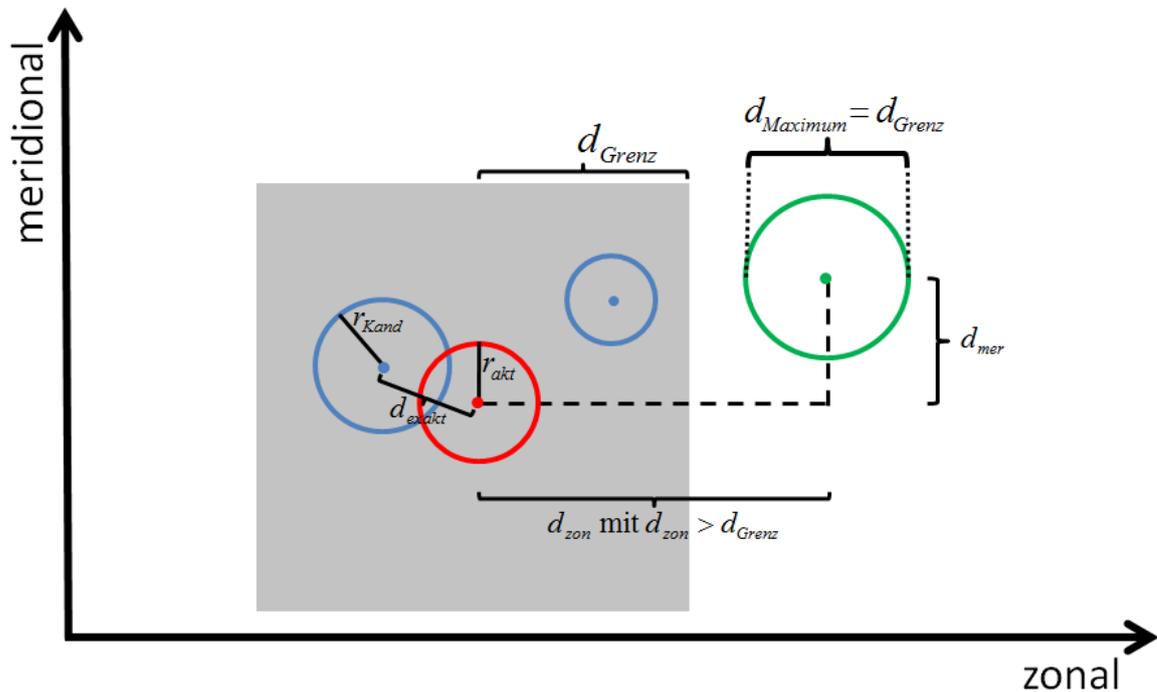


Abbildung 3.12: Darstellung der Mergingerkennung. Zu der gerade betrachtete Zelle Z_{akt} (rot) wird der Abstand zu den umliegenden Zellen untersucht. Zellen, welche außerhalb des grauen Bereiches liegen ($|d_{\text{zon}}|$ bzw. $|d_{\text{mer}}| > d_{\text{Grenz}}$), in dem eine Überschneidung mit Z_{akt} möglich wäre, sind in grün dargestellt. Zellen (blau), welche sich innerhalb des grauen Bereiches befinden, kommen als Zellkandidaten für einen Mergingprozess in Betracht. Das eigentliche Merging findet nur mit sich überlappenden Zellen statt ($|d_{\text{exakt}}| \leq r_{\text{akt}} + r_{\text{Kandidat}}$)

ermittelt:

1. Es wird der Abstand in zonaler Richtung bzgl. der Zellmittelpunkte aller in der Simulation vorhandenen Zellen zur gerade untersuchten Zelle bestimmt. Als Grenzwert dient der doppelte Zellenradius der größten in der Simulation vorkommenden Zelle (siehe Abbildung 3.12), welches dem Durchmesser $d_{\text{Grenz}} = 2 \cdot r_{\text{max}}$ entspricht. Die Idee bei dieser Methode ist, dass Zellen mit einem zonalen bzw. meridionalen Abstand von mehr als d_{Grenz} zur betrachteten Zelle Z_{akt} (rot) sich nicht überschneiden können. Der erste Schritt ist die Berechnung der Abstände in zonaler Richtung d_{zon} zu Z_{akt} . Zellen mit einem Abstand von $|d_{\text{zon}}| > d_{\text{Grenz}}$ (außerhalb des grauen Bereiches) überschneiden sich nicht mit Z_{akt} und können somit für die weitere Berechnung unbeachtet bleiben (grüne Zelle). Alle Zellen mit $|d_{\text{zon}}| \leq d_{\text{Grenz}}$ werden bzgl. ihres Abstandes nun in meridionaler Richtung d_{mer} zu Z_{akt} betrachtet (siehe nächsten Schritt). Die Abstandsbetrachtung findet über den Modellrand (zyklischen Randbedingungen) hinaus statt.
2. Die verbleibenden Zellen werden hinsichtlich ihres Abstandes in meridionaler

Richtung überprüft. Die Abstandsüberprüfung findet erneut nach dem gleichen Prinzip, nur in meridionaler Richtung, statt. Zellen mit $|d_{mer}| > d_{Grenz}$ werden aussortiert, wohingegen die verbleibenden Zellen mit $|d_{mer}| \leq d_{Grenz}$ im nächsten Schritt intensiver untersucht werden.

3. Die verbliebenen Zellkandidaten (blaue Zellen) werden nach dieser ersten Prüfung einer exakteren Abstandsprüfung zu Z_{akt} unterzogen. Hierbei wird der Abstand d_{exakt} der gerade betrachteten Zelle Z_{akt} zu jedem einzelnen Zellkandidaten betrachtet. Zellen, bei denen der Abstand zwischen den Zellzentren kleiner ist als die Summe aus den beiden Radien der beteiligten Zellen, also $|d_{exakt}| < r_{akt} + r_{Kandidat}$, weisen eine Überlappung auf und sind somit zwei Zellen, die einen Mergingprozess erfahren.
4. Nach der Berechnung der sich mit der Z_{akt} überlappenden Zellen werden die Identifikationsnummer (IDs) der betreffenden Zellen als Gruppe in einem Array gespeichert. Durch die Abstandsüberprüfung sämtlicher in der Simulation vorhandener Zellen kann es vorkommen, dass mehrfache Gruppierungen von Zell-IDs auftauchen. Als Beispiel sei hier das Szenario genannt, dass sich Zelle 1 und 2 überlappen. Die Abstandsüberprüfung von Zelle 1 führt zu dem Ergebnis, dass sich diese mit Zelle 2 überlappt. Ebenso führt die Abstandsüberprüfung von Zelle 2 dazu, dass es eine Überlappung mit Zelle 1 gibt. Die Verhinderung von solchen Doppelgruppierungen und die korrekte Gruppierung von IDs werden durch eine ID-Verwaltung bewerkstelligt. Im nachfolgenden Abschnitt findet das eigentliche Merging mithilfe des hier erstellten Arrays statt.

Die beschriebene Methode wird auf alle in der Simulation vorhandenen Zellen angewendet.

3.3.3 Merging

Letzter Schritt führte zur Berechnung eines Arrays, in dem gruppenweise Zell-IDs gespeichert wurden, welche im jetzigen Schritt des Mergings zusammengeführt werden. Zum besseren Verständnis befinden sich alle Zell-IDs, welche zu einem Multi-Cluster zusammengeführt werden sollen, in einer Zeile des Array. Jede einzelne Zeile entspricht somit einem Multi-Cluster. Das Merging findet zeilenweise mit den Zell-IDs des Arrays statt. Befindet sich ein Cluster unter den Zellen, so wird dieser Cluster bzw. dessen ID für den zukünftigen neuen Multi-Cluster übernommen (sog. Primärzelle). Im Falle der Abwesenheit eines Multi-Clusters dient die erste Zelle mit ihrer ID als Basis bzw. Primärzelle. Die Zusammenführung der jeweiligen Zelleneigenschaften wie

Peak-Nummer, Niederschlagsfläche, Position usw. wird im Folgenden erläutert:

- **Peak-Nummer:** Beim Übergang zum aktuellen Zeitschritt haben die Zellen ein Peak-Nummerwachstum erfahren. Im Falle des Mergingprozesses werden die jeweiligen Peak-Nummern der beteiligten Zellen summiert und bilden die neue Peak-Nummer des Multi-Clusters. Die im Schauermodell befindlichen Einzeller und Single-Cluster haben bei deren Entstehung eine Peak-Nummerentwicklung aus dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Zellen-Pool bekommen. Bei der Peak-Nummerberechnung wurde eine maximale Entwicklung von ± 3 pro Zeitschritt angenommen, um nur internes Wachstum zu simulieren. Aufgrund der stärker ausgeprägten Wachstumsprozesse von Multi-Clustern, bei denen auch externe Prozesse wie z.B. Merging und Splitting zu einem Peak-Nummer Wachstum beitragen, reicht eine Beschränkung des Peak-Nummerwachstums auf ± 3 nicht aus. Durch Simulationen mit dem hier beschriebenen Modell konnte gezeigt werden, dass bei der eben genannten Beschränkung von ± 3 trotz Merging keine höheren Peak-Nummern gemäß der Peak-Nummerverteilung (siehe Abbildung 2.1) erreicht werden konnten. Aus diesem Grund gilt für die Peak-Nummerentwicklung bei Multi-Clustern eine höhere Beschränkung der Übergänge $n \rightarrow m$ mit $n - 15 \leq m \leq n + 15$, wobei ein Übergang, welcher zu einer Verringerung der Peak-Nummer führt, von mehr als 15 zulässig ist, jedoch als Splitting gewertet wird (siehe Kapitel 3.3.4). Die getroffene Annahme des Grenzwertes für Splittingprozesse von 15 soll zwei Umständen gerecht werden. Auf der einen Seite ermöglicht er Multi-Clustern genug Spielraum für interne Peak-Nummerentwicklungen. Auf der anderen Seite existiert aber auch eine nicht zu hohe Hürde für das Auftreten von Splittingprozessen. Für die Umsetzung im Schauermodell wurde analog zur Übergangsmatrix $M_{3n,m}$ (siehe Kapitel 3.2) aus $M_{n,m}$ die modifizierte Übergangsmatrix $M_{15n,m}$ berechnet, welche nur die Übergänge $n \rightarrow m$ mit $0 \leq m \leq n + 15$ enthält.

Ab dem Zeitpunkt des Mergings wird die gesamte Peak-Nummerentwicklung für den zukünftigen Verlauf des Multi-Clusters gemäß $M_{15n,m}$ vorberechnet, wie dieses auch schon für die im Kapitel 3.2 beschriebenen Zellen des Zellpools erfolgte. Im Vergleich zur Peak-Nummerentwicklung für Zellen des Zellpools beginnt die Berechnung der Peak-Nummerentwicklung nicht bei null sondern bei der Peak-Nummer die sich aus der Addition der beteiligten Zellen ergibt.

- **Niederschlagsfläche:** Die Niederschlagsfläche ergibt sich aus der Summe aller am Mergingprozess beteiligter Zellen, wobei die zukünftige Niederschlagsflächenentwicklung abhängig von der oben erwähnten Peak-Nummerentwicklung ist.

Berechnet wird die Niederschlagsfläche für alle zukünftigen Zeitschritte dieses Multi-Clusters gemäß der Clustergrößenverteilung (siehe Abbildung 2.3). Eine genau Beschreibung der Berechnung findet in Abschnitt 3.3.6 statt. Die zugeordnete Niederschlagsfläche ist dabei von der Peak-Nummer des jeweils betrachteten zukünftigen Zeitschrittes abhängig.

- **Position:** Die neue Position $(x_{\text{MClu}}, y_{\text{MClu}})$ des Multiclusters geht aus einem gewichtetem Mittel der ursprünglichen Zellen (Mittelpunkt der Zelle) hervor. Dabei erfolgt die Gewichtung gemäß der jeweiligen Niederschlagsfläche A_i der am Prozess beteiligten Zellen wie folgt

$$x_{\text{MClu}} = \sum_i x_i \cdot \frac{A_i}{A_{\text{ges}}} \quad , \quad y_{\text{MClu}} = \sum_i y_i \cdot \frac{A_i}{A_{\text{ges}}} \quad . \quad (3.1)$$

Dabei entsprechen x_i, y_i der Position der am Merging Prozess beteiligten Zellen und für die Gesamtniederschlagsfläche gilt $A_{\text{ges}} = \sum_i A_i$.

- **Zellebensdauer:** Die bisherige Lebensdauer des neuen Multi-Clusters entspricht der bisherigen Lebensdauer der Primärzelle.

Das im Schauermodell umgesetzte Merging beeinflusst die Entwicklung der am Mergingprozess beteiligten Niederschlagszellen. Die ursprünglichen Zellen folgen einer Peak-Nummerentwicklung die aus $M3_{n,m}$ berechnet wurde und auch die Lebensdauer dieser Zellen beruht auf dieser Übergangsmatrix. Durch das Merging und die damit verbundene Neuberechnung der Peak-Nummerentwicklung nach $M15_{n,m}$ kann sich eine Lebensdauer ergeben, welche deutlich länger ist als es die ursprünglichen Lebensdauern der beteiligten Zellen gewesen wären. Die sich aus den Mergingprozessen ergebenden meist längeren Lebensdauern entsprechen nicht mehr der Lebensdauererzeugung des Zellpools, welcher auf der Übergangsmatrix $M3_{n,m}$ basiert. Dieser Umstand braucht jedoch nicht negativ gewertet werden, da insgesamt gesehen die Wiedergabe der ursprünglichen Übergangsmatrix $M_{n,m}$ durch das Modell entscheidend ist und nicht die Wiedergabe von $M3_{n,m}$, welche ein Teil von $M_{n,m}$ ist.

Desweiteren sei erwähnt, dass in der verwendeten Übergangsmatrix $M_{n,m}$ zwar Mergingprozesse enthalten sind jedoch Einträge in der Übergangsmatrix nicht eindeutig Merging-, Splitting- oder internen Wachstumsprozessen zugeordnet werden können. Das daraus resultierende, beschriebene geometrische Kriterium für Mergingprozesse ermöglicht die Berücksichtigung von Merging, stellt jedoch einen Wachstumsprozess dar, welcher nicht direkt aus der Übergangsmatrix folgt.

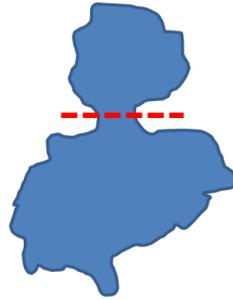


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung einer Niederschlagszelle bei der es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Splittingprozess kommt (rot).

3.3.4 Splitting

Splitting, also das Aufteilen eines Schauers in mehrere Zellen, wird im Modell ebenso berücksichtigt wie das Merging. Die Schwierigkeit bei der Modellintegration besteht darin, den richtigen Zeitpunkt für das Splitting zu simulieren. Anhand von Niederschlagsradarbildern sind Splittingprozesse mit dem bloßen Auge recht einfach zu erkennen. Verdeutlichen soll das die schematische Darstellung einer Niederschlagszelle in Abbildung 3.13. Diese Zelle weist eine verengte Stelle auf (rote Markierung) und würde als real existierende Zelle im weiteren Verlauf der Zellenentwicklung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit in zwei Teile aufgesplittet. Bei der Simulation im Schauermodell kann die Zellform nicht als Indikator für einen bevorstehenden Splittingprozess verwendet werden, da im Schauermodell kreisförmige Niederschlagszellen zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund muss ein alternatives Kriterium für einen Splittingprozess gewählt werden, welches einen geeigneten Splittingzeitpunkt festlegt. Als Kriterium dafür dient die Änderung der Peak-Nummer pro Zeitschritt. Wie in Kapitel 3.3.3 erwähnt, wird bei Multi-Clustern im Falle einer Peak-Nummeränderung von bis zu ± 15 pro Zeitschritt von internem Wachstum gesprochen. Für das Modell wird daher eine Verringerung von $n - m > 15$ pro Zeitschritt als Splitting festgelegt.

Für die Umsetzung des Splittings im Modell kommt das oben genannte Kriterium bzgl. der Änderung der Peak-Nummer pro Zeitschritt zur Anwendung. Die Erkennung des Splitting findet dabei bereits im Programmteil der Zellenentwicklung statt (siehe Abschnitt 3.3.1 bzw. Abbildung 3.11). Fand eine Peak-Nummerentwicklung von $n \rightarrow m$ mit $n - m > 15$ statt, so erfolgte eine Markierung der entsprechenden Multi-Clusters. Die Markierung ist erforderlich, um ein paralleles Splitting und Merging des zu splittenden Multi-Clusters im vorherigen Programmteil zu verhindern. Das eigentliche Splitting des Multi-Clusters geschieht in diesem Programmteil und soll anhand eines Multi-Clusters mit dem Übergang $n \rightarrow m$ mit $n = 23$ und $m = 6$ verdeutlicht werden (siehe Abbildung 3.14). Die Verringerung der Peak-Nummer überschreitet den

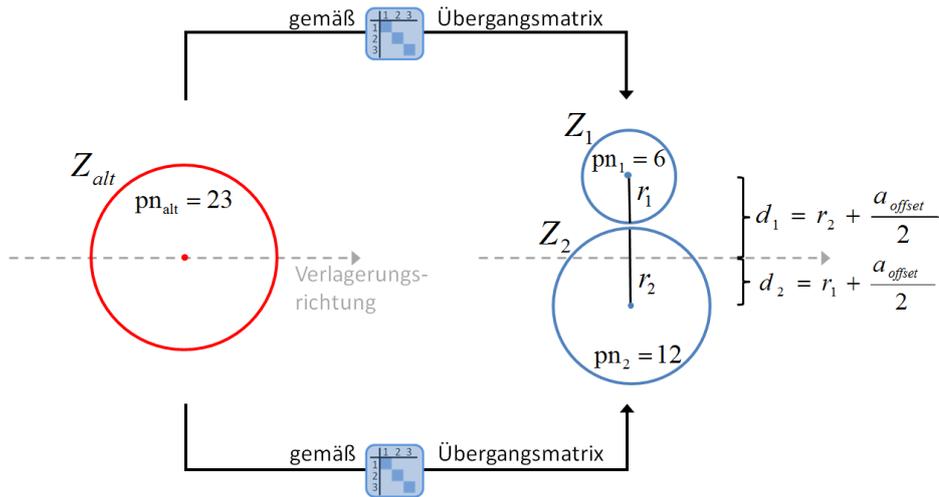


Abbildung 3.14: Darstellung eines Splittingprozesses. Der rot markierte Multi-Cluster wird im Rahmen des Splittings in zwei Zellen (blau) überführt, bei denen die jeweiligen Übergänge gemäß der Übergangsmatrix folgen. Der dargestellte Übergang von Z_{alt} nach Z_1 entspricht dem ursprünglichen Übergang, welcher als Splitting erkannt wurde (Kriterium: $pn_{alt} - pn_1 = n - m > 15$).

Grenzwert $n - m > 15$, wodurch der betreffende Multi-Cluster Z_{alt} (rote Zelle) für das Splitting markiert wird. Das in diesem Programmteil durchgeführte Splitting ist so definiert, dass es eine Teilung des Multi-Clusters in zwei Zellen Z_1 und Z_2 (blaue Zellen) vorsieht. Der bereits simulierte Peak-Nummerübergang gemäß der Übergangsmatrix liefert die neue Peak-Nummer $pn_1 = 6$ von Z_1 . Die Peak-Nummer pn_2 von Z_2 könnte sich trivialerweise aus der Differenz Δpn zwischen dem letzten und dem aktuellen Zeitschritt ergeben und wäre somit $\Delta pn = n - m = 17$. Da dieser Übergang von Z_{alt} hin zu Z_2 nicht den Übergangswahrscheinlichkeiten der Übergangsmatrix entspricht, wird eine alternative Methode verwendet, um abweichende Peak-Nummerübergänge gemäß der Übergangsmatrix so gering wie möglich zu halten. Die neue Peak-Nummer pn_2 von Z_2 wird anhand der Übergangsmatrix berechnet (in Abbildung 3.14 bspw. $pn_2 = 12$). Die Summe der beiden jeweiligen Peak-Nummern muss nicht der ursprünglichen Peak-Nummer entsprechen. Auf diese Weise folgen beide Übergänge hin zu den gesplitteten Zellen Z_1 und Z_2 der Übergangsmatrix.

Ein Splitting auf Peak-Nummerebene alleine ist nicht ausreichend, um einen kompletten Splittingprozess zu beschreiben. Desweiteren ist ein räumliches Splitting durch die Bestimmung neuer Positionen für Z_1 und Z_2 notwendig. Dafür werden die Mittelpunkte der gesplitteten Zellen, welche der jeweiligen Zellposition entsprechen, ausgehend von der Position des zu splittenden Multi-Clusters, horizontal und in Abhängigkeit der Multi-Cluster-Radien um die Distanz d_1 bzw. d_2 in einem zufälligen Winkel zur Wind-

/Ausbreitungsrichtung verschoben. Ausgedrückt wird dieses durch

$$d_1 = (r_1 + r_2) - r_1 + \frac{a_{\text{offset}}}{2} \quad , \quad (3.2)$$

$$d_2 = (r_1 + r_2) - r_2 + \frac{a_{\text{offset}}}{2} \quad , \quad (3.3)$$

wobei a_{offset} einen vordefinierten Abstand zwischen den gesplitteten Zellen darstellt und in dieser Arbeit 1 km beträgt. Dieser Abstand dient zur geografischen Trennung der Zellen.

Im Mergingprozess ist eine Vorberechnung der Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung (siehe Abschnitt 3.3.6) bis zur theoretischen Auflösung des Schauers inbegriffen, welches einer Peak-Nummer von null entspricht. Sollte es im zeitlichen Verlauf dieses Clusters zu einem weiteren Splitting- oder Mergingprozess kommen, so findet eine erneute Berechnung der Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung statt.

Zu einem früheren Zeitpunkt der Modellentwicklung erfolgte das Verschieben der gesplitteten Zellen senkrecht und nicht in einem zufälligen Winkel zur Wind-/Ausbreitungsrichtung, was jedoch Kaskadeneffekte begünstigte. Diese Kaskadeneffekte entstanden bei mehreren hintereinander folgenden Splittingprozessen eines Multi-Clusters in Kombination mit einer hohen Zelldichte und wurden durch eine bevorzugte Verschiebungsrichtung bei Splittingprozessen begünstigt. Zur Folge hatte dies, dass eine sehr breite Zellgruppe (Squallline) entstehen konnte (siehe Abbildung 3.15), welche nach einigen Zeitschritten eine stark zunehmende Niederschlagsfläche aufwies und somit sämtliche Zellen des simulierten postfrontalen Niederschlagsfeldes beinhaltete, da aufgrund des starken Anwachsens der Zellgruppe keine neuen Zellen generiert wurden.

Die Übergangsmatrix sieht eine Peak-Nummerentwicklung bis 254 vor. Theoretisch besteht die Möglichkeit, dass dieser Fall während des Modelllaufes auftritt und somit keine weitere positive Peak-Nummerveränderung mehr möglich ist. Allerdings ist statistisch ein solcher Fall sehr unwahrscheinlich, wird jedoch im Modell abgefangen. Dazu wird der betreffende Multi-Cluster dem oben beschriebenen Splittingprozess unterworfen und somit, bis auf eine Ausnahme, geteilt. Die Ausnahme betrifft die Peak-Nummer, welche nicht wie beim Splittingprozess gemäß der Übergangsmatrix berechnet, sondern auf beide gesplittete Zellen zu gleichen Teilen aufgeteilt wird.

3.3.5 Berechnung der Übergangsmatrix

Zum Vergleich der vom Modell simulierten Peak-Nummerübergängen mit den Übergängen der als Modellinput dienenden Übergangsmatrix $M_{n,m}$ wird eine Übergangsmatrix

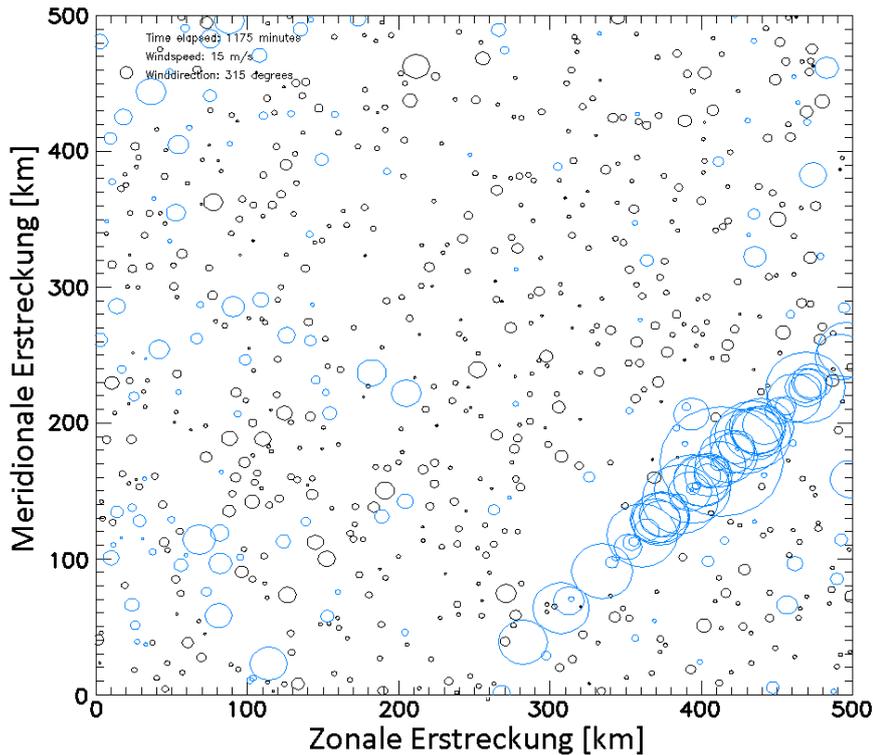


Abbildung 3.15: Kaskadeneffekt, der durch eine bevorzugte Verschiebungsrichtung beim Splitting begünstigt wird.

nach den gleichen Kriterien wie in WEUSTHOFF und HAUF (2008A) erstellt. Die aus den Peak-Nummerübergängen des Schauermodells erstellte Übergangsmatrix enthält sämtliche Übergänge von Einzellern, Single-Clustern und Multi-Clustern. Somit ist eine Überprüfung der sich aus dem Schauermodell ergebenden Peak-Nummerentwicklungen möglich, welche eine Kombination aus $M_{3n,m}$ und $M_{15n,m}$ basierenden Peak-Nummerentwicklungen und aus modellintern beeinflussten Peak-Nummerentwicklungen (z.B. Merging) sind. Im Anschluss an die Erstellung der Übergangsmatrix findet die endgültige Löschung von Zellen statt, welche wie im Abschnitt 3.3.1 beschrieben markiert wurden. Somit fließen auch die Übergänge $n \rightarrow 0$ in die hier beschriebene Analyse mit ein.

3.3.6 Generierung von Zellen

Vorgabe der Anzahl von Niederschlagszellen im Modell

Für die Simulation von Zellen ist eine Sollfunktion erforderlich, welche die Anzahl von Zellen im Simulationsgebiet vorgibt. Aufgrund fehlender Daten wird in dem hier beschriebenen Modell auf eine Sollfunktion zurückgegriffen, welche den mittleren Ta-

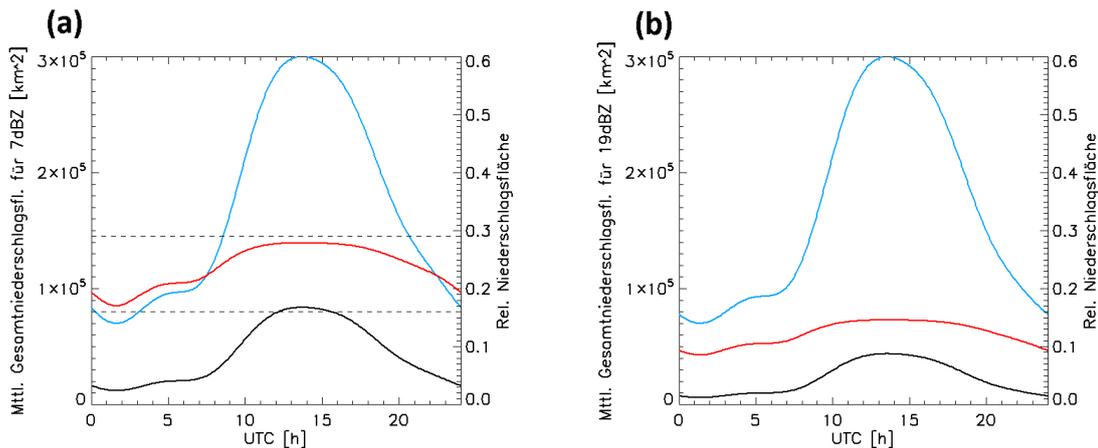


Abbildung 3.16: Tagesgang der postfrontalen Niederschlagsfläche in Relation zum gesamten postfrontalen Gebiet (rote Kurve) für die Reflektivität 7 dBZ (a) und 19 dBZ (b). Die schwarzen Kurven entsprechen den jeweiligen Tagesgängen des postfrontalen Niederschlagsgebietes nach THEUSNER (2007). In blau dargestellt sind die rekonstruierten Tagesgängen des postfrontalen Gebietes (Gebiete mit und ohne Niederschlag). Die horizontal gestrichelten Linien (a) entsprechen dem relativen Bereich, in dem sich nach THEUSNER und HAUF (2004) die Werte des relativen Tagesgang der Niederschlagsfläche bewegen.

gesgang der relativen Niederschlagsfläche für postfrontale Gebiete beschreibt, im Folgenden als $\bar{r}(t)$ bezeichnet. Der Tagesgang $\bar{r}(t)$ stellt nicht die Entwicklung Niederschlagsfläche eines einzelnen postfrontalen Ereignisses dar, sondern einen mittleren Tagesgang auf der Basis mehrerer postfrontaler Situationen. Über $\bar{r}(t)$ erfolgt schließlich die Kontrolle der Anzahl der sich im Schauermodell befindlichen Zellen.

Zuerst wird auf den mittleren Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche eingegangen. Die mittlere absolute Niederschlagsfläche $\bar{n}(t)$ in einem postfrontalen Gebiet folgt nach THEUSNER (2007) einem charakteristischen Tagesgang (siehe Abschnitt 2.2). Ins Verhältnis gesetzt zur Gesamtfläche des postfrontalen Gebietes $\bar{p}(t)$ ergibt sich der relative Tagesgang $\bar{r}(t) = \frac{\bar{n}(t)}{\bar{p}(t)}$. Da $\bar{r}(t)$ nicht direkter Gegenstand der Untersuchungen von THEUSNER und HAUF (2004), THEUSNER (2007) und WEUST gewesen ist, findet eine indirekte Berechnung von $\bar{r}(t)$ statt. Ausgangspunkt der Berechnung von $\bar{r}(t)$ ist der mittlere Tagesgang der Niederschlagsfläche $\bar{n}(t) = f(t)$ aus Gleichung 2.2 (siehe Abbildung 2.2). Desweiteren ist der mittlere Tagesgang der Fläche des postfrontalen Gebietes $\bar{p}(t)$ erforderlich. Dieser Tagesgang des postfrontalen Gebietes war nicht Teil der Untersuchungen von THEUSNER und HAUF (2004), THEUSNER (2007) und WEUST, allerdings liefert THEUSNER und HAUF (2004) ein Maximum und Minimum des postfrontalen Gebietes mit 300.000 km² bzw. 70.000 km². Der Umstand, dass durch THEUSNER und HAUF (2004) charakteristische Punkte für $\bar{p}(t)$ und gleichzeitig der Tagesgang für die Niederschlagsfläche gegeben sind, führt zur Verwendung des mittleren Tagesganges $\bar{n}(t)$ von THEUSNER und HAUF (2004) anstatt von WEUST.

Eine gemischte Verwendung des mittleren Tagesganges nach WEUST und der charakteristischen Punkte nach THEUSNER und HAUF (2004) ist nicht möglich, da in den dortigen Untersuchungen unterschiedliche Radarabdeckungsbereiche betrachtet wurden, die bei der hier notwendigen relativen Betrachtung zu ungenauen Ergebnissen führen würden. Mit Hilfe des eben genannten Maximums und Minimums des postfrontalen Gebietes erfolgt eine Generierung des Tagesganges der Fläche des mittleren postfrontalen Gebietes $\bar{p}(t)$, wobei der charakteristische Verlauf von $\bar{n}(t)$ auf $\bar{p}(t)$ übertragen wird. Die Übertragung erfolgt mit Niederschlagsgebieten ab einer Reflektivität von 19dBZ (Tabelle 2.1), da sämtliche für das Modell verwendete Inputdaten sich auf die Reflektivitätsuntergrenze von 19dBZ beziehen. Die Übertragung des Tagesganges geschieht wie folgt, wobei die Indizes der Tagesgänge die untere Reflektivitätsgrenze der betrachteten Niederschlagsdaten kennzeichnen:

Zur Berechnung von $\bar{p}_{19}(t)$ (siehe blaue Kurve in Abbildung 3.16 (b)) ist eine Normierung von $\bar{n}_{19}(t)$ bzgl. des Maximum $\bar{n}_{19}(t_{\max})$ und des Minimum $\bar{n}_{19}(t_{\min})$ notwendig (siehe Abbildung 3.17)

$$\bar{p}_{19\text{Norm}}(t) = \frac{\bar{n}_{19}(t) - \bar{n}_{19}(t_{\min})}{\Delta\bar{n}_{19}} \quad (3.4)$$

mit $\Delta\bar{n}_{19} = \bar{n}_{19}(t_{\max}) - \bar{n}_{19}(t_{\min})$. Aus der Normierung folgt mit der Vorgabe der oben erwähnten charakteristischen Punkte des Tagesganges der Fläche des postfrontalen Gebietes $\bar{p}_{19}(t_{\max}) = 300.000 \text{ km}^2$ und $\bar{p}_{19}(t_{\min}) = 70.000 \text{ km}^2$

$$\bar{p}_{19}(t) = \bar{p}_{19\text{Norm}}(t) \cdot \Delta\bar{p}_{19} + \bar{p}_{19}(t_{\min}) \quad (3.5)$$

mit $\Delta\bar{p}_{19} = \bar{p}_{19}(t_{\max}) - \bar{p}_{19}(t_{\min})$. Die daraus resultierende Fläche des postfrontalen Gebietes $\bar{p}_{19}(t)$ ist in Abbildung 3.16 (b) (blaue Kurve) zu sehen. Zur Überprüfung der Annahme und Vorgehensweise zur Berechnung des mittleren Tagesganges $\bar{p}_{19}(t)$ wird der mittlere Tagesgang der Niederschlagsfläche $\bar{n}_7(t)$ für die untere Reflektivitätsgrenze von 7 dBZ verwendet und in Verbindung mit $\bar{p}_{19}(t)$ die mittlere relative Niederschlagsfläche $\bar{r}_7(t)$ berechnet. Zu $\bar{r}_7(t)$ ist bekannt, dass die mittlere relative Niederschlagsfläche des postfrontalen Gebietes in der Nacht ein Minimum von 16 % und zu 13 UTC ein Maximum von 29 % aufweist (THEUSNER und HAUF 2004). Dieser Bereich von 16 % bis 29 % ist in Abbildung 3.16 (a) durch horizontal gestrichelte Linien dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der rekonstruierte mittlere Tagesgang $\bar{r}_7(t)$ für eine untere Reflektivitätsgrenze von 7 dBZ die durch THEUSNER und HAUF (2004) gegebenen charakteristischen Punkte bis auf eine Abweichung von ca. einem Prozent wiedergegeben wird. Desweiteren wird auch das durch THEUSNER und HAUF (2004) beschriebene weitere Minimum zu Tagesbeginn wiedergegeben, was darauf zurückzuführen ist, dass es in den Morgenstunden zwar zu einer schnellen Entwicklung von Zellen kommt, die hori-

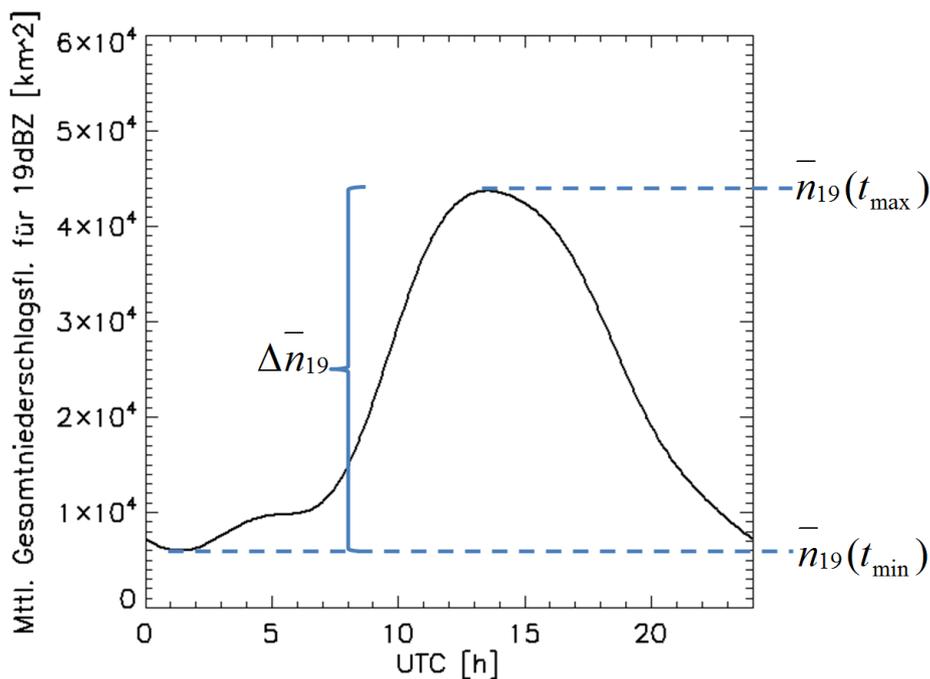


Abbildung 3.17: Der mittlere Tagesgang der Niederschlagsfläche $\bar{n}(t)$ für die Reflektivität von 19 dBZ übertragen auf den Tagesgang der Fläche des postfrontalen Gebietes $\bar{p}_{19}(t)$. Das Maximum und Minimum, $\bar{n}_{19}(t_{\max})$ bzw. $\bar{n}_{19}(t_{\min})$, dienen der Normierung des Tagesganges.

zontale Ausdehnung dieser Zellen jedoch noch gering ist und dadurch das Gebiet mit postfrontalen Zellen stärker anwächst als die postfrontale Niederschlagsfläche. Dieses lokale Minimum ist in dem rekonstruierten Tagesgang allerdings nicht deutlich erkennbar vorhanden, sondern äußert sich eher als Sattelpunkt gegen 6:30 UTC. Da sowohl die Charakteristika als auch Minimum und Maximum der oben genannten Autoren für den Grenzwert 7 dBz wiedergegeben werden, wird angenommen, dass somit auch die Übertragung des Verfahrens auf die Tagesgänge für die untere Reflektivitätsgrenze von 19 dBZ adäquat und somit der mittlere Tagesgang $\bar{r}_{19}(t)$ als Input für das Modell geeignet ist.

$\bar{r}_{19}(t)$ ergibt sich daher aus dem Verhältnis zwischen den mittleren Tagesgängen der postfrontalen Niederschlagsfläche und dem postfrontalen Gebiet, zu

$$\bar{r}_{19}(t) = \frac{\bar{n}_{19}(t)}{\bar{p}_{19}(t)} \quad . \quad (3.6)$$

Das Verhältnis der Niederschlagsfläche für eine Reflektivität ab 19 dBZ ist in Abbildung 3.16 (b) (rote Kurve) dargestellt. Mit der konstanten Modellfläche $A_{\text{Mod}} = 500 \text{ km} \cdot 500 \text{ km}$ und der relativen Niederschlagsfläche aus Gleichung 3.6 ergibt

sich die Sollfunktion für die Modellniederschlagsfläche

$$\bar{n}_{\text{Soll}}(t) = \bar{r}_{19}(t) \cdot A_{\text{Mod}} \quad . \quad (3.7)$$

Mit dieser Sollfunktion lässt sich der zeitabhängige Quellterm, bezogen auf einen Zeitschritt von 5 Minuten, für die Zellengenerierung berechnen, wobei im Fall einer zu großen simulierten Niederschlagsfläche keine Generierung von Zellen stattfindet. Die Anzahl von neu zu generierenden Zellen zum Zeitpunkt t ergibt sich wie folgt:

$$Q_{\text{Soll}}(t) = \begin{cases} g_{\text{gen}} \cdot (\bar{n}_{\text{Soll}}(t) - n_{\text{Ist}}(t)) \cdot \frac{1}{A_{\text{Zelle}}}, & \text{für } \bar{n}_{\text{Soll}}(t) > n_{\text{Ist}}(t) \\ 0, & \text{für } \bar{n}_{\text{Soll}}(t) \leq n_{\text{Ist}}(t) \end{cases} \quad . \quad (3.8)$$

Hierbei ist $n_{\text{Ist}}(t)$ die aktuelle postfrontale Niederschlagsfläche und \bar{A}_{Zelle} die mittlere Fläche einer Zelle mit der Peak-Nummer eins, die aus Untersuchungen von WEUSTHOFF und HAUF (2008A) hervorgegangen ist und 12 km^2 beträgt. Im Fall von $\bar{n}_{\text{Soll}}(t) \leq n_{\text{Ist}}(t)$ wird kein neuer Schauer im Modell generiert. Zur besseren Steuerung der Generierung von Schauer im Modell findet eine Multiplikation mit dem Faktor g_{gen} statt, auf dessen Wert in Kapitel 4 eingegangen wird. Im weiter Verlauf dieser Arbeit dient i.d.R. der mittlere relative Tagesgang der Niederschlagsfläche $\bar{r}_{19}(t)$ als Modellinput und wird modellintern gemäß Gleichung 3.7 und 3.8 in einen Tagesgang der Anzahl neu zu generierender Zellen überführt.

Wie am Anfang dieses Kapitels erwähnt, stellt der Tagesgang $\bar{r}_{19}(t)$ nicht die Entwicklung der Niederschlagsfläche eines einzelnen postfrontalen Ereignisses, sondern das Mittel der Niederschlagsflächenentwicklung mehrerer postfrontaler Situationen dar. Deshalb ist die Verwendung eines realistischen Quellterms $Q_{\text{Soll}}(t)$ für eine einzelne postfrontale Situation aufgrund der in dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten nicht möglich. Zur Umsetzung einer einzelnen postfrontalen Situation wäre die vorherige separate Detektion dieser durch ein Niederschlagsradar notwendig. Zu beachten wäre dabei, dass nicht alle Niederschlagsgebiete von Beginn einer postfrontalen Situation an durch das verwendete Niederschlagsradar Netzwerk detektiert werden können. Insbesondere postfrontale Situationen über Norddeutschland, welche in Verbindung mit einer Kaltluftadvektion aus nordwestlicher Richtung steht, erreichen unter Umständen erst im Laufe ihrer Entwicklung den Detektionsbereich des deutschen Niederschlagsradar Netzwerkes. Somit wird eine Schnittmenge zwischen postfrontalen Gebiet und Detektionsbereich des Niederschlagsradars erst zu einem späteren Zeitpunkt der Entwicklung erreicht und eine Aussage über die Anzahl von Zellen während des Entstehungsprozesses der postfrontalen Situation ist nicht möglich. Die Wahl müsste somit

auf eine postfrontale Situation fallen, welche eine möglichst lange Präsenz im Detektionsbereich des Radarnetzwerkes hat. Der so ermittelte und von der Zeit abhängige Quellterm muss in Relation zur Größe des Simulationsgebiets gesetzt werden, was wieder über die relative Niederschlagsfläche möglich wäre. Die Simulation entspräche somit einer Situation in der eine nächtliche Kaltfront das Simulationsgebiet überquert, die einsetzende Labilisierung der Atmosphäre jedoch noch nicht zur Wolken- bzw. Niederschlagsbildung ausreicht, sondern erst mit einsetzender Einstrahlung im gesamten postfrontalen Gebiet einsetzt.

Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung

Nach der Berechnung der Anzahl von neuen Schauern folgt die Zuordnung der Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung. Dazu wird der erzeugte Pool mit Peak-Nummerentwicklungen aus Kapitel 3.2 aufgegriffen. Dieser Pool enthält Peak-Nummerentwicklungen mit unterschiedlichen Lebensdauern. Für jede erzeugte Zelle wird aus dem Pool durch einen Zufallsgenerator eine Peak-Nummerentwicklung ausgewählt und einer Zelle zugeordnet. In einem zweiten Schritt erfolgt die Zuordnung von Niederschlagsflächen. Hierfür findet die in Kapitel 2 erwähnte Clustergrößenverteilung Anwendung, welche die relative Häufigkeitsverteilung der Größe von Niederschlagsgebieten mit gleicher Peak-Nummer darstellt (Log-Normalverteilung), wobei die Größe von Niederschlagsgebieten durch den Äquivalenzradius ausgedrückt wird (siehe Abbildung 2.3 und Gleichung 2.3). Zu jeder Peak-Nummer existiert somit eine relative Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsfläche. Für jeden Zeitpunkt einer Peak-Nummerentwicklung einer Zelle findet mit der Clustergrößenverteilung die Zuordnung einer Niederschlagsfläche statt. Dazu wird gemäß der betreffenden Peak-Nummer und der zugehörigen relativen Häufigkeitsverteilung der Clustergrößenverteilung eine Niederschlagsfläche zugeordnet. Das Resultat ist eine vorausberechnete Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung für jede neue Zelle.

Mit zunehmender Peak-Nummer verschiebt sich das Maximum der jeweiligen Clustergrößenverteilung hin zu größeren Äquivalenzdurchmessern. Aufgrund der dadurch zustande kommenden Überlagerungen der jeweiligen relativen Häufigkeitsverteilungen ist eine scheinbar widersprüchliche Entwicklung bei der Peak-Nummer und der Niederschlagsfläche möglich. Deutlich wird dieses anhand von Abbildung 2.3 für die relative Häufigkeitsverteilung für Zellen mit einer Peak-Nummer von eins bzw. drei, welche eine gemeinsame Schnittmenge der Peak-Nummer aufweisen. Somit kann theoretisch eine Zelle mit der Peak-Nummer eins eine größere Niederschlagsfläche besitzen als eine Zelle mit einer Peak-Nummer von drei. Aufgrund der zeitlichen Peak-

Nummerentwicklung von eins zu drei würde die betreffende Zelle Wachsen, wohingegen die Niederschlagsflächenentwicklung der Zelle für ein Schrumpfen sprechen würde. Desweiteren muss noch beachtet werden, dass die Niederschlagsflächenentwicklung eine größere Varianz aufweisen kann als beobachtete Niederschlagsentwicklungen. Der Grund hierfür liegt in der Zuordnung von Niederschlagsflächen zu den einzelnen Peak-Nummern. Bei der Zuordnung findet keine Berücksichtigung statt, ob eine Zelle zum Zeitpunkt der Niederschlagsflächenzuweisung bzgl. der Peak-Nummer gerade wächst oder schrumpft und somit eher eine größere oder kleinere Niederschlagsfläche innerhalb einer Clustergrößenverteilung zugeordnet bekommen müsste. Das Resultat kann somit die oben erwähnte widersprüchliche Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung oder eine sprunghafte Vergrößerung bzw. Verringerung der Niederschlagsfläche innerhalb einer Zellentwicklung sein.

Bei der Generierung einer Zelle wird ebenfalls eine eindeutige ID vergeben, die es während der gesamten Simulation erlaubt, sie zu identifizieren.

Position

Bei der Positionierung der neu generierten Zellen wird sowohl für die meridionale als auch für die zonale Komponenten eine Zufallsposition verwendet. Die Generierung dieser beiden Positionskomponenten erfolgt per Zufallszahlengenerator, bei der komponentenweise eine Gleichverteilung verwendet wird. Die so bestimmte Zellposition wird in Kombination mit dem Zellradius auf Überschneidung mit anderen bereits in der Simulation vorhandenen Zellen überprüft. Bei positiver Überprüfung wird die Position erneut nach dem oben erwähnten Prozess festgelegt bis eine freie Position ermittelt ist.

3.3.7 Modellinitialisierung

Die Initialisierung des Schauermodells beginnt in der schematischen Modelldarstellung (siehe Abbildung 3.11) mit der Generierung neuer Zellen um die Seitens des Tagesganges der relativen Niederschlagsfläche geforderte Vorgabe zu erfüllen. Im Rahmen der Initialisierung findet ebenfalls die Generierung des Schauerpools statt, welches der Übersicht halber in der schematischen Modelldarstellung jedoch nicht als Teil des Initialisierungsprozesses gekennzeichnet ist. Die Anzahl zu generierender Zellen folgt dabei des Tagesganges der relativen Niederschlagsfläche wie dieses im letzten Kapitel 3.3.6 beschrieben wurde.

3.3.8 Modelloutput

Abgeschlossen wird die Berechnung eines Zeitschrittes mit der grafischen Ausgabe des Modellgebietes inkl. der simulierten Zellen. Ergänzt wird die grafische Ausgabe des Modellgebietes durch eine statistische Aufbereitung von Modellparametern, welche die zeitlichen und räumlichen Charakteristika des simulierten postfrontalen Niederschlagsgebietes beschreiben. Als Beispiel seien hier die folgenden Eigenschaften genannt:

- Clustergrößenverteilung
- Peak-Nummerverteilung
- Lebensdauerverteilung der Zellen
- Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche
- Tagesgang der relativen und absoluten Einzeller- und Clusteranzahl
- Informationen über Nass- und Trockenzeiten für jeden Gitterpunkt

Eine detaillierte Beschreibung des Modell-Outputs findet im nachfolgenden Kapitel 4 statt.

3.3.9 Externe Unterprogramme

Das hier entwickelte Schauermodell wurde mit der Interactive Data Language (IDL) programmiert. Bei der Entwicklung des Schauermodells wurde auf das nicht zu IDL gehörige Unterprogramm „tvread“ der Fanning Software Consulting, Inc. (www.idlcoyote.com) zurückgegriffen, um die mit IDL erstellten Abbildungen als Grafikdatei zu speichern.

4 Modellüberprüfung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Schauersimulation diskutiert. Dabei wird sowohl die geometrische als auch die zeitliche Struktur betrachtet und mit den Untersuchungen von THEUS und WEUST verglichen. Desweiteren beinhaltet das Kapitel eine Analyse des Modelles bzgl. Änderungen bestimmter Eingangsgrößen.

Bevor auf die Überprüfung des Schauermodells eingegangen wird, ist in Abbildung 4.1 das Simulationsgebiet mit den simulierten Zellen für zwei repräsentativ ausgewählte Zeitpunkte zu sehen, welche unterschiedlichen Tageszeiten entsprechen. Abbildung (a) zeigt eine simulierte, postfrontale Situation während der Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche sich im Bereich des Minimums befindet (125. Minute, Nacht). Im Vergleich dazu zeigt Abbildung (b) eine simulierte postfrontale Situation im Bereich des Maximums bzgl. der relativen Niederschlagsfläche (685. Minute, Mittagszeit). Wie erwartet, weist die postfrontale Situation im Bereich des Minimums deutlich weniger größere Cluster auf als zum Zeitpunkt, bei dem die relative Niederschlagsfläche ihr Maximum erreicht. Zurückzuführen ist dieser Unterschied bzgl. der Anzahl von größeren Clustern auf die Zelldichte. In Abbildung (b) ist die Zelldichte höher, welches die Bildung von Clustern durch Mergingprozesse begünstigt. Den nachfolgenden Untersuchungen liegt, sofern nicht anders gekennzeichnet, ein 24-stündiger Modelllauf zugrunde. Diese 24 Stunden beziehen sich nicht auf die Dauer einer typischen postfrontalen Situation sondern sind eine frei gewählte Simulationsdauer um einen kompletten Tagesgang zu durchlaufen. Der bei der Generierung von Zellen verwendete Faktor g_{gen} beträgt 2,08.

4.1 Geometrische Struktur

4.1.1 Relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer

Als erstes soll das Hauptaugenmerk auf die relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer PND (siehe Kapitel 2.1) gelegt werden. Der wichtigste Aspekt der PND ist, dass diese für alle Zellen durch eine Potenzfunktion (siehe Gleichung 2.1) beschrieben

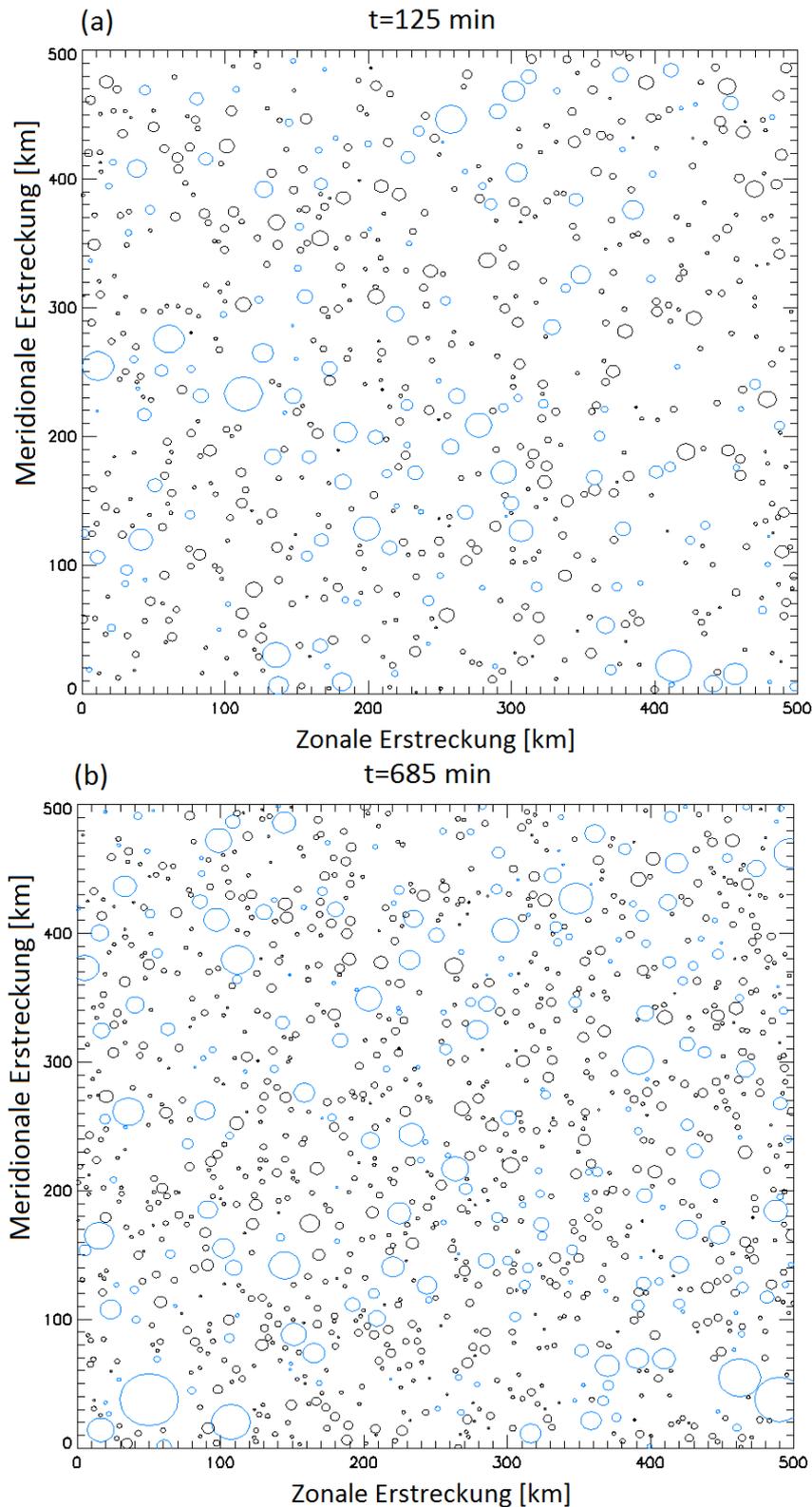


Abbildung 4.1: Darstellung von Niederschlagszellen durch das Schauermodell für zwei repräsentativ ausgewählte Zeitpunkte. Abbildung (a) zeigt die Situation für den Zeitpunkt der 125. Minute, was einem Zeitpunkt im Bereich des Minimums der relativen Niederschlagsfläche entspricht (Nacht), und Abbildung (b) die Situation zur Zeit der 685. Minute, welches einem Zeitpunkt um die Mittagszeit entspricht, bei dem die relative Niederschlagsfläche im Bereich des Maximums liegt. Durch die zyklischen Randbedingungen sollten Zellen, welche in Teilen den Modellrand überschreiten, auf beiden Seiten des Simulationsgebietes zu sehen sein. Aus technischen Gründen erfolgt die Darstellung jedoch nur auf der Seite des Simulationsgebietes, auf der sich das Zellzentrum befindet. Die Niederschlagsmenge an beiden Seiten des Modellgebietes bleibt davon unberührt.

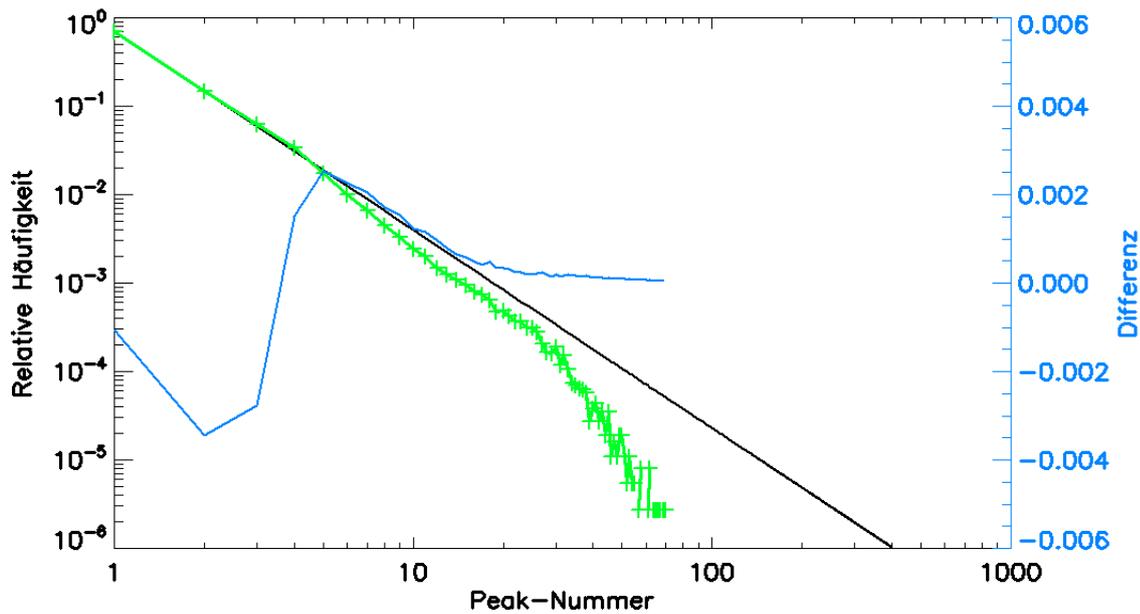


Abbildung 4.2: Vergleich der PND aller Zellen für einen 24-stündigen Modelllauf. In schwarz dargestellt ist die Potenzfunktion gemäß WEUST, in grün die sich aus dem Schauermodelllauf ergebene PND_{sim} und in blau die Differenz.

Peak-Nummernbereich	b
1 - 5	-2,26
5 - 12	-2,76
12 - 30	-2,41
30 - 70	-5,19

Tabelle 4.1: Parameter b der Regressionsfunktion (Gleichung 2.1) für einzelne Bereiche der sich aus dem Schauermodelllauf ergebene Peak-Nummerverteilung (siehe Abbildung 4.2).

werden kann. Abbildung 4.2 zeigt die PND des mit dem Schauermodell simulierten postfrontalen Niederschlagsgebietes (grün) für einen 24-stündigen Simulationszeitraum und die PND (schwarz), welche sich aus den Beobachtungen von WEUST ergeben hat (siehe Gleichung 2.1). Nachfolgend werden diese mit PND_{sim} und PND_{beob} bezeichnet. Im Vergleich zur PND_{beob} weist die PND_{sim} im Maximum eine Differenz $D = PND_{sim} - PND_{beob}$ (blau) von ca. $-3,5 \cdot 10^{-3}$ für die Peak-Nummer zwei auf. Oberhalb einer Peak-Nummer von vier ist die Differenz positiv mit einem lokalen Maximum von $2,5 \cdot 10^{-3}$ für eine Peak-Nummer von 5. Im Peak-Nummernbereich oberhalb von 5 ist zu erkennen, dass der Exponent b der Regressionsfunktion von PND_{sim} (Gleichung 2.1) im Vergleich zu PND_{beob} ($b = -2,24$) nicht konstant bleibt (siehe Tabelle 4.1). Drei Bereiche sind dabei besonders markant. Dabei handelt es sich um die Peak-Nummernbereiche 5 bis 12, 12 bis 30 und 30 bis 70.

Eine Betrachtung dieses gesamten Peak-Nummern-Bereiches 5 bis 70 im Vergleich

zum Bereich von 1 bis 5 zeigt, dass große Zellen unterrepräsentiert und kleine Zellen überrepräsentiert sind. Ein Grund hierfür kann in dem vereinfachten inneren Peak-Nummerwachstum der Zellen liegen, welches auf Grundlage der modifizierten Übergangsmatrizen $M3_{n,m}$ und $M15_{n,m}$ basiert und somit nicht exakt der beobachteten Übergangsmatrix $MO_{n,m}$ folgt. Eine weitere Ursache für die Differenz zur PND_{beob} kann im Mergingprozess liegen, der, wie in Abschnitt 1.1 und 3.3.2 beschrieben wurde, ein geometrisches Verfahren zur Mergingerkennung verwendet und bei welchem Merging nur durch horizontale Expansion stattfindet. Andere in Niederschlagsradardaten beobachtete Mergingprozesse, verursacht durch konvergierende Zellzugbahnen oder bevorzugtes Heranwachsen neuer konvektiver Zellen neben einer bereits bestehenden, wurden in dem hier beschriebenen Modell nicht abgebildet, da die Beschränkung auf horizontale Expansion durch WESTCOTT (1994) und WEUSTHOFF und HAUF (2008A) als Hauptgrund für das Merging ausgemacht wurde. Die Konzentration nur auf den am häufigsten vorkommenden Mergingprozess spielt evtl. jetzt bei der geringen Abweichung in der PND eine Rolle. Desweiteren sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass, wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt, die Regressionsfunktion PND_{beob} von WEUST auf Grundlage der Peak-Nummern mit einer Häufigkeit von mehr als $5 \cdot 10^{-4}$ berechnet wurde. Die größte Peak-Nummer, die somit der Berechnungsgrundlage von PND_{beob} angehört, liegt bei einer Peak-Nummer von ca. 30 (siehe Abbildung 2.1). Die PND_{beob} für Peak-Nummern oberhalb von ca. 30 entsprechen somit einer Extrapolation. Diese Extrapolation ist eine weitere Erklärung für Abweichungen für Peak-Nummern größer 30. Auch die Art der Platzierung neuer Zellen im Simulationsgebiet ist verantwortlich für die leichte Unterrepräsentation von Zellen mit einer hohen Peak-Nummer, da die aktuelle Platzierung neuer Zellen einer Gleichverteilung folgt und somit das in Niederschlagsradardaten zu beobachtende Heranwachsen neuer konvektiver Zellen neben einer bereits bestehenden nicht berücksichtigt wurde. Würden neu generierte Zellen bevorzugt neben bereits vorhandenen Zellen platziert, so gäbe es eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Mergingprozesse und somit für das Auftreten von Zellen mit einer höheren Peak-Nummer, wodurch eine Minimierung der oben angesprochenen Differenz erfolgen könnte. Auf eine mögliche konkrete Umsetzung dieser Platzierung neuer Zellen im Schauermodell wird in Kapitel 5.2 eingegangen. Die Summe aller genannten Gründe trägt zu der genannten Abweichung bei, dennoch ist das Schauermodell in der Lage die Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer adäquat wiederzugeben, so dass die Abweichung zwischen PND_{beob} und PND_{sim} wie oben erwähnt nicht mehr als ca. $-3,5 \cdot 10^{-3}$ beträgt.

Flache Konvektion innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht führt i.d.R. nicht zu Niederschlägen und stellt einen großen Unterschied dar zu konvektiven Niederschlagser-

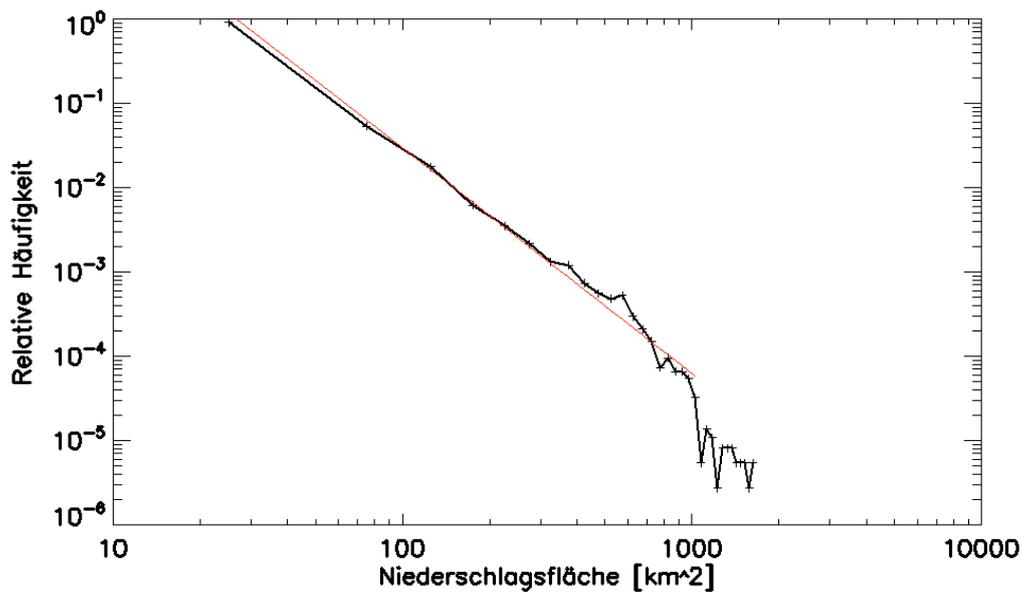


Abbildung 4.3: Relative Häufigkeitsverteilung der simulierten postfrontalen Niederschlagsfläche für einen 24-stündigen Modelllauf. Bei einer Niederschlagsfläche von ca. 1.000 km² befindet sich ein scale break, welcher einer Änderung des Exponenten der Regressionsfunktion entspricht. Die Klassenbreite beträgt 50 km². In rot dargestellt ist die Regressionsfunktion (Gleichung 2.1) für Niederschlagsflächen bis 1.000 km².

eignissen eines postfrontalen Niederschlagsgebietes. Dennoch gibt es eine Eigenschaft von Wolkengebieten, welche sich durch flache Konvektion gebildet haben, die auch in den postfrontalen Niederschlagsdaten des Schauermodells zu finden ist. In der PND_{beob} ungefähr oberhalb der Peak-Nummer 30 kommt es zu einer plötzlichen Änderung des Exponenten b der Regressionsfunktion (Gleichung 2.1). Diese Änderung des Exponenten bzgl. konvektiver Zellen, welche als *scale break* bezeichnet wird, wurde auch bei Untersuchungen von NEGGERS *et al.* (2003) und HEUS und SEIFERT (2013) beobachtet, bei denen horizontale Wolkengrößen von flachen Cumuli-Populationen, von LES (large-eddy simulation) und beobachteten Wolken verglichen wurden. Der wahrscheinlichste Grund für das Auftreten des scale breaks bei flacher Konvektion liegt in der Höhe der konvektiven Grenzschicht, welche die Zirkulation in der Vertikalen beschränkt und somit auch dazu führt, dass die Wahrscheinlichkeit für Wolken mit einer großen horizontalen Erstreckung abnimmt. Auch wenn es sich bei dem Output des Schauermodells um Daten von Niederschlagsgebieten handelt und nicht um welche von Wolken, so ist analog zu NEGGERS *et al.* (2003) und HEUS und SEIFERT (2013) ein scale break auch in Abbildung 4.2 für das simulierte postfrontale Niederschlagsfeld zu finden, wobei hier nicht die horizontale Wolkengröße, sondern die Peak-Nummer als Maß für die Niederschlagsfläche verwendet wird. Die Übereinstimmung des scale break in PND_{sim} und der Niederschlagsfläche ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Der genannte

scale break befindet sich bei einer Niederschlagsfläche von ca. 1.000 km^2 , was einer Peak-Nummer von ungefähr 30 entspricht. Die nicht exakte Zuordnung der genannten Peak-Nummer zur Niederschlagsfläche 1.000 km^2 rührt daher, dass die genannte Niederschlagsfläche durch mehrere Peak-Nummern repräsentiert werden kann und es sich bei den genannten Peak-Nummern um Mittelwerte handelt (siehe Abbildung 2.3). Die Peak-Nummer bzw. die Niederschlagsfläche des scale breaks ist auch bei den postfrontalen Zellen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die vertikale Begrenzung der Konvektion und somit der daraus resultierenden Zirkulation zurückzuführen. Ein limitierender Faktor wäre somit die Schichtung der Atmosphäre, bis zu der Konvektion möglich ist bzw. als maximale Höhe die Tropopause (ohne Berücksichtigung von *overshooting tops*).

Kurz erwähnt sei hier, dass bereits NAIR *et al.* (1998) und SENGUPTA *et al.* (1990) bei der relativen Häufigkeitsverteilung der horizontalen Cumulus-Wolkenfläche beobachteten, dass diese durch eine Potenzfunktion (Gleichung 2.1) dargestellt werden kann. Auch wenn Wolkenflächen nicht exakt mit Niederschlagsflächen übereinstimmen bzw. nicht alle Wolken mit Niederschlag verbunden sind, konnte die gleiche Abhängigkeit auch bzgl. der hier simulierten relativen Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsfläche beobachtet werden. Die Potenzfunktion ist in Abbildung 4.3 für Niederschlagsflächen bis 1000 km^2 in rot dargestellt mit den Parametern $a = 7.458,27$ und $b = -2,71$.

Bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer für jeden einzelnen Zeitschritt und der zugehörigen Regressionsfunktion (Gleichung 2.1) für die Peak-Nummern 1 bis 30 ergibt sich ein Tagesgang des Parameters b , welcher in Abbildung 4.4 (schwarz) zu sehen ist. Ausgenommen von den ersten Zeitschritten des Modelllaufes stellt sich für den Parameter b ein annähernder Gleichgewichtszustand mit einem Mittelwert von $-2,19$ und einer Standardabweichung von $0,17$ ein. Dieser Gleichgewichtszustand bedeutet, dass die Anzahl von großen und kleinen Zellen (hohe bzw. geringe Peak-Nummer) in einem annähernd gleichen Verhältnis zueinander stehen und existiert obwohl es durch den Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche als Modellinput zu einer ständigen Änderung der Zufuhr von neuen Zellen kommt.

4.1.2 Clustergrößenverteilung

Die Clustergrößenverteilungen von beobachteten postfrontalen Niederschlagsgebieten folgen nach WEUST Log-Normalverteilungen (Gleichung 2.3). Diese Verteilungen dienen im Schauermodell in der Hinsicht als Input, dass gemäß der relative Häufigkeitsverteilung, die Zuordnung von Niederschlagsflächen zu Zellen mit einer bestimmten

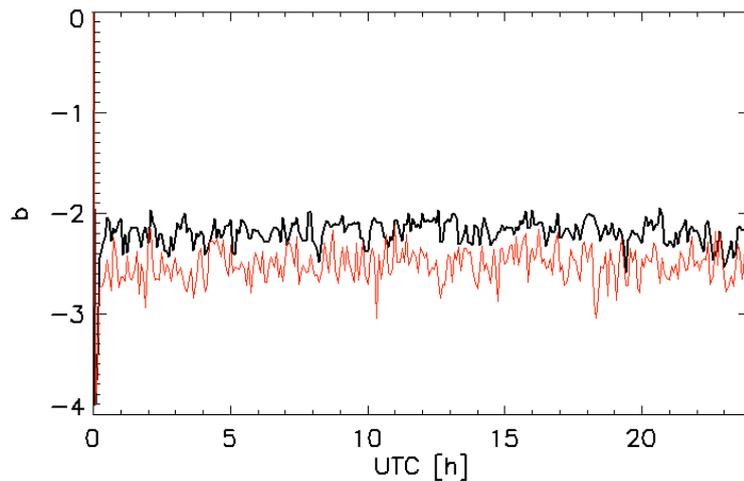


Abbildung 4.4: Tagesgang des Exponenten b der Regressionsfunktion für die Peak-Nummerverteilung resultierend aus dem mittleren Tagesgang der relative Niederschlagsfläche. Betrachtet wurden Peak-Nummern von 1 bis 30 (schwarz) bzw. für einen späteren Vergleich mit Testszenarien die Peak-Nummern 1 bis 10 (rot).

Peak-Nummer möglich ist (siehe Abschnitt 3.3.6). Diese Zuordnung erfolgt sowohl für Einzeller als auch für Cluster. Die sich aus dem Modell ergebenden Clustergrößenverteilungen sind in Abbildung 4.5 zu sehen (farbige Verteilungen), wobei der Übersicht halber nicht alle Clustergrößenverteilungen sämtlicher Peak-Nummern dargestellt sind. Mit zunehmender Peak-Nummer ist eine größere Differenz zwischen den beobachteten und den aus dem Schauermodell hervorgegangenen Clustergrößenverteilungen festzustellen. Da die beobachtete Clustergrößenverteilungen als Input bzw. für die Niederschlagsflächenzuordnung verwendet wird und somit exakt durch das Schauermodell wiedergegeben werden müsste, scheint diese Abweichung auf den ersten Blick nicht schlüssig. Der Grund für diese Abweichung liegt in der geringer ausfallenden Grundgesamtheit für Zellen mit höherer Peak-Nummer, da wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, die Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer einer Potenzfunktion folgt, und somit Zellen mit geringerer Peak-Nummer wesentlich häufiger auftreten als Zellen mit einer hohen Peak-Nummer. Desweiteren kommt die erwähnte Abweichung durch Mergingprozesse zustande, da zum Zeitpunkt eines Mergingprozesses eine Addition der Niederschlagsflächen aller beteiligten Zellen stattfindet und somit die Peak-Nummer-Niederschlagsflächen-Zuordnung gemäß der Clustergrößenverteilungen nicht zum Tragen kommt. Dafür spricht auch, dass mit zunehmender Peak-Nummer die Abweichung größer wird, da Zellen mit einer größeren Peak-Nummer mit einer höheren Wahrscheinlichkeit durch Mergingprozesse zustande gekommen sind.

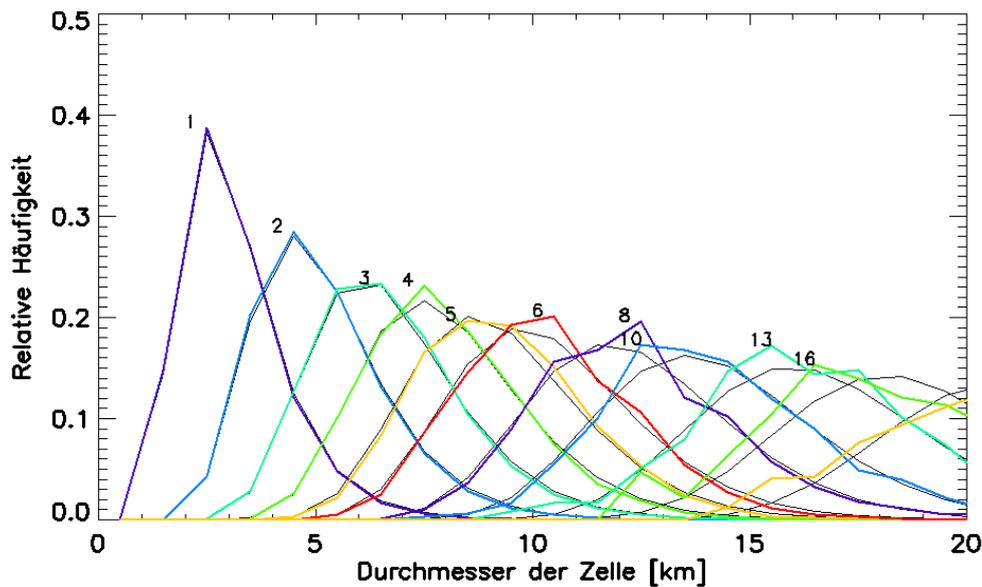


Abbildung 4.5: Clustergrößenverteilung des postfrontalen Niederschlagsgebietes nach einem 24-stündigen Modelllauf. Dargestellt sind die Verteilungen aus den Untersuchungen von WEUST (schwarz) und die sich aus dem Modell ergebenden Verteilungen (farbig).

4.1.3 Lebensdauerverteilung

Auch bezüglich der Lebensdauer von Zellen findet eine Kontrolle statt. Abbildung 4.6 zeigt die relative Häufigkeitsverteilung $H(l)$ von Zellenlebensdauern l eines 24-stündigen Modelllaufes (grün). In schwarz ist die von WEUSTHOFF und HAUF (2008A) ermittelte Potenzfunktion (Gleichung 2.1) zur Beschreibung der Lebensdauerverteilung mit den Parametern $a = 3,94$ und $b = -2,28$ für $15 \text{ Min} \leq l \leq \infty$ und $N(l) > 5 \cdot 10^{-4}$ dargestellt. Die zugrundeliegenden Lebensdauern wurden mit Hilfe eines Trackingalgorithmus ermittelt. Zur Identifizierung einer Zellenbewegung im Trackingalgorithmus muss eine Zelle zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten detektiert werden. Die minimal feststellbare Lebensdauer beträgt somit 15 Minuten, welches drei Übergängen (Entstehung, Wachstum und Auflösen) je 5 Minuten entspricht. Lebensdauern von 10 Minuten sind möglich und entsprechen Zellen, die nur zu einem Zeitpunkt durch das Niederschlagsradar detektiert wurden, können jedoch durch den Trackingalgorithmus nicht verfolgt werden und werden somit nicht in der Verteilung berücksichtigt. Im Schauermodell sind Lebensdauern von 10 Minuten möglich, für den Vergleich mit der Häufigkeitsverteilung von WEUSTHOFF und HAUF (2008A) werden jedoch nur Zellen mit einer Lebensdauer von mindestens 15 Minuten betrachtet.

Desweiteren ist in Abbildung 4.6 der Betrag der Differenz zwischen Schauermodell und der oben erwähnten Potenzfunktion in blau dargestellt. Der maximale Betrag der Dif-

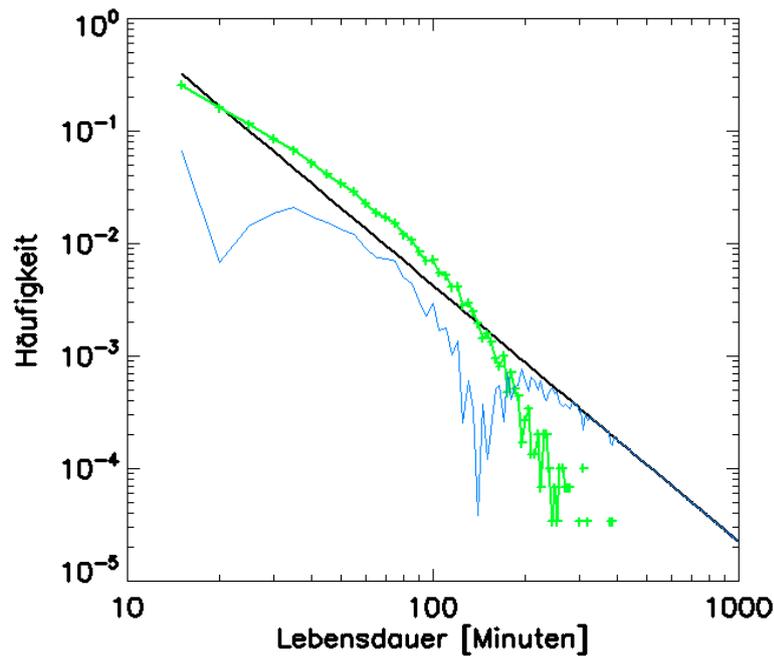


Abbildung 4.6: Relative Lebensdauervertelung der Zellen nach einem 24-stündigen Modelllauf für Lebensdauern ab 15 Minuten (grün). In schwarz ist zum Vergleich die Potenzfunktion der ermittelten Lebensdauervertelung von WEUSTHOFF und HAUF (2008A) dargestellt und in blau der Betrag der Differenz.

ferenz beträgt 0,07 und besteht bei der Lebensdauer von 15 Minuten. Für größere Lebensdauern kommt es zu einer Verringerung der Differenz, welche für Lebensdauern von ca. 60 bis 110 Minuten im Größenordnungsbereich von 10^{-3} und für Lebensdauern von ca. 110 bis 400 Minuten sogar im Größenordnungsbereich von 10^{-4} liegen. Der Vergleich zeigt, dass die relative Lebensdauervertelung vom Schauermodell für Lebensdauern recht gut wiedergegeben wird. Wie Abbildung 4.6 zeigt, werden Zellen mit einer Lebensdauer von bis zu 20 Minuten leicht unter und Zellen mit einer Lebensdauer von 25 bis 130 Minuten durch das Schauermodell leicht überrepräsentiert, die Abweichung liegt im Maximum jedoch nur bei 0,07.

4.1.4 Übergangsmatrix

Die Übergangsmatrix ist ein wesentlicher Bestandteil des Schauermodells. Sie dient auf der einen Seite als Input zur Generierung von individuellen Peak-Nummerentwicklungen, kann auf der anderen Seite jedoch auch zur Kontrolle des Schauermodells verwendet werden. Für diese Kontrolle wird im Schauermodell simultan zur Simulation des post-frontalen Niederschlagsfeldes eine Übergangsmatrix aus sämtlichen Zellübergängen erstellt. Die daraus resultierende Übergangsmatrix des Schauermodells für einen

24-stündigen Modelllauf ist in Abbildung 4.7 zu sehen und weist die gleichen Eigenschaften auf, die in der Übergangsmatrix von WEUST zu finden sind (vgl. Abbildung 3.6 und Kapitel 2.4). Dazu zählt der ausgeprägte Bereich entlang der Hauptdiagonalen, welcher hauptsächlich Stagnation bzw. einem internen Wachstum der Peak-Nummer entspricht (Nebendiagonalen), ebenso wie die beiden Bereiche mit Übergängen von $n \rightarrow 1$ und $1 \rightarrow m$. Die Übergangsmatrix von WEUST ist ein direkter Input für die Peak-Nummer-Entwicklung und somit für das Schauermodell, jedoch kommt sie nur beim internen Wachstum und Splitting von Zellen zum Tragen. Merging ist in der Übergangsmatrix von WEUST zwar enthalten, folgt jedoch im Schauermodell nicht direkt aus der Übergangsmatrix, da Einträge in der Übergangsmatrix nicht eindeutig einem Merging-, Splitting- oder internem Wachstumsprozess zugeordnet werden können. Die Lösung war die Umsetzung des Mergings durch ein geometrisches Kriterium (siehe Kapitel 3.3), welches nicht direkt aus der Übergangsmatrix eine Peak-Nummer für den aus den einzelnen Zellen neu entstandenen Multi-Cluster ermittelt. Trotz dieses verwendeten Kriteriums für Mergingprozesse und der Einführung eines Grenzwertes für Splittingprozesse ergibt sich dennoch aus dem Schauermodell die Übergangsmatrix mit den gleichen oben erwähnten Charakteristika aus WEUST.

Zellen, welche nur internem Wachstum unterliegen und an keinem Mergingprozess beteiligt sind, sollen in Folgenden separat betrachtet werden. Diese Zellübergänge sind in Abbildung 4.8 dargestellt und sind eine Teilmenge der aus dem Schauermodell folgenden Gesamtübergangsmatrix. Es ist zu erkennen, dass die maximal durch internes Wachstum erreichte Peak-Nummer bei 16 liegt. Desweiteren zeigt Abbildung 4.8 die korrekte Funktionsweise der Peak-Nummer-Begrenzung des internen Wachstums, welches, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, bei Übergängen von $n \rightarrow m$ auf $n - 3 \leq m \leq n + 3$ begrenzt ist. Die Begrenzung entspricht somit einer maximal möglichen Peak-Nummer-Entwicklung pro Zeitschritt von ± 3 um die Hauptdiagonale, obwohl in der eben erwähnten Abbildung eine maximal mögliche Peak-Nummerentwicklung pro Zeitschritt von ± 4 zu erkennen ist. Es handelt sich bei diesem Unterschied um ein Darstellungsproblem der Isolinien-Darstellungsfunktion von IDL. Der direkte Output des Schauermodells (nicht dargestellt) zeigt die korrekte maximal mögliche Peak-Nummerentwicklung pro Zeitschritt von ± 3 um die Hauptdiagonale.

Um nur Peak-Nummerübergänge von Zellen mit mindestens einem Mergingprozess in der Zellentwicklung, also Multi-Clustern, zu untersuchen, ist eine separierte Betrachtung möglich (siehe Abbildung 4.9). Für die oben erwähnten Übergänge ohne Mergingprozesse ist in der Übergangsmatrix ein klar begrenzter Bereich um die Hauptdiagonale erkennbar, der auf die Begrenzung der maximal möglichen Peak-Nummer-Entwicklung pro Zeitschritt von ± 3 zurückzuführen ist. Für die nun hier zu sehende Übergangs-

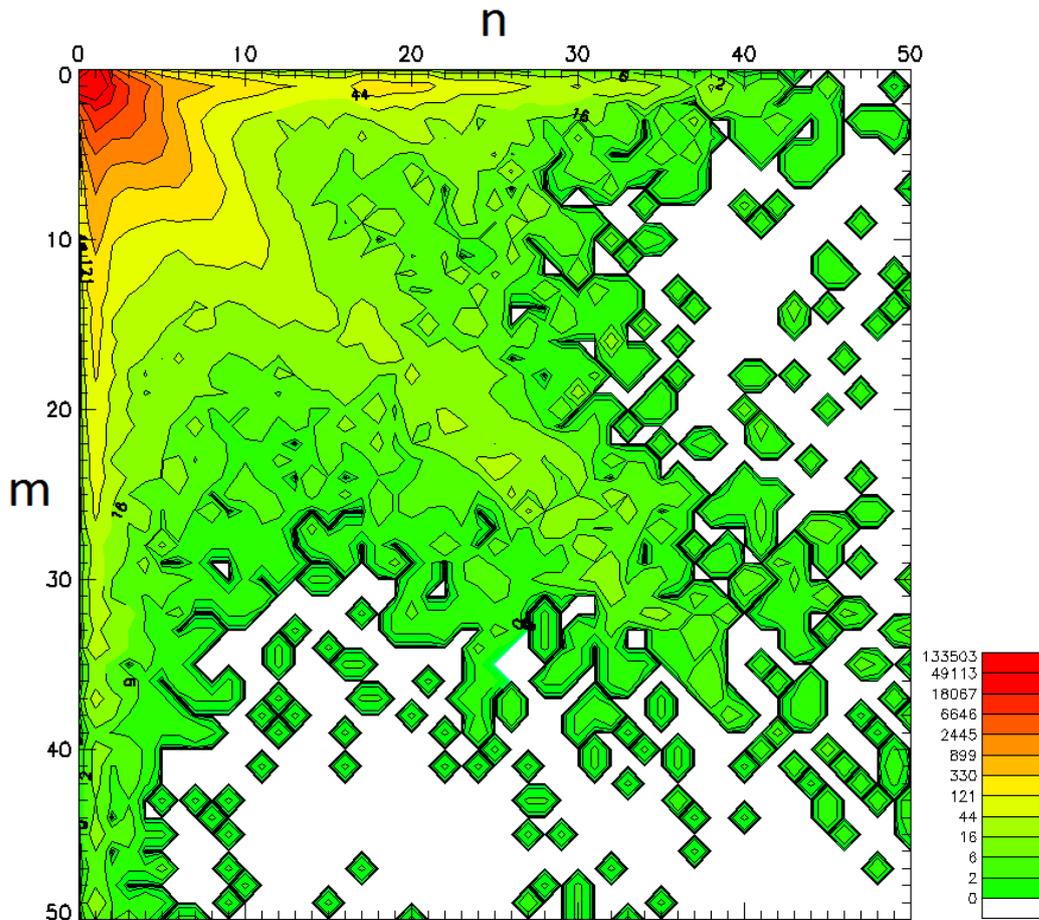


Abbildung 4.7: Übergangsmatrix sämtlicher Zellübergänge für einen 24-stündigen Modelllauf, dargestellt bis zu einer Peak-Nummer von 50. Die Übergangsmatrix weist die gleichen Charakteristika auf wie die in Abbildung 3.6 dargestellte Übergangsmatrix von *Weust*, welche als Input des Schauermodells Anwendung findet. Zu den Charakteristika gehören die ausgeprägte Hauptdiagonale, bei der Stagnation stattfindet, sowie die beiden Übergangsbereiche mit $n \rightarrow 1$ und $1 \rightarrow m$.

matrix, welche Mergingprozesse mit abbildet, ist allerdings trotz der Begrenzung der maximal möglichen Peak-Nummer-Entwicklung pro Zeitschritt auf ± 15 bei internen Wachstumsprozessen von Multi-Clustern keine klare Abgrenzung um die Hauptdiagonale zu erkennen. Ursache ist das zusätzlich vorhandene Merging und Splitting, welches zu Einträgen jenseits der maximal möglichen Peak-Nummer-Entwicklung pro Zeitschritt in der Übergangsmatrix führt.

Die Summe aus der Übergangsmatrix für internes Wachstum und der Berücksichtigung von Merging- und Splittingprozessen führt zu der Gesamtübergangsmatrix in Abbildung 4.7.

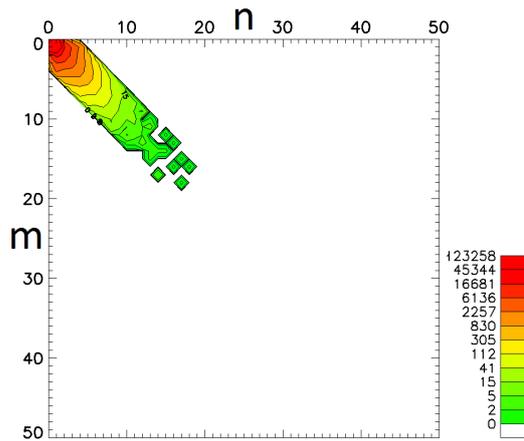


Abbildung 4.8: Übergangsmatrix für den Peak-Nummernbereich bis 50, welche aus einem 24-stündigen Modelllauf resultiert und nur Zellübergänge von Zellen mit internem Wachstum (ohne Merging) enthält.

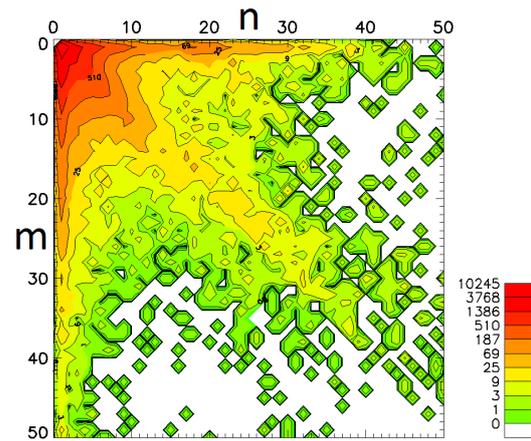


Abbildung 4.9: Übergangsmatrix für den Peak-Nummernbereich bis 50, welche aus einem 24-stündigen Modelllauf resultiert und nur Zellübergänge von Zellen enthält, welche während ihrer Lebensdauer mindestens einen Mergingprozess durchlaufen haben. Der Übersicht halber erfolgt die Darstellung nur bis zu einer Peak-Nummer von 50.

4.1.5 Niederschlagsmenge und Niederschlagszeit

Die Kontrolle des Niederschlagsoutput kann für das Schauermodell auf zwei Wegen geschehen. Eine Möglichkeit der Kontrolle des Niederschlags ist über die Niederschlagsmengenverteilung möglich. Dazu ist im Modell nicht nur die Simulation der Zellenposition und Niederschlagsfläche notwendig, sondern ebenso die Niederschlagsrate. Zu Testzwecken wurde im Schauermodell eine konstante Niederschlagsrate von $4 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ angenommen, welches einer typischen Niederschlagsrate für Schauer entspricht. Die daraus resultierende Niederschlagshöhe für einen 24-stündigen Modelllauf ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Die hier angenommene Niederschlagsrate wird im Schauermodell auf die gesamte Niederschlagsfläche einer Zelle angewendet, was allerdings nur einer Näherung des realen Niederschlages in einer Zelle entspricht. Mit dem Niederschlagsradar beobachtete Zellen weisen jedoch eine wesentlich inhomogenere Verteilung der Niederschlagsrate auf, bei der sich das Maximum der Niederschlagsrate in Zentrumsnähe der Zelle befindet, bzw. sich auf mehrere Maxima innerhalb einer Zelle aufteilt.

Da eine inhomogene Verteilung der Niederschlagsrate innerhalb einer Zelle nicht in der aktuellen Schauermodellversion enthalten ist, wird der zweite oben angesprochene Weg der Kontrolle hinsichtlich der Dauer von Niederschlägen gewählt. Ausschlaggebend ist dabei nicht die Niederschlagsmenge sondern das Vorkommen von Niederschlag. Für die Kontrolle wird über das $500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$ große Modellgebiet ein Gitter mit der Weite $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$ gelegt und das Auftreten von Niederschlagsereignissen in

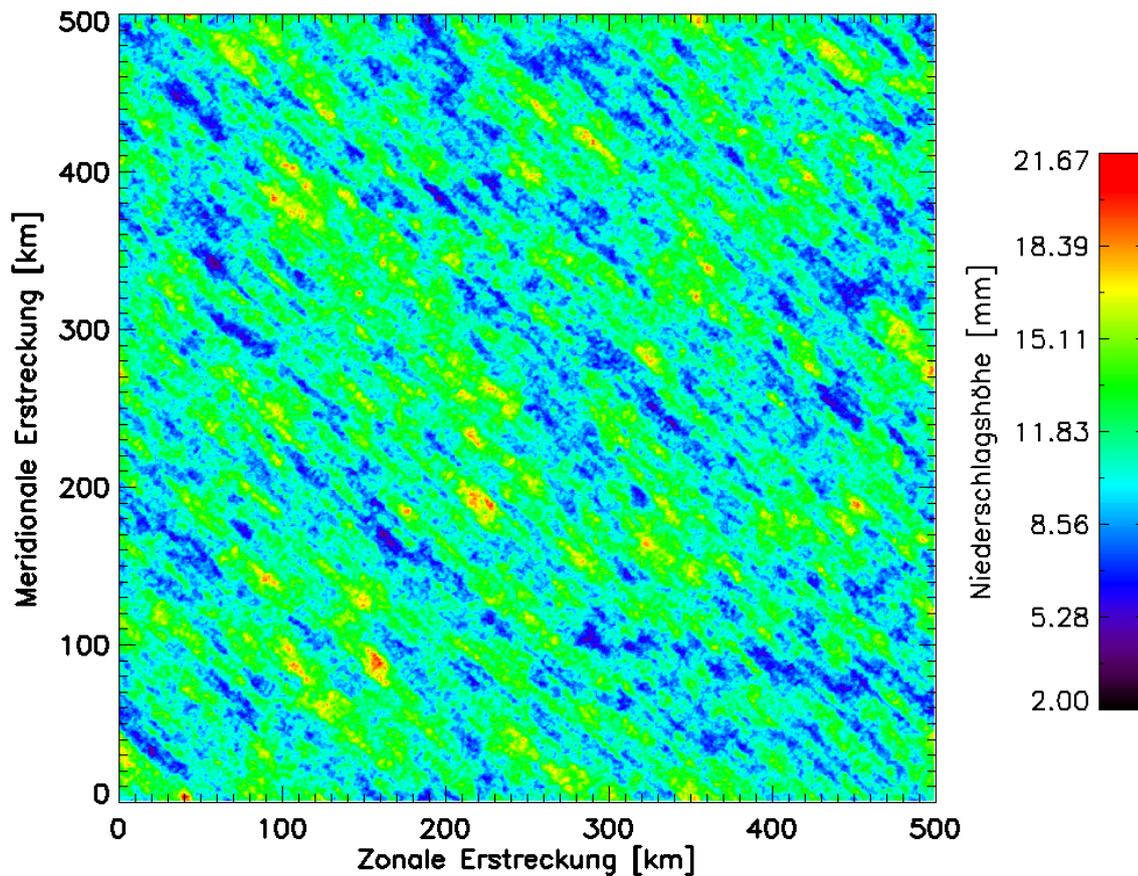


Abbildung 4.10: Darstellung der Summe der Niederschlagshöhe im Simulationsgebiet nach einem 24-stündigen Modelllauf. Es ist eine gestreifte Struktur erkennbar, die von der Verlagerung der Zellen herrührt. Die Verlagerung erfolgt mit dem Wind, welcher mit $15 \frac{m}{s}$ aus Nordwest (315°) weht.

sämtlichen Gitterelementen innerhalb eines 24-stündigen Zeitraumes bestimmt. Für die mittlere Niederschlagsdauer pro Gitterelement und Tag ergibt sich ein Wert von 164,0 Minuten. Die mittlere Niederschlagsdauer pro Event beträgt 6,9 Minuten. Unter Event versteht sich der ununterbrochene Niederschlag an einem Gitterpunkt, der sich durch Passieren einer Zelle des betreffenden Gitterelementes ergibt. Die mittlere Dauer von Trockenevents, also Zeiträumen, in denen es in einem festen Gitterelement keinen Niederschlag gibt, beträgt 51,9 Minuten. Gleiche Untersuchungen wurden durch WEUSTHOFF (2008B), im folgenden WEUST8 genannt, für mehrere postfrontale Niederschlagsgebiete mit Hilfe von Niederschlagsradaraten durchgeführt. Hierbei fällt auf, dass der von WEUST8 ermittelte Wert für die mittlere Niederschlagsdauer pro Gitterelement und Tag mit 57 Minuten 107 Minuten geringer ausfällt als die vom Schauermodell ermittelte Niederschlagsdauer (siehe Tabelle 4.2). Selbst die von WEUST8 angegebene Standardabweichung von 55 Minuten fällt geringer aus als die Differenz zwischen Modell und WEUST8. Ein entgegengesetztes Bild zeigt sich bei der

Betrachtetes Ereignis	Schauermodell	WEUST8
Mttl. Niederschlagsdauer pro Gitterel. und Tag [$\frac{\text{min}}{\text{Tag}}$]	164,0	57
Mttl. Niederschlagsdauer pro Event [min]	6,9	18
Mttl. Dauer eines Trockenevents [min]	51,9	377

Tabelle 4.2: Mittlere Dauer verschiedener Niederschlagsereignisse.

mittleren Niederschlagsdauer pro Event. WEUST8 ermittelte pro Event eine Dauer von 18 Minuten mit einer Standardabweichung von 28 Minuten. Die vom Schauermodell ermittelte Dauer pro Event liegt wie oben erwähnt bei 6,9 Minuten. Dieser Wert fällt geringer aus als bei WEUST8, liegt aber innerhalb der Standardabweichung. Zuletzt ein Vergleich für die mittlere Dauer eines Trockenevents. 51,9 Minuten beträgt diese wie eben erwähnt im Mittel beim Schauermodell, wohingegen WEUST8 einen mittleren Wert von 377 Minuten ermittelte (Standardabweichung 432 Minuten).

Aus eben genannten Werten für die Niederschlagsdauer bzw. der Trockenphase ist zu erkennen, dass die Werte zwischen dem Schauermodell und WEUST8 zum Teil in einem Verhältnis von bis zu 7,3 stehen, allerdings noch bis auf eine Ausnahme innerhalb der Standardabweichung liegen. Anhand der Standardabweichung ist auch zu erkennen, dass die für den Mittelwert von WEUST8 zugrundeliegenden Niederschlagsdauern eine hohe Streuung aufweisen. Aufgrund dieser großen Streuung soll dieser Überprüfung über die Dauer von Niederschlägen kein zu großes Gewicht zukommen, da zusätzlich andere Faktoren, wie z.B. die Verlagerungsgeschwindigkeit von Zellen oder die Ausdehnung von Niederschlagsgebieten, einen maßgeblichen Einfluss auf die Dauer von Niederschlagsereignissen in einen festen Gitterelement haben. Um dieses zu verdeutlichen, wurden weitergehende Untersuchungen zur Variabilität der Niederschlagsdauer in Abhängigkeit von der Verlagerungsgeschwindigkeit durchgeführt. Aus modelltechnischen Gründen musste der Faktor g_{gen} von 2,08 auf 0,8 angepasst werden, um Kaskadeneffekte bei geringeren Verlagerungsgeschwindigkeiten zu vermeiden (siehe Kapitel 4.2.1). Im Mittel verringert sich die simulierte mittlere relative Niederschlagsfläche dadurch von 0,114 auf 0,104. Da an dieser Stelle jedoch der Fokus auf der Veränderung der Niederschlagszeiten in Abhängigkeit von der Verlagerungsgeschwindigkeit der Zellen liegt, kann der leicht geringer ausfallende relative Niederschlag vernachlässigt werden. Zu sehen ist diese Abhängigkeit in Abbildung 4.11 und 4.12. Abbildung 4.11 zeigt die mittlere Niederschlagsdauer pro Event in Abhängigkeit von der Verlagerungsgeschwindigkeit. Die Verlagerungsgeschwindigkeit vergrößert sich in dem hier gezeigten Beispiel von $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die eigentliche Lebensdauer der Zellen verändert sich im Modell dadurch nicht, jedoch fällt die Niederschlagsdauer in einem festen Gitterelement durch die erhöhte Verlagerungsgeschwindigkeit gerin-

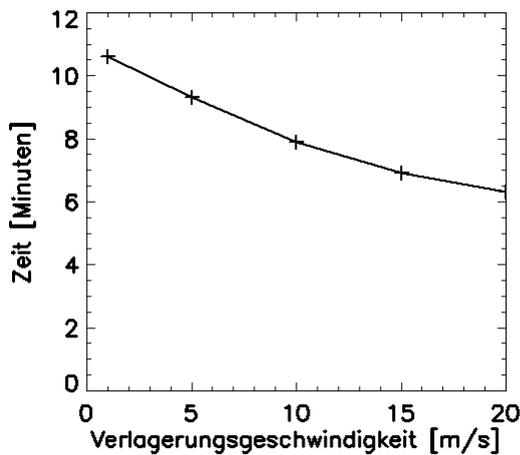


Abbildung 4.11: Mittlere Niederschlagsdauer pro Event. Mit zunehmender Verlagerungsgeschwindigkeit der Zellen durch den Wind sinkt die Dauer einzelner Niederschlagsereignisse in einem festen Gitterelement.

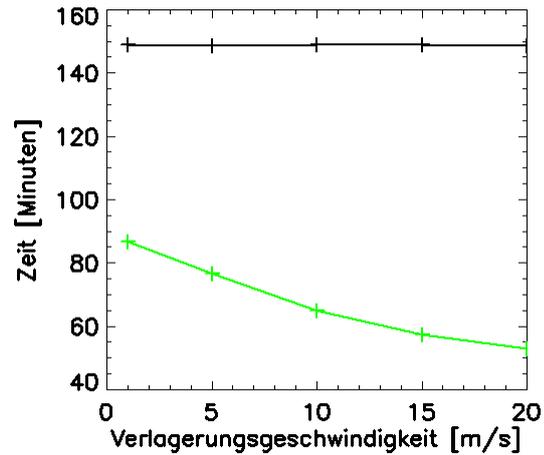


Abbildung 4.12: Mittlere Dauer einer Trockenphase zwischen zwei Niederschlagsereignissen (grün) sowie die mittlere Niederschlagszeit aller Gitterelemente für den Simulationszeitraum von 24 Stunden (schwarz). Bei unterschiedlichen Verlagerungsgeschwindigkeiten der Zellen mit dem Wind bleibt die mittlere Niederschlagsdauer aller Gitterelemente konstant. Die Dauer von Zeiten ohne Niederschlag für ein festes Gitterelement sinkt mit zunehmender Verlagerungsgeschwindigkeit.

ger aus, da die Zelle eine geringere Verweilzeit über einem festen Gitterelement hat. In dem hier genannten Fall verringert sich die mittlere Niederschlagsdauer eines Niederschlagsereignisses in einem festen Gitterelement von 10,6 Minuten auf 6,3 Minuten. Mit einer höheren Verlagerungsgeschwindigkeit verringert sich auch zwangsläufig die mittlere Dauer von Trockenevents, in dem hier genannten Fall von 86,7 Minuten auf 53,1 Minuten (siehe Abbildung 4.12, grün). Keine Auswirkungen hat die Änderung der Verlagerungsgeschwindigkeit auf die mittlere Gesamtniederschlagsdauer pro Pixel und Tag. Diese bleibt wie erwartet und in Abbildung 4.12 (schwarz) zu sehen konstant bei ca. 148,8 Minuten. Der Grund dafür ist, dass für die Gesamtniederschlagsdauer keine Events betrachtet werden und aufgrund der zyklischen Randbedingungen die Gesamtniederschlagsmenge und somit die Gesamtniederschlagsdauer im gesamten Modellgebiet konstant bleiben, da bei einer Erhöhung der Verlagerungsgeschwindigkeit Zellen zwar schneller verlagert werden, die eigentliche Zellentwicklung (Peak-Nummer-/Niederschlagsflächenentwicklung) aber unverändert bleibt.

Der Vergleich von Niederschlags- bzw. Trockenzeiten des hier entwickelten Schauermodells und WEUST8 hat gezeigt, dass die Kontrolle des Schauermodells mit Hilfe der Analysen von WEUST8 zum jetzigen Zeitpunkt bzgl. der Niederschlagszeiten nicht abschließend untersucht werden können und daher dieser Kontrolle, wie oben erwähnt,

kein zu großes Gewicht zukommen soll. Für eine abschließende Überprüfung müssten die Analysen von WEUST8 hinsichtlich Einflüssen auf die Niederschlags- bzw. Trockenzeiten untersucht werden. Ein Einfluss besteht in der Windgeschwindigkeit und somit der Verlagerungsgeschwindigkeit der Zellen. Die von WEUST8 gewählten Niederschlagsdaten müssten in einer Untersuchung in Verbindung mit den vorherrschenden Windbedingungen analysiert werden. Der Zusammenhang zwischen der Länge von Niederschlags- und Trockenzeiten ist trivial, dennoch konnte durch diese Überprüfung gezeigt werden, dass das Modell in der Lage ist, bei Änderungen der Verlagerungsgeschwindigkeit der einzelnen Zellen, eine korrekte Outputveränderung bei den Niederschlags- bzw. Trockenzeiten zu erzeugen.

4.2 Zeitliche Struktur

4.2.1 Mittlerer Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche

Als Modellinput dient u.a. der mittlere Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche, auf den in Kapitel 3.3.6 ausführlicher eingegangen wurde und welcher den mittleren Verlauf der relativen Niederschlagsfläche in Gebieten beschreibt, welche sich unter postfrontalem Einfluss befinden. Dieser Tagesgang spiegelt nicht den Verlauf einer einzigen postfrontalen Situation wieder, sondern entspricht einem Mittel über 39 Tage mit postfrontalem Niederschlag (THEUS). Das Schauermodell bildet diesen vorgegebenen Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche nach und simuliert somit ein Niederschlagsgebiet unter postfrontalen Bedingungen, welches sich nach dem Durchgang einer Kaltfront einstellt. Abbildung 4.13 zeigt den mittleren Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche (schwarz) und den vom Schauermodell simulierten Tagesgang (blau). Der mittlere Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche wird im Schauermodell zur Steuerung der Niederschlagsfläche verwendet. Es fällt auf, dass die simulierte relative Niederschlagsfläche des Schauermodells nicht zu allen Zeitpunkten die Vorgabe $\bar{r}_{19}(t)$ erreicht und würde bei der Bildung eines gleitenden Mittels kontinuierlich ca. 0,01 unterhalb der Vorgabe liegen. Der zu sehende simulierte relative Tagesgang entspricht dem Tagesgang, welcher gerade noch simuliert werden kann, ohne dass das Schauermodell in einen kritischen Bereich bzgl. der Zelldichte gelangt. Der bei der Generierung von Zellen verwendete Steuerungsfaktor g_{gen} , welcher mit $Q_{\text{Soll}}(t)$ (siehe Abschnitt 3.3.6) multipliziert wird, entspricht bei diesem Tagesgang 2,08. Ein größerer Wert für g_{gen} würde zwar zu einer Vergrößerung des simulierten relativen Niederschlagsfeldes und somit auch ggf. zu einer Verringerung der Differenz zwischen simulierter und vorgegebener relativen Niederschlagsfläche führen, jedoch hat die Vergrößerung g_{gen} zur

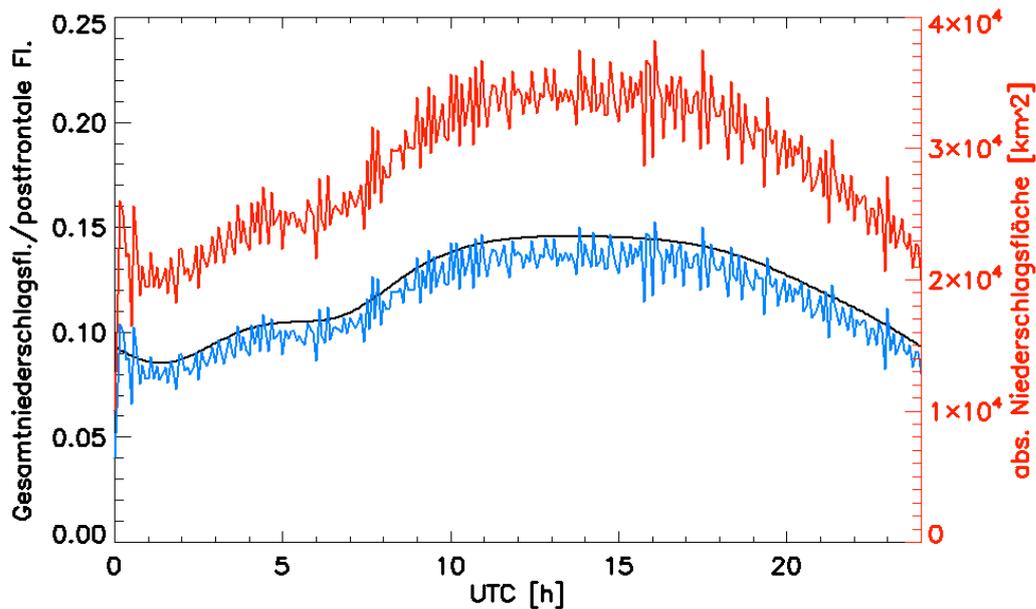


Abbildung 4.13: Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche für eine simulierte postfrontale Situation. In schwarz dargestellt ist der durch WEUST vorgegebene relative Tagesgang der Niederschlagsfläche, in blau der durch das Schauermodell simulierte Tagesgang und in rot der absolute Tagesgang der simulierten Niederschlagsfläche.

Folge, dass die simulierte relative Niederschlagsfläche starke Schwankungen aufweist. Diese Schwankungen können sich derart verstärken, dass die simulierte relative Niederschlagsfläche bereits nach wenigen Zeitschritten Werte von bis zu 0,2 aufweist und in der weiteren Simulation sogar einen Kaskadeneffekt zur Folge hat, bei dem es zu einem unkontrollierten Anwachsen von Clustern kommen kann (siehe Kapitel 3.3.4). Ursache dieses Kaskadeneffektes ist die eigene Dynamik des Modelles. Eine größere Niederschlagsfläche im Schauermodell ist mit einer höheren Zelldichte verbunden. Diese höhere Zelldichte führt zu vermehrten Mergingprozessen und schließlich bei Erreichen eines kritischen Wertes zum Kaskadeneffekt.

Trotz dieses Umstandes ist das Schauermodell in der Lage, den Verlauf des Tagesganges der relativen Niederschlagsfläche bis auf eine Differenz von 0,01 darzustellen. Die Fähigkeit des Schauermodells, auf Veränderungen in der Vorgabe des relativen Niederschlags zu reagieren, wird im folgenden Kapitel behandelt.

Untersuchung der relativen Niederschlagsfläche auf Inputveränderungen

In diesem Abschnitt wird die Reaktionszeit des Schauermodells auf Inputveränderungen untersucht. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der relativen Niederschlagsfläche als Modellinput, also dem mittlere Tagesgang des Verhältnisses zwischen postfrontaler

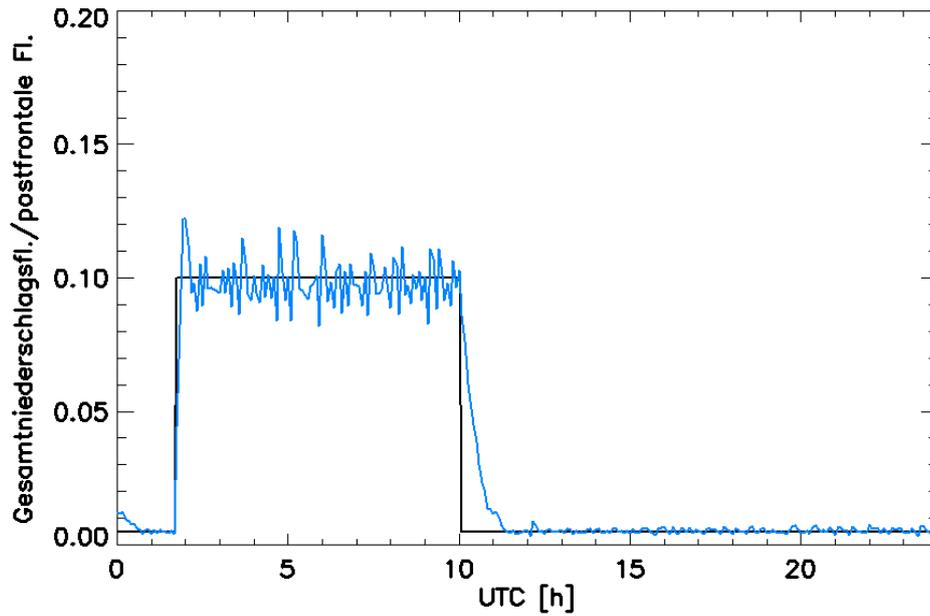


Abbildung 4.14: Stufenförmiger Tagesgang der rel. Niederschlagsfläche. In schwarz ist die vorgegebene relative Niederschlagsfläche $r_{Stu}(t)$ und in blau die durch das Schauermodell simulierte relative Niederschlagsfläche dargestellt.

Niederschlagsfläche und dem postfrontalen Gebiet. Für die hier verwendeten Testszenarien bekommt die relative Niederschlagsfläche den Vorzug gegenüber einem Tagesgang der Anzahl neu zu generierender Zellen, welches eine Vergleichbarkeit mit dem als Input dienenden Tagesgang $\bar{r}_{19}(t)$ gewährleistet. Der zum Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche zugehörige Tagesgang der neu zu generierenden Zellen wird modellintern nach Gleichung 3.7 und 3.8 umgesetzt.

Das erste Testszenario ist eine Stufenfunktion $r_{Stu}(t)$ zur Steuerung der relativen Niederschlagsfläche, welches ein fast niederschlagsfreies Modellgebiet simulieren soll, in dem in einem bestimmten Zeitintervall postfrontale Bedingungen herrschen. Dazu wurden folgende diskrete Funktionswerte von $r_{Stu}(t)$ gewählt:

$$r_{Stu}(t) = \begin{cases} 0,005 & \text{für } 0 \leq t \leq 100 \text{ Minuten} \\ 0,1 & \text{für } 105 \leq t \leq 600 \text{ Minuten} \\ 0,005 & \text{für } 605 \leq t \leq 1440 \text{ Minuten} \end{cases} . \quad (4.1)$$

Die Stufenfunktion $r_{Stu}(t)$ ist in Abbildung 4.14 (schwarz) dargestellt und der Zeitschritt beträgt weiterhin $\Delta t = 5$ Minuten. Die genannten Zeiten 105 und 600 Minuten entsprechen in der Darstellung 1,75 und 10 Stunden. Bei den gewählten diskreten Funktionswerten 0, 1 und 0,005 handelt es sich um ein manuell festgelegtes Maximum bzw. das Nichtvorhandensein von Zellen. Der Zweite hier genannte diskrete Funkti-

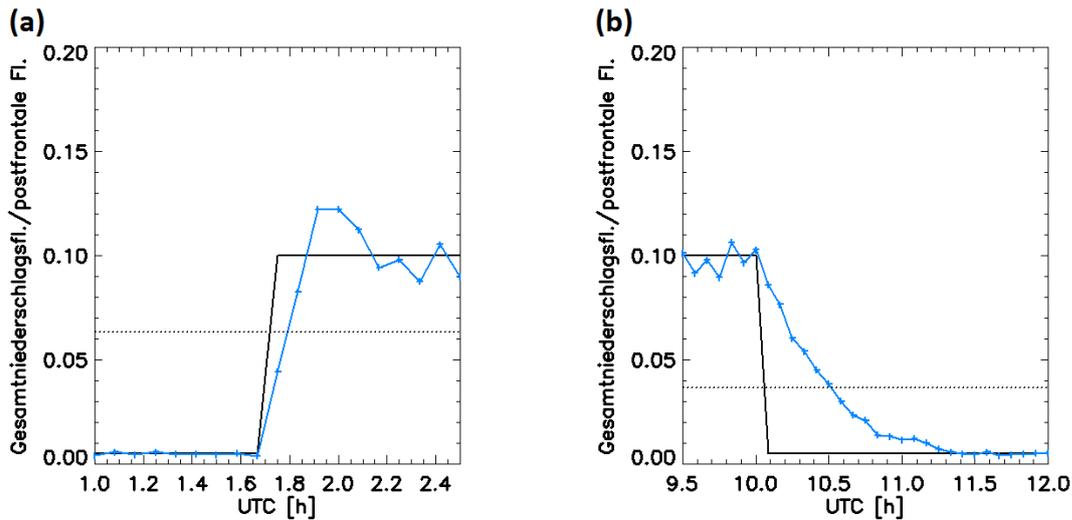


Abbildung 4.15: Simulierte (blau) und vorgegebene stufenförmige (schwarz) relative Niederschlagsfläche zum Zeitpunkt des Flächenanstiegs (a) und der Flächenabnahme (b). Oberhalb der gepunktete Linie hat sich der Funktionswert im Fall (a) mindestens bis auf das $\frac{1}{e}$ -fache der vorgegebenen rel. Niederschlagsfläche von 0.1 genähert. In (b) entspricht die gestrichelte Linie dem $\frac{1}{e}$ -fachen des Maximums von $r_{\text{Stu}}(t)$.

onswert 0,005 kann aus modelltechnischen Gründen nicht Null sein und wird deshalb auf den genannten sehr kleinen Wert gesetzt. Der gewählte Wert kann im postfrontalen Simulationsgebiet von $500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$ als annähernd niederschlagsfrei betrachtet werden, da eine relative Niederschlagsfläche von 0,005 nicht mehr als ca. 60 Zellen entspricht, welche i.d.R. Einzeller sind und somit eine sehr geringe Niederschlagsfläche aufweisen. In Abbildung 4.14 ist ebenfalls die durch das Schauermodell simulierte relative Niederschlagsfläche zu sehen (blau), welche im Mittel für die Zeit von 1,75 bis 10 Stunden 0,1 beträgt. Der verwendete Faktor g_{gen} beträgt 2,96.

Die im Folgenden untersuchte Reaktionszeit bezieht sich auf die Zeit, welche das Schauermodell benötigt, sich der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche von 0,1 auf das $\frac{1}{e}$ -fache zu nähern bzw. sich auf das $\frac{1}{e}$ -fache abzubauen.

Ab dem Zeitpunkt des Flächenanstieg der vorgegeben relativen Niederschlagsfläche (siehe Abbildung 4.15 (a)), erfolgt die Annäherung der simulierten relativen Niederschlagsfläche (blau) bis auf mindestens das $\frac{1}{e}$ -fache des Maximums von $r_{\text{Stu}}(t)$ innerhalb von zwei Zeitschritten. Bei der umgekehrten Anpassung des Schauermodells an die sofortige abrupte Verringerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche (b) dauert es sieben Zeitschritte, bis die simulierte relative Niederschlagsfläche sich auf das $\frac{1}{e}$ -fache des Maximums von $r_{\text{Stu}}(t)$ verringert hat.

Zum Verständnis dieses Unterschieds in der Reaktionszeit des Schauermodells, ist eine genauere Betrachtung der Umsetzung der relativen Soll-Niederschlagsfläche notwendig.

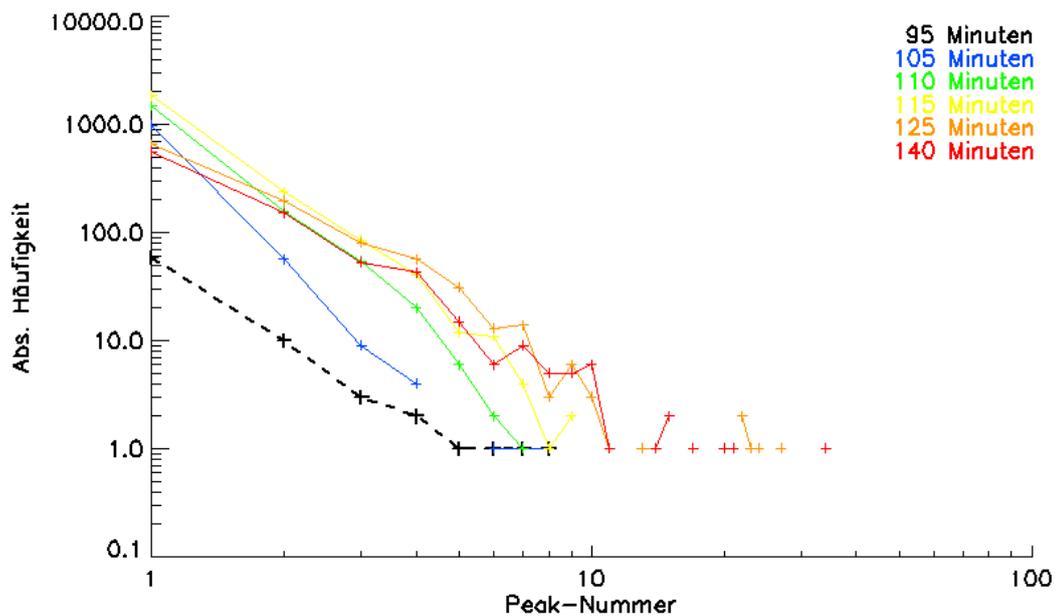


Abbildung 4.16: Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei plötzlicher Vergrößerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche (Minute 105) von 0,005 auf 0,1 für repräsentativ ausgewählte, nicht äquidistante Zeitpunkte. Funktionswerte sind nur für direkt benachbarten Klassen miteinander verbunden.

Bei der ersten Stufe von $r_{\text{Stu}}(t)$ auf 0,1 werden zum Erreichen der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche neue Zellen im Schauermodell generiert, so dass theoretisch mit dem ersten Zeitschritt die vorgegebene Niederschlagsfläche mindestens erreicht werden könnte. Im Falle der hier simulierten Stufenfunktion ist jedoch zu sehen, dass drei Zeitschritte benötigt werden, um die Vorgabe zu erreichen. Dieses ist auf die Verwendung einer Limitierung für neu generierte Zellen auf 1.000 pro Zeitschritt innerhalb der ersten vier Zeitschritte nach dem Ansteigen der Stufenfunktion zurückzuführen. Diese Limitierung wurde gewählt, da so ein extremes Überschießen der Stufenfunktionsvorgabe verhindert wird. Durch die verstärkte Generierung neuer Zellen, egal ob mit oder ohne Limitierung, resultiert eine hohe Dichte von Zellen, welche am Anfang ihrer Entwicklung stehen und somit jeweils eine dementsprechende geringe Niederschlagsfläche besitzen. Größere Zellen, welche durch Merging entstehen, sind zu diesem Zeitpunkt noch unterrepräsentiert. Erst in den folgenden Simulationsminuten kommt es zur verstärkten Bildung von Clustern durch z.B. Mergingprozesse und ein Gleichgewicht zwischen dem Generieren und Auflösen von Zellen stellt sich ein. Das sich verändernde Verhältnis zwischen Zellen mit niedrigen und hohen Peak-Nummern für repräsentativ ausgewählte, nicht äquidistante Zeitpunkte ist in Abbildung 4.16 zu erkennen. Die Peak-Nummer-Verteilung vor der Anhebung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche von 0,005 auf 0,10 in der 105. Minute entspricht der fett

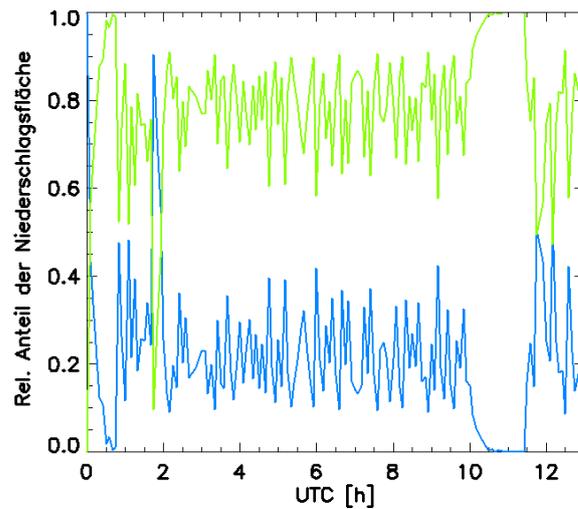


Abbildung 4.17: Relativer Anteil der Niederschlagsfläche für das Testszenario der Stufenfunktion $r_{\text{Stu}}(t)$. In grün dargestellt sind die Cluster und in blau die Einzeller. Der Flächenanstieg der Niederschlagsfläche erfolgt bei 1,75 Stunden und der Verringerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche bei 10 Stunden.

dargestellten gestrichelten Kurve, wohingegen die Verteilungen nach der Anhebung in schwarz bzw. farbig dargestellt sind. Wie erwartet wird direkt nach der Anhebung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche die Vorgabe durch die Generierung neuer Zellen realisiert, was sich durch die höhere Anzahl von Ein-, Zwei-, Dreizellern und das kaum Vorhandensein von Multiclustern zeigt. Die Einzeller überwiegen dabei in den ersten Zeitschritten nach der Anhebung hinsichtlich der Niederschlagsfläche, wohingegen die aus Clustern resultierende Niederschlagsfläche nicht bzw. kaum vorhanden ist. Zu sehen sind diese Anteile an der Niederschlagsfläche in Abbildung 4.17, wobei die Anhebung der relativen Niederschlagsfläche bei 105 Minuten bzw. 1,7 Stunden sich in einem Maximum der Einzeller äußert.

Der weitere Verlauf der Peak-Nummer-Verteilung entspricht ebenfalls den Erwartungen, da sich aufgrund der höheren Dichte von Zellen Multicluster durch Mergingprozesse bilden und somit die anfängliche Anzahl von Zellen mit einer höheren Peak-Nummer auf Kosten von Zellen mit einer geringeren Peak-Nummer zunimmt. Auch die relative Niederschlagsfläche von Einzellern und Clustern (siehe Abbildung 4.17) normalisiert sich im weiteren Verlauf in dem Sinne, dass zwar stärkere Schwankungen des relativen Anteils an der Gesamtniederschlagsfläche vorhanden sind, sich jedoch im Mittel gesehen das Gleichgewicht zwischen der Niederschlagsfläche von Einzellern und Clustern (ca. 20% bzw. ca. 80%) wieder einstellt.

Im umgekehrten Fall, was der zweiten Stufe der relativen Niederschlagsfläche von 0,10 auf 0,005 (Flächenabnahme bei Minute 605) entspricht, verursacht die Flächenände-

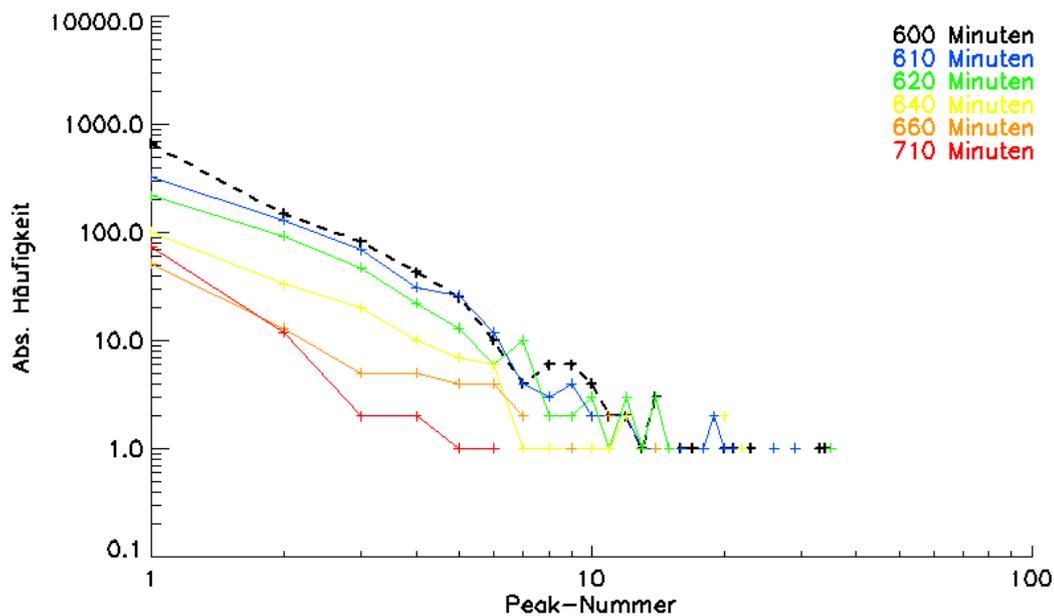


Abbildung 4.18: Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei plötzlicher Verringerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche (Minute 605) von 0,1 auf 0,005 für repräsentativ ausgewählte, nicht äquidistante Zeitpunkte. Funktionswerte sind nur für direkt benachbarten Klassen miteinander verbunden.

zung eine Unterbrechung der Generierung neuer Zellen, um die vorgegebene geringere relative Niederschlagsfläche zu erreichen. Diese ausbleibende Generierung neuer Zellen im Schauermodell führt zur Abnahme der Anzahl von Zellen mit einer geringen Peak-Nummer. Zu sehen ist diese Entwicklung in Abbildung 4.18. Bei der gestrichelten Peak-Nummer-Verteilung handelt es sich zeitlich gesehen kurz vor der Niederschlagsflächenänderung (Änderung bei Minute 605) und die farbigen Peak-Nummer-Verteilungen entsprechen ausgewählten Zeitpunkten nach der 605. Minute. Wie erwartet nimmt die Anzahl von Zellen mit Peak-Nummern jenseits von 5 in den ersten 15 Minuten nach der stufenförmigen Änderung der vorgegebenen Niederschlagsfläche nicht signifikant ab. Erst nach der 620. Minute ist zu erkennen, dass die Verringerung der Anzahl von Zellen sich zu höheren Peak-Nummern ausbreitet. Das bedeutet, dass sich nach dem Unterbrechen der Generierung neuer Zellen die bestehenden Multi-Cluster solange weiter entwickeln bis sie sich aufgrund der internen Wachstumsprozesse auflösen. Das Auflösen wird in dem Sinne beschleunigt, da immer weniger neu generierte Zellen für Mergingprozesse zur Verfügung stehen. Die allmähliche Auflösung ist auch in der relativen Niederschlagsfläche ersichtlich (siehe Abbildung 4.15(b)). Die ausbleibende Generierung neuer Zellen ist indirekt auch über den relativen Anteil der Niederschlagsfläche von Einzellern und Clustern ersichtlich (siehe Abbildung 4.17). Zum Zeitpunkt der zweiten Stufe bei 605 Minuten sinkt, wie erwartet, die relative Nie-

derschlagsfläche der Einzeller (blau) auf null, so dass die durch Cluster hervorgerufene Niederschlagsfläche (grün) dominiert.

Bei der Betrachtung des Tagesgang des Parameters b der Regressionsfunktion (Gleichung 2.1) für die Peak-Nummerverteilung für Peak-Nummern von 1 bis 10 ist ersichtlich, dass sich in Zeiträumen ohne Veränderung der vorgegebene relativen Niederschlagsfläche eine Art Gleichgewichtszustand bzgl. dem Verhältnis von kleinen und großen Zellen einstellt. Dieser Gleichgewichtszustand, ausgedrückt durch den Exponenten b , ist in Abbildung 4.19 außerhalb der Zeiträume mit einer Änderung der relativen Niederschlagsflächenentwicklung (105. Minute und 605. Minute bzw. 1,75 und 10 Stunden) zu sehen. Der Zeitraum mit dem Maximum von $r_{\text{Stu}}(t)$ weist dabei einen annähernden Gleichgewichtszustand von ca. -2,5 auf und ist damit Vergleichbar zu dem Gleichgewichtszustand von b im Peak-Nummernbereich 1 bis 10 (siehe Abbildung 4.4 rote Kurve), welcher sich aus $\bar{r}_{19}(t)$ ergibt und $\bar{b} = -2,52$ (Standardabweichung 0,19) beträgt. Die Bereiche vor und nach dem Maximum von $r_{\text{Stu}}(t)$ sind gekennzeichnet durch eine geringe Anzahl von Zellen im Simulationsgebiet und weisen dadurch eine deutlich größere Streuung auf, liegen im Mittel gesehen jedoch bei ungefähr einem Wert von -2,0. In der 105. Minute findet durch die sprunghafte Vergrößerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche eine Störung des Gleichgewichtszustandes statt. Die daraufhin steigende Anzahl von Zellen mit einer kleinen Peak-Nummer äußert sich in einer Verkleinerung von b . Kurz darauf bilden sich u.a. durch Mergingereignisse größere Niederschlagszellen und das neue Gleichgewicht stellt sich ein. Ebenso führt die zweite Stufe der vorgegebenen relativen Niederschlagsflächenentwicklung zu einer Störung des Gleichgewichtszustandes, bei der es zu einer Vergrößerung von b kommt. Die Störung bei der zweiten Stufe der relativen Niederschlagsflächenentwicklung dauert länger an, als dass bei der ersten Stufe der Fall war. Die Begründung hierfür liegt darin, dass die Platzierung von Zellen im Simulationsgebiet (Stufe 1) schneller zu großen Niederschlagszellen führt, als sich große Niederschlagsgebiete auflösen können, nachdem die Zufuhr von neuen Zellen unterbunden wurde (Stufe 2).

Eine weitere Untersuchung des Modelles auf Inputveränderungen findet mit einer Sinusfunktion statt. Im Unterschied zur oben genannten Stufenfunktion erfolgt die Änderung der relativen Niederschlagsfläche nicht abrupt sondern in Anlehnung an eine Sinusfunktion, um das Verhalten des Modelles beim allmählichen Ansteigen bzw. Absinken der relativen Niederschlagsfläche zu untersuchen. Ein realer mittlerer Tagesgang weist zwar Abschnitte mit gemäßigten relativen Flächenänderungen auf und könnte als Testszenario in Betracht kommen, jedoch wäre damit keine Untersuchung unter kontrollierten Bedingungen möglich, welche beispielsweise den Anstieg der relativen Fläche auf einen bestimmten Wert genauer betrachtet. Die Vorgabe der relativen Nie-

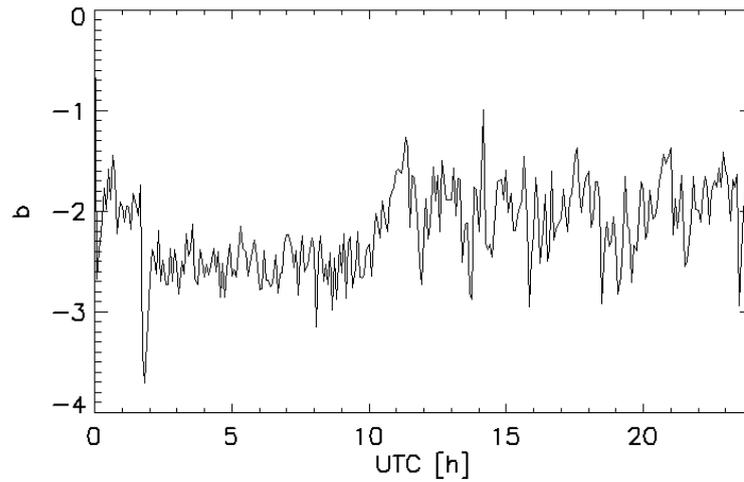


Abbildung 4.19: Tagesgang des Exponenten b der Regressionsfunktion für die Peak-Nummerverteilung resultierend aus einer Stufenfunktion der relative Niederschlagsfläche. Betrachtet wurden Peak-Nummern von 1 bis 10. Bei jeweils 1,75 und 10 Stunden ist eine Änderung von b ausgelöst durch die Vergrößerung bzw. Verringerung der relativen Niederschlagsfläche zu erkennen.

derschlagsfläche entspricht dem Betrag einer eineinhalbfachen Sinusschwingung, wobei das Maximum und das Minimum der Funktion als das Maximum von Gleichung 3.6 (mit $0 \text{ UTC} \leq t \leq 24 \text{ UTC}$) bzw. als 0,01 definiert wird. Die relative Niederschlagsfläche lautet somit

$$r_{\text{Sin}}(t) = \left| \sin\left(3\pi \cdot \frac{t}{24\text{h}}\right) \cdot (0,146 - 0,01) + 0,01 \right| \quad , \quad \text{mit } 0 \leq t \leq 24\text{h} \quad . \quad (4.2)$$

Diese Funktion und die daraus resultierende relative Niederschlagsfläche des Schau-ermodells sind in Abbildung 4.20 (schwarz) dargestellt. Beginnend bei jeweils 0,001, erreicht die relative Niederschlagsfläche im jeweiligen Maximum ca. 0,144. Die Dauer für eine halbe Sinusschwingung von 0 bis π ist gleichbedeutend mit einem Zeitraum von 480 Minuten. Hier ist zu sehen, dass die vorgegebene Niederschlagsfläche durch das Modell (blau) nicht erreicht wird. Zurückzuführen ist dies auf den Faktor g_{gen} bei der Zellengenerierung, da dieser zur Verhinderung eines Kaskadeneffektes (siehe Kapitel 4.2.1) auf maximal $g_{\text{gen}} = 1,36$ festgelegt werden kann. Die Differenz zwischen Vorgabe und Modell ist an dieser Stelle vernachlässigbar, da primär die Zu- und Abnahme des relativen Niederschlagsfeldes untersucht wird. Abbildung 4.22 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer für verschiedenen Zeitpunkte der relativen Niederschlagsflächenzunahme (das Minimum tritt zum Zeitpunkt 480 Minuten auf). Im Vergleich zur Stufenfunktion kommt es nicht zu einem sprunghaften Anstieg der Zellen mit einer Peak-Nummer von eins und zwei, der sich anschließend durch das Bilden von

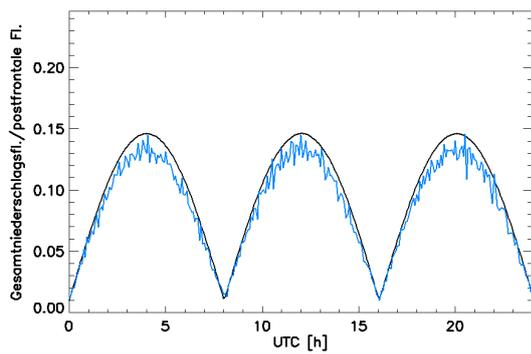


Abbildung 4.20: Betrag der relativen Niederschlagsfläche für eine einhalbfache Sinusschwingung (schwarz). In blau dargestellt ist die relative Niederschlagsfläche des Schauermodells.

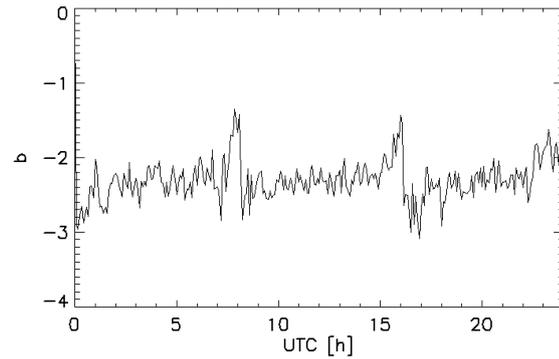


Abbildung 4.21: Tagesgang des Parameters b der Regressionsfunktion für die Peak-Nummerverteilung resultierend aus dem Betrag einer einhalbfachen Sinusschwingung der relativen Niederschlagsfläche. Bei jeweils 8 und 16 UTC ist eine signifikante Änderung von b , ausgelöst durch die Verringerung der relativen Niederschlagsfläche und den direkt darauf folgenden Anstieg, zu erkennen.

Clustern verringert, sondern die simultane Zunahme der absoluten Häufigkeit der Peak-Nummern erfolgt über einen größeren Peak-Nummernbereich bis hin zur Peak-Nummer 15. Besonders im Verlaufe des Anstieges ist diese Art der Zunahme zu erkennen, da sich die Steigung einer theoretischen Regressionsgeraden der Häufigkeitsverteilung bei einer doppelt-logarithmischen Darstellung für Peak-Nummern im Bereich von ca. 1 bis 6 nicht wesentlich ändert, sondern sich hauptsächlich nur die absolute Anzahl der Zellen ändert, mit Ausnahme des Zeitpunktes 480 Minuten. Zurückzuführen ist diese Art der Zunahme auf die längere Zeit von 240 Minuten, bis die relative Niederschlagsfläche ihr Maximum erreicht hat (bei einer Stufenfunktion beträgt die Zeit 5 Minuten). So ist es möglich, dass bereits während der Zunahme der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche Mergingprozesse Zellen mit höheren Peak-Nummern bilden können. Die kaum vorhandene Änderung der Steigung einer Regressionsfunktion in der doppelt-logarithmischen Darstellung kann indirekt über den Parameter b der Potenzfunktion aus Gleichung 2.1 gezeigt werden. Für den hier diskutierten sinusförmigen Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche ist der Tagesgang von b für den Peak-Nummernbereich 1 bis 6 in Abbildung 4.21 dargestellt. Es ist zu sehen, dass bis auf die Bereiche um die Minima b relativ konstant zwischen ca. -2,0 und -2,7 verläuft, was einem Bereich entspricht in dem ein annähernder Gleichgewichtszustand besteht. Im ersten Drittel der dargestellten Sinusfunktion ist im zeitlichen Verlauf zu erkennen, dass b im Bereich von ca. -3,0 startet, was darauf zurückzuführen ist, dass sich zu Simulationsbeginn keine Zellen im Simulationsgebiet befinden und sich das Niederschlagsgebiet inklusive der Cluster erst aufbauen muss. Das zweite und dritte Drittel des Tagesganges von b zeigt

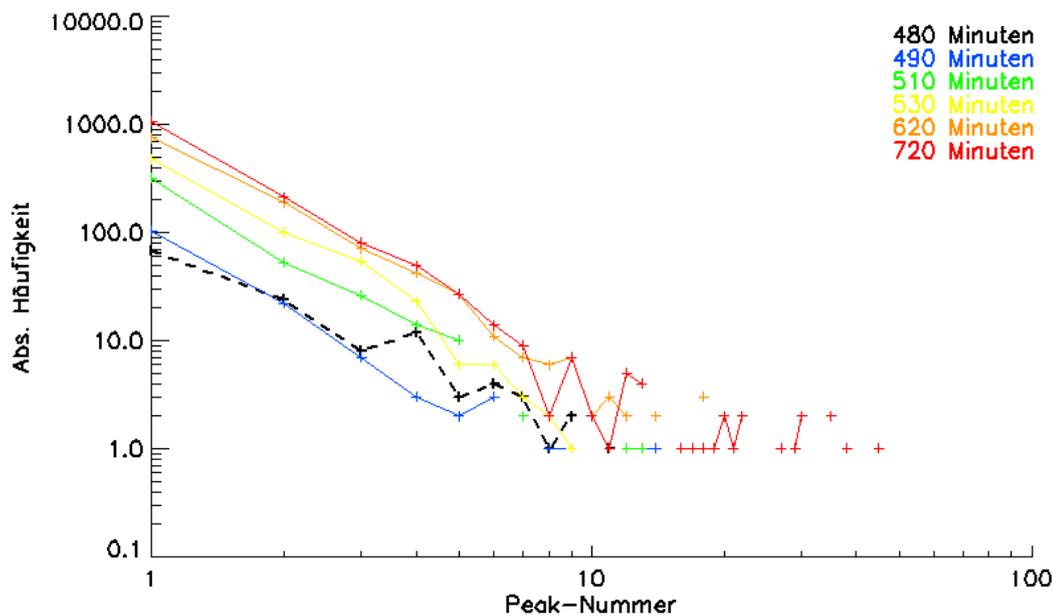


Abbildung 4.22: Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei sinusförmiger Zunahme der vorgegebenen relativer Niederschlagsfläche von 0,001 auf 0,144 für repräsentativ ausgewählte, nicht äquidistante Zeitpunkte. Das Minimum der relativen Niederschlagsfläche tritt zum Zeitpunkt 480 Minuten auf. Funktionswerte sind nur für direkt benachbarten Klassen miteinander verbunden.

einen eher konstanten Verlauf, welcher nicht so stark durch den kompletten Neuaufbau des Schauerfeldes und das damit auftretende Minimum geprägt ist. Zurückzuführen ist dies darauf, dass sich im vorangegangenen Minimum nicht alle Cluster auflösen konnten und somit das gesamte Niederschlagsgebiet inklusive der Cluster schneller aufgebaut werden kann. Diese Zu- und Abnahme ist vergleichbar mit dem im Modell verwendeten realen mittleren Tagesgang.

Bei der Betrachtung der Minima in Abbildung 4.21, bei denen die vorgegebene relative postfrontale Niederschlagsfläche auf 0,01 herabgesetzt wird, ist zu erkennen, dass jeweils vor den Minima bei 8 und 16 UTC b auf einen Wert von bis zu -1,5 ansteigt. Dieser Anstieg bedeutet, dass die Steigung der oben genannten Regressionsfunktion der Peak-Nummerverteilung horizontaler wird. Ursache hierfür ist die Abnahme der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche und somit eine Verringerung der Anzahl von Zellen mit einer geringen einstelligen Peak-Nummer, da keine bzw. sehr wenige neuen Zellen im Modell generiert werden müssen, um die geringer werdende Soll-Niederschlagsfläche beizubehalten. Die Häufigkeitsverteilung für Peak-Nummern während der sinusförmigen Verringerung der Niederschlagsfläche für verschiedene Zeitpunkte ist in Abbildung 4.23 dargestellt (das Minimum tritt zum Zeitpunkt 960 Minuten auf). Nach dem Passieren der Minima der relativen Niederschlagsflächenvorgabe

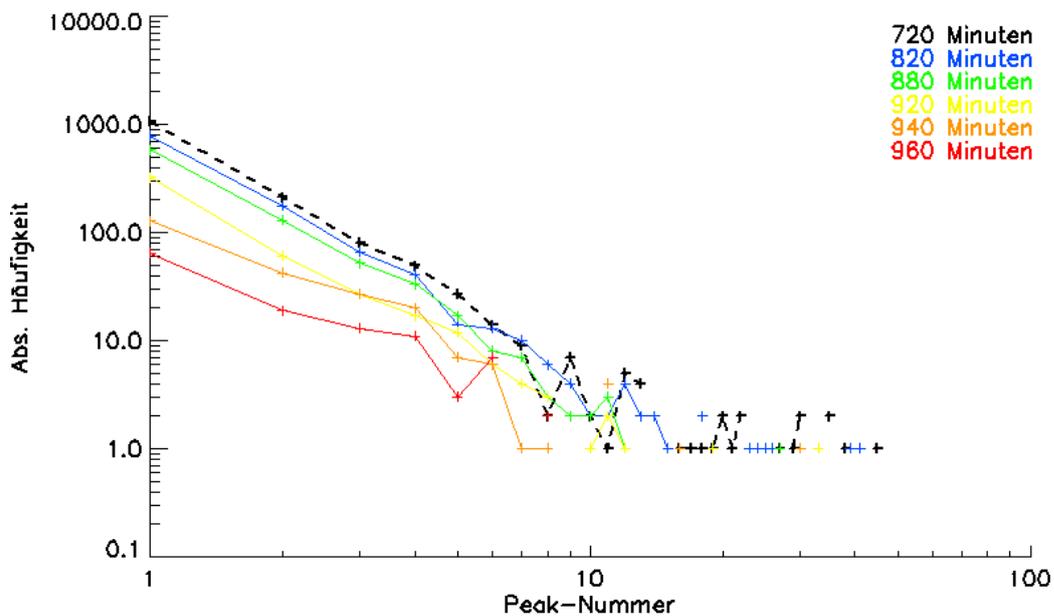


Abbildung 4.23: Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei sinusförmiger Abnahme der vorgegebenen relativer Niederschlagsfläche von 0,144 auf 0,001 für repräsentativ ausgewählte, nicht äquidistante Zeitpunkte. Das Minimum der relativen Niederschlagsfläche tritt zum Zeitpunkt 960 Minuten auf und äußert sich durch eine geringe Anzahl von Zellen. Funktionswerte sind nur für direkt benachbarten Klassen miteinander verbunden.

kommt es zu einem umgekehrten Prozess. Zum Erreichen der Niederschlagsflächenvorgabe der stetig steigenden Sinusfunktion kommt es zu einer verstärkten Generierung neuer Zellen und somit zu einer entgegengesetzten Veränderung der Steigung in der Peak-Nummerverteilung des oben genannten Bereiches. Diese Veränderung schlägt sich im Parameter b nieder (siehe Abbildung 4.21), welcher sich auf bis zu $-3,1$ verringert

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die vorgegebenen Tagesgängen der relativen Niederschlagsfläche zu simulieren. Eine Ausnahme bildet die oben genannte Differenz zwischen simulierter und vorgegebener relativer Niederschlagsfläche, welche zur Vermeidung eines Kaskadeneffektes bestehen bleiben muss. An dieser Stelle sollte jedoch gezeigt werden, dass die Fähigkeit des Modelles darin besteht, schnell genug und korrekt auf Zu- und Abnahme des vorgegebenen relativen Niederschlagsfeldes zu reagieren. Die hier verwendeten Szenarien der Stufenfunktion und der Sinusfunktion für die Vorgabe der relativen Niederschlagsfläche dienten als Test und stellen Tagesgänge dar, welche Veränderungen bzgl. der relativen Niederschlagsfläche aufweisen, die stärker ausgeprägt sind als im realen mittleren Tagesgang (siehe Gleichung 3.6). Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Peak-Nummerverteilung konnte gezeigt werden, dass sich ein Gleichgewicht zwischen großen und kleinen Zellen (hohe bzw. geringe

Peak-Nummer) einstellt. Dieses Gleichgewicht wird durch Änderungen der vorgegeben relativen Niederschlagsfläche und somit des Quellterms für neue Zellen gestört. Eine vermehrte Produktion von neuen Zellen hat einen steileren Verlauf der Regressionsfunktion in der doppeltlogarithmischen Darstellung der Peak-Nummerverteilung zur Folge, was in der weiteren zeitlichen Entwicklung Mergingprozesse begünstigt und somit das Gleichgewicht zwischen größeren und kleineren Zellen wieder hergestellt wird. Im umgekehrten Fall einer verringerten Produktion von neuen Zellen, was einem flacheren Verlauf der Regressionsfunktion entspricht, ist das Schauermodell in der Lage das Gleichgewicht durch eine daraus folgende geringere Anzahl von Mergingprozessen wieder herzustellen. Bei einer mäßigen Änderung der relativen Niederschlagsfläche bzw. der Produktion von neuen Zellen, wie es beispielsweise in einem realen mittleren Tagesgang oder in den oberen Bereichen des sinusförmigen Testtagesganges der Fall ist, erfährt das Gleichgewicht zwischen größeren und kleineren Zellen kaum eine Änderung. Das Schauermodell ist somit in der Lage bzgl. der zeitlichen Entwicklung der Peak-Nummerverteilung adäquat genug auf natürliche Veränderungen der relativen Niederschlagsfläche zu reagieren und somit einen vorgegebenen Tagesgang zu simulieren.

4.2.2 Tagesgang der Zellenanzahl und der Niederschlagsfläche

Eine Betrachtung der relativen Anteile der Niederschlagsflächen sowie der Anzahl von Zellentypen erlaubt Rückschlüsse auf die Verteilung von Niederschlagsflächen und die Häufigkeit von Einzellern bzw. Clustern. Abbildung 4.24 (a) zeigt die Niederschlagsflächenentwicklung in Abhängigkeit von der Zeit, wobei der relative Anteil der Niederschlagsfläche der Einzeller in blau und die Niederschlagsfläche der Cluster, also Single-Cluster und Multi-Cluster, in grün dargestellt sind. Mit im Mittel $78,9\%^1$ (Standardabweichung $8,7\%$) überwiegt die Niederschlagsfläche der Cluster gegenüber den Einzellern mit $21,1\%^1$ (Standardabweichung $8,7\%$). Ähnliche Ergebnisse haben auch die Untersuchungen von WEUSTHOFF und HAUF (2008A) gezeigt (siehe Abschnitt 2.1), bei denen der mittlere Anteil der Niederschlagsfläche von Einzellern bei 15% und somit $6,1\%$ niedriger lag als bei dieser Arbeit. Bei der Betrachtung der relativen Anzahl von Einzellern und Clustern in Abbildung 4.24 (b) zeigt sich, wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, ein umgekehrtes Bild, welches nicht mehr von den Clustern sondern von den Einzellern dominiert wird. Der aus dem Schauermodell hervorgegangene, relative Anteil der Einzeller an der Gesamtzahl entspricht im Mittel $63,1\%^1$ (Standardabweichung $6,3\%$). Der Vergleichswert, der als letztes genannten Quelle bzw. Abschnitt,

¹Wert bezieht sich auf einen 24-stündigen Simulationszeitraum

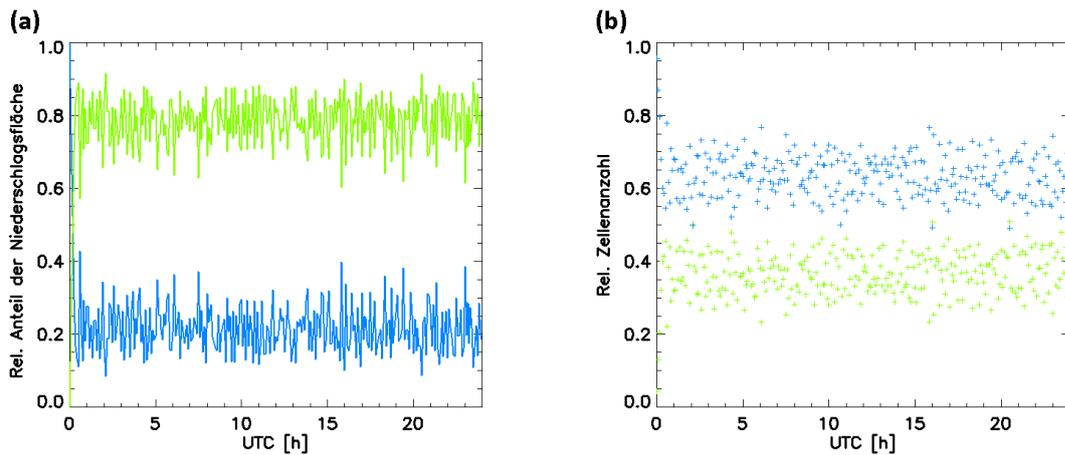


Abbildung 4.24: Tagesverlauf des relativen Anteils der Niederschlagsfläche von Einzellern und Clustern (a) sowie die relative Anzahl von Zellen (b) für eine simulierte postfrontale Situation. Unterteilt sind die Zellen in Einzeller (blau) und Cluster (grün). Trotz des vorgegebenen Tagesganges der relativen Niederschlagsfläche, weist sowohl die Zellenanzahl als auch die Niederschlagsfläche einen nahezu konstanten Verlauf auf. Der mittlere Anteil der Cluster an der Gesamtzellanzahl beläuft sich auf ungefähr 35%, wohingegen die Niederschlagsfläche der Cluster im Mittel einen Anteil von ca. 80% an der Gesamtniederschlagsfläche aufweist.

beträgt für die relative Anzahl von Einzellern 69% und liegt damit 5,9% über dem Mittelwert des Schauermodells. Untersuchungen von THEUSNER und HAUF (2004) ergaben für die Einzeller in einem postfrontalen Niederschlagsgebiet sogar einen relativen Anteil von 72%. Die im Schauermodell ermittelten Werte für die relativen Anteile der Einzeller und Cluster an der Niederschlagsfläche bzw. Anzahl weisen im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen je nach Quelle eine Differenz von bis zu 8,9% auf. Das eigentlich wichtige Charakteristikum des postfrontalen Niederschlagsfeldes in der Hinsicht, dass Einzeller zahlenmäßig dominieren, bei der Betrachtung der Niederschlagsfläche jedoch die Cluster den größten Anteil haben, wird durch das Schauermodell wiedergegeben.

Der Vergleich des simulierten postfrontalen Niederschlagsfeldes mit den Untersuchungen von THEUSNER und WEUST hat gezeigt, dass das postfrontale Niederschlagsfeld bzgl. seiner Eigenschaften durch das Schauermodell sehr gut wiedergegeben wird. Hinsichtlich der Übergangsmatrix und der Clustergrößenverteilung als Input sollte es trivial erscheinen, dass das Schauermodell diese Verteilung bzw. die Übergangsmatrix reproduzieren kann. Es darf an dieser Stelle jedoch nicht vergessen werden, dass in der Übergangsmatrix zwar Merging- und Splittingprozesse enthalten sind, der Zeitpunkt jedoch, wann diese innerhalb der Lebensdauer einer Zelle stattfinden und welche anderen Zellen bei diesen Prozessen beteiligt sind, nicht durch die Übergangsmatrix beschrieben wird. Da diese Prozesse separat im Schauermodell durch die erwähnten geometri-

schen und zeitlichen Kriterien sowie Zufallsprozesse berücksichtigt werden, erscheint es nicht mehr trivial, dass das Schauermodell die oben erwähnte Verteilung wiedergeben und die Übergangsmatrix hinsichtlich ihrer Charakteristika reproduzieren kann. Bei der relativen Peak-Nummer-Verteilung hat sich gezeigt, dass Zellen mit einer geringen Peak-Nummer leicht überrepräsentiert und Zellen mit einer großen Peak-Nummer leicht unterrepräsentiert sind, dennoch beträgt die maximale Abweichung in der relativen Häufigkeitsverteilung nur ca. $-3 \cdot 10^{-3}$. Die relative Peak-Nummer-Verteilung, welche nicht als Input verwendet wird, wird somit sehr gut durch das Schauermodell wiedergegeben. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der relativen Niederschlagsfläche bzw. der relativen Anzahl von Clustern an der Gesamtniederschlagsfläche bzw. an der Gesamtanzahl von Zellen. Im Mittel kommt es zu einer Abweichung von maximal 6,1% bzw. 8,9%. Darüber hinaus ist das Schauermodell in der Lage, ein wichtiges Charakteristikum des postfrontalen Niederschlagsgebietes korrekt wiederzugeben, bei dem Einzeller zahlenmäßig dominieren, bei der Betrachtung der Niederschlagsfläche jedoch die Cluster den größten Anteil aufweisen. In zeitlicher Hinsicht konnte gezeigt werden, dass das simulierte postfrontale Niederschlagsfeld in der relativen Häufigkeitsverteilung der Zellebensdauern maximal eine Differenz von 0,07 aufweist. Bei der Betrachtung von Niederschlags- und Trockenzeiten an einem festen Ort innerhalb des Simulationsgebietes zum Vergleich mit beobachteten Niederschlagsereignissen konnte gezeigt werden, dass diese Art des Vergleiches nicht ausreichend für eine Modellüberprüfung ist, da die Dauer von Niederschlagsereignissen, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, u.a. auch von der vorherrschenden Windgeschwindigkeit und somit der Verlagerungsgeschwindigkeit der Zellen abhängt. Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Simulation von postfrontalen Niederschlagsereignissen durch das hier beschriebene Schauermodell möglich ist.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Simulation von postfrontalen Niederschlagsfelder in Übereinstimmung mit wichtigen räumlichen und zeitlichen Charakteristika von beobachteten postfrontalen Niederschlagsfeldern möglich ist.

5 Anwendung und Ausblick

5.1 Anwendung

Niederschlagszellen in postfrontalen Niederschlagsgebieten weisen ein umfangreiches Größenspektrum auf. Insbesondere größere Niederschlagszellen können an einem festen Ort für kurzzeitige, hohe Niederschlagsraten sorgen, wobei die lokal gefallene Niederschlagsmenge maßgeblich durch die Verlagerungsgeschwindigkeit der Niederschlagszelle bestimmt wird. Auch insgesamt gesehen ist die Niederschlagsmenge beim Durchzug eines kompletten postfrontalen Niederschlagsfeldes nicht zu unterschätzen. Je nach Anwendungsbereich können von dem entwickelten Schauermodell entweder das gesamte Schauerfeld oder nur Teilbereiche davon zum Einsatz kommen. Eine solche Anwendung bzgl. des gesamten postfrontalen Niederschlagsfeldes besteht z.B. in der Luftfahrt (siehe Kapitel 5.1.1) oder bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen (siehe Kapitel 5.1.3). Teilbereiche des postfrontalen Niederschlagsfeldes würden z.B. als meteorologischer Antrieb für ein Niederschlagsabflussmodell in Frage kommen (siehe Kapitel 5.1.2).

5.1.1 Luftfahrt

Die Sicherheit in der Luftfahrt wird maßgebend durch das Wetter beeinflusst. Durch das weite Spektrum an Zellgrößen im postfrontalen Bereich besteht ein differenziertes Gefährdungspotenzial für den Flugverkehr. Für große Verkehrsflugzeuge kann davon ausgegangen werden, dass durch kleine Zellen, welche im Niederschlagsradarbild eine geringe Niederschlagsrate besitzen i.d.R. keine bzw. kaum Gefahr ausgeht, da diese Zellen keine vertikale Erstreckung aufweisen, die die Reiseflughöhe von großen Verkehrsflugzeugen erreicht. Sollten große Verkehrsflugzeuge bei Start oder Landeanflügen in den damit verbundenen geringeren Flughöhen durch kleine Zellen fliegen, besteht aufgrund der recht großen Flugzeugmasse kein signifikantes Sicherheitsrisiko z.B. durch Turbulenz im Randbereich oder innerhalb eines Niederschlagsgebietes. Kleine Sportflugzeuge hingegen können jedoch aufgrund ihrer geringen Masse und ge-

ringeren Flughöhe eher in Schwierigkeiten geraten. Hinzu kommt, dass kleinere Sportflugzeuge i.d.R. nach Sichtflugregeln (VFR) fliegen und somit nicht durch Zellen bzw. Wolken hindurchfliegen dürfen. Je nach Flugzeuggröße und Flughöhe kann somit die Sicherheit des Flugverkehrs beeinträchtigt werden. Konkrete Gefahren gehen dabei hauptsächlich von Cbs aus, welche in den mittleren Breiten eine vertikale Erstreckung von bis zu ca. 12 km aufweisen und somit bis in die Reiseflughöhe von Verkehrsflugzeugen reichen. Aber auch Cbs mit einer geringeren vertikalen Erstreckung können während der Start- oder Landephase zu Gefahren führen. Konkret geht es dabei um folgende mit Cbs verbundene Gefahren: Blitzschlag stellt aufgrund der Wirkung der Flugzeugzelle als Faradayscher Käfig keine unmittelbare Gefahr für die Insassen oder die Elektronik da. Es kann jedoch zur Blendung der Piloten, zu Verschweißung von mechanisch beweglichen Flugzeugteilen aufgrund der Temperatur von ca. 30.000 K im Blitzkanal (REIBER 1998; WALLACE und HOBBS 2006) oder zu Beschädigungen an den Blitzein- und Blitzaustrittsstellen (SASSE 2000) kommen. Desweiteren kann der Niederschlag zur Sichtbeeinträchtigung führen und durch größeren Hagel kann es zu einer Beschädigung von Fenstern und der Flugzeugaußenhaut kommen. Eine weitere direkt nicht sichtbare Gefahr besteht durch Turbulenz, welche in schwerer Form aus Windscherung zwischen Auf- und Abwindgebieten innerhalb einer Niederschlagszelle resultieren. Auch mehrere hundert Meter oberhalb der Cb und in einem horizontalen Abstand von ca. 37 km kann noch Turbulenz auftreten (BRENNAN 1983), genauso wie unterhalb der Cb in Form von Downbursts, was dazu führen kann, dass beim Unterfliegen einer Cb abrupte Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsänderungen auftreten können. Das hier entwickelte Schauermodell kann an dieser Stelle weiterhelfen, wenn es mit einem Modell zur Simulation von Wetterereignissen in einem Luftverkehrsmodell kombiniert wird. Erste Untersuchungen dazu sind im Rahmen einer Bachelorarbeit von J. Siedler mit dem am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover entwickeltem DIVMET (DIVert METeorology) Modell geschehen, welches die Interaktion zwischen Luftverkehr und sicherheitsrelevantem Wetter modelliert (HAUF *et al.* 2013). DIVMET berechnet Ausweichrouten für Situationen mit flugsicherheitsgefährdetem Wetter hinsichtlich der Reduzierung von Verspätungen sowie einer Steigerung der Sicherheit und stellt somit ein Werkzeug zur Unterstützung von Piloten und Fluglotsen unter schwierigen Wetterbedingungen dar. Die Kombination der beiden Modelle erfolgt über die Weitergabe der Schauerzellen als Polygone an DIVMET. Eine Differenzierung zwischen kleinen Zellen, welche hauptsächlich nur für Kleinflugzeuge sicherheitsrelevant sind, und größeren Schauerzellen erfolgte in diesen ersten Versuchen nicht. Ein Schauerfeld mit der zugehörigen berechneten Ausweichroute ist in Abbildung 5.1 dargestellt. In hellblau sind die postfrontalen Niederschlags-

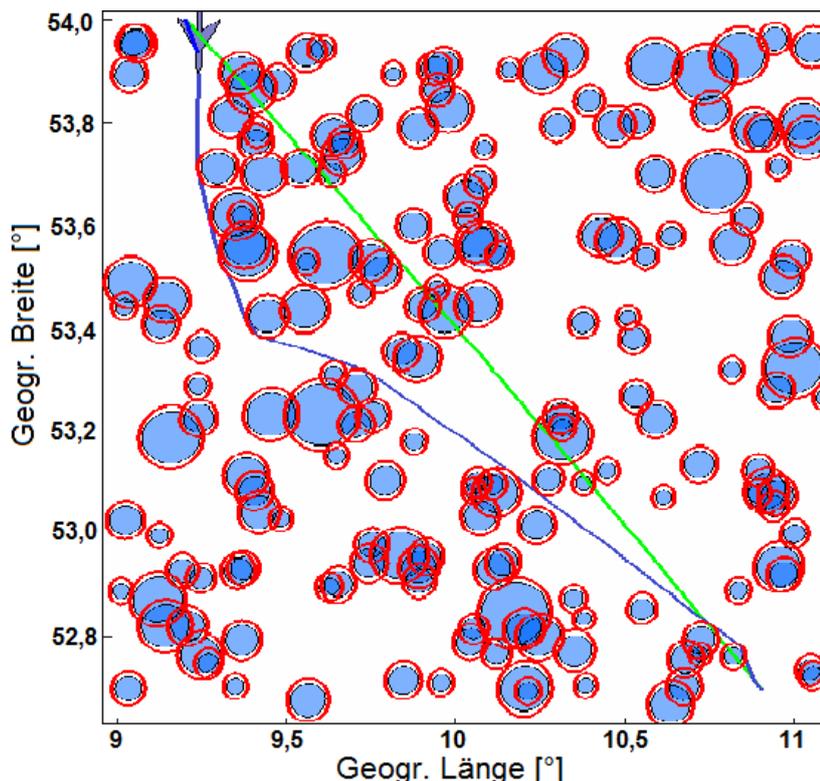


Abbildung 5.1: Darstellung einer Ausweichroute um Zellen eines postfrontalen Niederschlagsgebietes mit DIVMET. Dargestellt sind die postfrontalen Zellen (hellblau), der zugehörige Sicherheitsabstand (rot), die geplante Route (grün) und die Ausweichroute (blau). [Institut für Meteorologie und Klimatologie, LUH, J. Siedler]

zellen und in rot die zugehörigen Sicherheitsabstände, die die minimale Entfernung von Flugzeugen zu den Zellen darstellen, zu sehen. In grün ist eine geplante Flugroute zu sehen. DIVMET berechnet mit diesen Informationen eine Ausweichroute (blau), welche eine sichere Passage des Zellfeldes ermöglicht. Für die Routenberechnung wurde der Einfachheit halber ein statisches Feld aus Zellen angenommen.

5.1.2 Niederschlagsabfluss

Konvektive Zellen bilden oft durch Wachstum und die auch im Schauermodell berücksichtigten Mergingprozesse größere, mesoskalige Zellen. Diese Zellen können hohe Niederschlagsraten aufweisen, welche i.d.R. lokal begrenzt sind, jedoch zu Überflutungen führen können. Eine sehr wichtige Rolle spielt dabei die Verlagerungsgeschwindigkeit der Zellen, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die an einem Ort gefallene Niederschlagsmenge hat. Beispielsweise kann eine Zelle mit vergleichsweise geringer Niederschlagsrate bei einer nahezu kaum vorhandenen Verlagerung für große Niederschlagsmengen an einem Ort sorgen. Wie sich gefallener Niederschlag auf beispielsweise

ein Einzugsgebiet eines Flusses auswirkt, kann mit Niederschlagsabflussmodellen untersucht werden. Diese berücksichtigen i.d.R. mehrere Prozesse wie z.B. die Grundwasserneubildung und die Speicherung von Wasser im Boden um daraus den Oberflächenabfluss in dem betreffenden Gebiet zu simulieren (LEAVESLEY *et al.* 2005). Niederschlagsabflussmodelle, wie z.B. das Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) des U.S. Geological Survey (LEAVESLEY *et al.* 2005; MARKSTROM *et al.* 2008; LAFONTAINE *et al.* 2013) oder das HBV des Swedish Meteorological and Hydrological Institute (LINDSTRÖM *et al.* 1997; KNIGHT und SHAMSELDIN 2005) benötigen als meteorologischen Antrieb u.a. Niederschlagsdaten. Eine Verwendung des Schauermodelloutputs als meteorologischen Antrieb für ein Niederschlagsabflussmodell würde es ermöglichen, speziell die Situation von postfrontalen Niederschlägen zu untersuchen. Beispielsweise wie sich postfrontaler Niederschlag auf die Abflussmenge in einem Einzugsgebiet eines Flusses auswirkt oder wie die Kanalisationsbemessung in Gebieten mit versiegelten Oberflächen unter postfrontalen Bedingungen gewählt werden muss. Ggf. muss eine Konvertierung des Niederschlagsoutput des Schauermodells in ein geeignetes Inputformat (z.B. basierend auf Messstationen) erfolgen.

5.1.3 Ausbreitung von EM-Wellen

In den Abschnitten 1.2.2 und 1.2.3 wurde bereits auf die Modelle HYCELL (FÉRAL und SAUVAGEOT 2003) und MultiEXCELL (LUINI und CAPSONI 2011) eingegangen, welche als Grundlage für die Untersuchung zur Ausbreitung von EM-Wellen während Niederschlagsereignissen verwendet werden. Wie beschrieben, geht es dabei speziell um die Untersuchung von Telekommunikationsfunkverbindungen. Einige der dabei verwendeten Frequenzen des EM-Spektrums werden bei der Ausbreitung in Niederschlagsgebiete durch Hydrometeore gedämpft. Der Einfluss speziell eines postfrontalen Niederschlagsfeldes auf Telekommunikationsverbindungen ist eine weitere Anwendungsmöglichkeit für das Schauermodell.

5.2 Ausblick

Die Entwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Schauermodells hat es ermöglicht, ein postfrontales Niederschlagsfeld mit typischen zeitlichen und räumlichen Charakteristika zu modellieren, welches nicht auf den Navier-Stokes-Gleichungen basiert. Eine Weiterentwicklung des Schauermodells könnte eine detailliertere Simulation der einzelnen Zellen zum Ziel haben. Ein Ansatzpunkt dabei wäre die bisherige kreisförmige

Zellendarstellung durch eine aufgeraute Zellbegrenzung zu ersetzen. Diese Zellbegrenzung könnte sich visuell näher an den Zellformen von Niederschlagszellen in Niederschlagsradarbildern orientieren. Ein Zwischenschritt hin zu einer verbesserten Zellendarstellung wäre eine Beschreibung der Niederschlagszellen durch Ellipsen. Als Grundlage könnten dazu die Untersuchungen von FERAL *et al.* (2000), FÉRAL *et al.* (2006) und WEUSTHOFF (2008B) dienen, bei denen Niederschlagszellen durch Äquivalenzellipsen angenähert und die zugehörige Elliptizität bzw. die Ausrichtung aller Zellen untersucht wurden. Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Häufigkeitsverteilung der Elliptizität durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann und die Orientierung (Richtung der großen Halbachse) der Äquivalenzellipsen annähernd homogen verteilt ist. Das Maximum der Häufigkeitsverteilung der Elliptizität beträgt laut WEUSTHOFF (2008B) 0,58. Eine detailliertere Untersuchung der Äquivalenzellipsen durch WEUSTHOFF (2008B) lieferte das Ergebnis, dass Niederschlagszellen mit einer Niederschlagsfläche größer als 100 km^2 eine bevorzugte Orientierung von 20° zur Ausbreitungsrichtung besitzen. Diese gewonnenen Ergebnisse könnten für eine verbesserte Zellsimulation genutzt werden. Die Verwendung von ellipsenförmigen Niederschlagszellen sollte eine Veränderung der in Kapitel 4 diskutierten Niederschlagszeiten an einem festen Ort mit sich bringen. Eine Veränderung der Niederschlagszeiten wird bei der Verlagerung einer Zelle über einen festen Messpunkt hinweg erwartet, da je nach Ausrichtung der elliptischen Zelle eine kürzeren bzw. längeren Niederschlagszeit, im Vergleich zu einer kreisförmigen Zelle, zustande kommt. Die Umsetzung der oben genannten bevorzugten Orientierung von Zellen hätte im Schauermodell Auswirkungen auf das simulierte Niederschlagsgebiet. Simulierten elliptischen Niederschlagszellen mit einer Niederschlagsfläche von mehr als 100 km^2 würden somit eine bevorzugte Orientierung von 20° zur Ausbreitungsrichtung auferlegt bekommen, was nahezu parallel zur Verlagerungsrichtung ist. Für das simulierte postfrontale Niederschlagsgebiet hätte diese bevorzugte Zellorientierung und somit die bevorzugte Richtung fürs Zellwachstum wahrscheinlich zur Folge, dass es parallel zur bevorzugten Orientierung zu mehr Mergingprozessen kommt. Für genauere Aussagen müssten jedoch Simulationsläufe mit dem Schauermodell durchgeführt werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt für die weitere Entwicklung des Schauermodells wäre die Niederschlagsratenverteilung innerhalb von Zellen detaillierter abzubilden, als die aktuell verwendete homogene Niederschlagsrate innerhalb der Zellen. Dazu könnte beispielsweise der im Modell HYCELL (siehe Kapitel 1.2.2) beschriebene Ansatz Anwendung finden. Bei diesem Ansatz wurde die Verteilung der Niederschlagsrate durch eine Kombination von Dichtefunktionen der Gaußverteilung und einer zellsymmetrischen Exponentialverteilung beschrieben. Ausgehend vom Zellzentrum bis zum Zellradius, bei

dem die Niederschlagsrate auf das $\frac{1}{e}$ -fache abgenommen hat, wird die Niederschlagsrate durch eine Dichtefunktion der Gaußfunktion beschrieben. In HYCELL erfolgt der weitere Verlauf bis zur Niederschlagsrate $1 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$, was dem Zellrand entspricht, exponentiell. An dieser Stelle ist eine Anpassung des Schauermodells notwendig, da die Reflektivitätsuntergrenzen bzw. die Untergrenzen der Niederschlagsrate in HYCELL und dem Schauermodell nicht identisch sind. Die geringsten in HYCELL betrachtete Niederschlagsrate beträgt $1 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ und im Schauermodell $0,4 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$. Auf die räumlichen Charakteristika des postfrontalen Niederschlagsfeldes wird diese zusätzliche Implementierung der detaillierteren Niederschlagsrate im Schauermodell keinen direkten Einfluss haben. Allerdings wäre dadurch nicht nur eine eventbezogene Überprüfung des Schauermodells hinsichtlich der Niederschlagsdauer an einzelnen Gitterpunkten, wie es in dieser Arbeit für Regen- und Trockenzeiten gemacht wurde, sondern auch eine bessere räumliche Überprüfung bezüglich der Niederschlagsmenge möglich.

Gerade mit den oben genannten Weiterentwicklungen der Zellen weg von kreisförmigen Niederschlagsflächen und hin zu räumlich höher aufgelösten Niederschlagsraten innerhalb der Zellen wäre eine Anpassung im Quellcode des Schauermodells notwendig. Diese Anpassung des Schauermodells müsste eine Multiprozessorfähigkeit zum Ziel haben, um die durch die Erweiterungen erwartete höhere Modelllaufzeit kompensieren zu können.

Ein weiterer Ansatzpunkt für eine detailliertere Simulation des postfrontalen Niederschlagsfeldes ist die Positionierung von neu generierten Schauerzellen. In Kapitel 1.1 wurde bereits darauf eingegangen, dass u.a. Böenfronten von bereits bestehenden Zellen die Bildung neuer konvektiver Zellen in deren Umgebung begünstigen. Eine Implementierung dieses Phänomens in das Schauermodell wäre insofern interessant, ob es dadurch zu einer Verbesserung der simulierten Charakteristika des Niederschlagsfeldes kommt. Beispielsweise sei hier die relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer genannt (siehe Kapitel 4.1.1). Umgesetzt werden könnte die Positionierung z.B. durch eine horizontale Funktion $\rho_{\text{gen}}(x, y)$, welche die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass an einer Position (x, y) neue konvektive Zellen entstehen. Orientieren könnte sich diese Funktion an einer Art Gravitationsfeld, welches von einzelnen bestehenden Zellen ausgeht. Zellen mit einer großen Niederschlagsfläche hätten eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Generierung neuer Zellen in der unmittelbaren Umgebung zur Folge als Zellen mit einer geringeren Niederschlagsfläche bzw. Bereiche ohne Zellen. Die Funktion $\rho_{\text{gen}}(x, y)$ könnte, angewendet auf die Generierung neuer Zellen, somit dafür sorgen, dass neue Zellen bevorzugt in der Umgebung bereits bestehender Niederschlagsfelder entstehen.

Ebenfalls ein Ansatzpunkt zur detaillierteren Simulation des Niederschlagsfeldes besteht in dem verwendeten Windfeld. Die hier vorgestellte Version des Schauermodells greift auf ein sowohl horizontal als auch vertikal homogenes Windfeld zurück. Die alternative Verwendung eines horizontal inhomogenen Windfelds, beispielsweise Beobachtungsdaten eines bestimmten Höhengniveaus, kann das Konvergieren oder Divergieren von Zellzugbahnen begünstigen und würde somit, neben dem Merging durch horizontale Expansion, auch das Merging durch konvergierende Zellzugbahnen berücksichtigen.

Darüber hinaus wäre ein nächster möglicher Schritt die Kopplung oder Kombination des Schauermodells mit anderen Modellen. Dazu könnte, wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, der Schauermodelloutput als Input für hydrologische Modelle (z.B. Niederschlagsabflussmodelle) oder Luftverkehrsmodelle dienen.

6 Zusammenfassung

Postfrontale Niederschlagsgebiete bestehen aus vielen einzelnen Schauerzellen, die bis auf einige Ausnahmen in ihrer räumlichen Erstreckung lokal begrenzt sind und zum Teil hohe Niederschlagsraten aufweisen können. Die gesamte Struktur des postfrontalen Niederschlagsgebietes wirkt auf den ersten Blick chaotisch, die Charakteristika können jedoch analytisch im Mittel bzw. durch Verteilungen in sowohl räumlicher als auch zeitlicher Hinsicht beschrieben werden, wie frühere Forschung an Niederschlagsradardaten von THEUS und WEUST gezeigt hat.

In dieser Arbeit war es das Ziel zu zeigen, dass ein alternativer Ansatz zu den gängigen Methoden der Simulation von postfrontalen Niederschlagsgebieten möglich ist. Zu den gängigen Methoden zählen statistische Ansätze, bei denen die Generierung von Niederschlagsserien für einen oder mehrere benachbarte Messpunkte in Vordergrund steht. Weitere gängige Methoden sind klassische numerische Wettervorhersagemodelle, welche auf den Navier-Stokes-Gleichungen basieren und je nach Gitterweite auch kleinräumige konvektive Zellen darstellen können. Vorangegangene Untersuchungen von THEUS und WEUST haben gezeigt, dass neben der Beschreibung durch die Navier-Stokes-Gleichungen weitere Gleichungen bestehen, welche direkt die geometrische Struktur und die zeitliche Entwicklung postfrontaler konvektiver Zellen beschreiben. Der hier gewählte alternative Ansatz verzichtete auf die Verwendung der Navier-Stokes-Gleichungen und nutzte nur die Gleichungen zur Beschreibung der zeitlichen und räumlichen postfrontalen Niederschlagsstruktur sowie statistische Werte, um die Generierung eines postfrontalen Niederschlagsgebietes durch ein Schauermodell zu realisieren.

Zentraler Bestandteil des entwickelten Schauermodells ist die Übergangsmatrix, welche die Peak-Nummerentwicklung einzelner Zellen von Zeitschritt zu Zeitschritt darstellt. Ausgehend von dieser Übergangsmatrix und einer Häufigkeitsverteilung von Zelldurchmessern konnte ein Zellpool von Zellentwicklungen inkl. individueller Peak-Nummer- und Niederschlagsflächenentwicklung generiert werden. Die Übernahme von Zellen aus dem Pool in das eigentliche Schauermodell erfolgt gemäß des Tagesganges für die relative Niederschlagsfläche für postfrontale Situationen. Die weitere individuelle

Entwicklung von Zellen orientiert sich an den oben genannten, vorberechneten Entwicklungen und die Verlagerung der Zellen erfolgt mit den vorgegebenen Windverhältnissen. Innerhalb der Simulation werden Mergingprozesse von Zellen berücksichtigt. Dabei wird auf ein geometrisches Kriterium zurückgegriffen, dass bei der Überlagerung zweier oder mehrerer Zellen einen neuen, aus allen beteiligten Zellen bestehenden Multi-Cluster bildet. Die weitere Entwicklung des so gebildeten Multi-Clusters erfolgt hinsichtlich der Peak-Nummer ebenfalls anhand der Übergangsmatrix, jedoch werden größere Peak-Nummerentwicklungen zugelassen als im Fall von einzelnen Zellen. Das Schauermodell ist nicht nur in der Lage Mergingprozesse zu simulieren, sondern kann auch den umgekehrten Prozess des Splittings abbilden. Splittingprozesse können bei Zellen auftreten, die mindestens einen Mergingprozess durchlaufen haben, somit also zu den Multi-Clustern zählen. Bei einer negativen Peak-Nummerentwicklung, die einen bestimmten Grenzwert überschreitet, wobei hier eine Peak-Nummeränderung von 15 gewählt wurde, erfolgt eine Separation des Multiclusters in zwei einzelne Multicluster. Die Schwierigkeit bei der Beschreibung des Peak-Nummerwachstums bestand darin, dass die als Grundlage dienende Übergangsmatrix der von WEUST untersuchten Niederschlagsradar Daten zwar alle relevanten Wachstumsprozesse wie internes Wachstum, Merging- und Splittingprozesse enthält, jedoch ist in der Übergangsmatrix keine eindeutige Unterscheidung zwischen internen Wachstumsprozessen und Merging- bzw. Splittingprozessen möglich. Übergänge, welche im Bereich der Hauptdiagonalen stattgefunden haben, sprechen für interne Wachstumsprozesse, wohingegen Übergänge weit abseits der Hauptdiagonalen eher auf Merging- und Splittingprozesse zurückzuführen sind. Es besteht in der Übergangsmatrix also keine Grenze, welche eine Unterscheidung zwischen Prozessen ermöglicht, die nur eine Zelle oder mehrere Zellen betreffen. Die Lösung zu diesem Problem war die Einführung von Grenzwerten bei der zeitlichen Peak-Nummerentwicklung. Bei internem Wachstum wird die Peak-Nummerentwicklung bei Einzellern und Single-Clustern auf maximal ± 3 pro Zeitschritt begrenzt. Multi-Cluster wurden auf eine Peak-Nummerentwicklung von ± 15 pro Zeitschritt begrenzt. Negative Entwicklungen von Multi-Clustern über den Grenzwert von 15 hinaus führen zu Splittingprozessen. Trotz dieses Lösungsansatzes, der sozusagen eine künstliche Unterteilung der Übergangsmatrix in internes Wachstum und Merging-/Splittingprozessen darstellt, werden die Charakteristika des postfrontalen Niederschlagsfeldes wiedergegeben.

Verifiziert wurde das entwickelte Schauermodell anhand einer Überprüfung der korrekten Wiedergabe der Charakteristika des postfrontalen Niederschlagsfeldes bzgl. der von THEUS und WEUST ermittelten räumlichen und zeitlichen Charakteristika.

Geometrische Struktur

Die relative Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer (PND_{sim}) der durch das Schauermodell erzeugten Niederschlagsgebietes hat gezeigt, dass die (PND_{sim}) ebenfalls einer Potenzfunktion folgt, obwohl die von THEUS und WEUST ermittelte PND_{beob} nicht in das Schauermodell eingeflossen ist. Im Vergleich zu PND_{beob} ergibt sich eine geringe Überrepräsentation von kleinen Zellen und eine Unterrepräsentation von großen Zellen. Als Begründung dafür kam die Spezialisierung des Schauermodells auf den am meisten vorkommenden Mergingprozess durch horizontale Expansion und damit verbunden das bewusst vernachlässigte Merging durch konvergierende Zellzugbahnen bzw. das bevorzugte Heranwachsen neuer konvektiver Zellen neben einer bereits bestehenden Zelle in Frage. Ein weiterer Grund liegt in der PND_{beob} , da in diese als Berechnungsgrundlage nur Peak-Nummern bis ca. 30 eingegangen sind. Dennoch liegt die maximale absolute Abweichung zwischen PND_{beob} und PND_{sim} bei nur ca. $-3,5 \cdot 10^{-3}$.

Die Log-Normalverteilungen der Clustergrößenverteilungen dienen sekundär als Input für das Schauermodell (Zuordnung von Niederschlagsflächen zu einer Peak-Nummer). Vom Prinzip her werden diese Verteilungen durch das Schauermodell korrekt wiedergegeben, jedoch kommt es zu leichten Abweichungen für höhere Peak-Nummern. Diese Abweichungen sind auf die Addition von Niederschlagsflächen beim Mergingprozess zurückzuführen, da diese Addition nicht der Clustergrößenverteilung sondern den Annahmen bei Mergingprozessen folgt.

Anders als bei der Clustergrößenverteilung ist die Lebensdauerverteilung kein Input für das Schauermodell. Durch die Übergangsmatrix erfolgt eine Berechnung der individuellen Peak-Nummerentwicklung von Zellen, aus denen sich wiederum eine individuelle Zellebensdauer ergibt. Diese individuellen Zellebensdauern können durch Merging- und Splittingprozesse noch Änderungen erfahren. Obwohl die Lebensdauerverteilung nicht als Input verwendet wird, folgt sie dennoch, wie bereits durch WEUSTHOFF und HAUF (2008A) gezeigt, einer Potenzfunktion. Für Lebensdauern bis 20 Minuten kommt es allerdings zu einer Unterrepräsentation von Zellen und für Lebensdauern zwischen 25 und 130 Minuten zu einer Überrepräsentation.

Die Übergangsmatrix als wesentlicher Input des Schauermodells stellt die Grundlage für die Ermittlung der individuellen Peak-Nummerentwicklungen dar. Darüber hinaus hat sie auch die Möglichkeit der Modellüberprüfung geboten, indem im Schauermodell simultan zur Simulation des postfrontalen Niederschlagsfeldes eine Übergangsmatrix aus sämtlichen simulierten Zellübergängen erstellt wurde. Dabei hatte sich gezeigt, dass das Schauermodell die von WEUST beobachteten typischen Charakteristika der Über-

gangsmatrix wiedergeben konnte, wozu stärker ausgeprägte Übergangsbereiche in der Übergangsmatrix zählen. Es scheint auf den ersten Blick trivial, dass die typischen Charakteristika der Übergangsmatrix wiedergegeben wurden, da sie als Input Verwendung finden. Berücksichtigt man jedoch die im Schauermodell stattfindenden sekundären Prozesse, welche die vorher berechnete individuelle Peak-Nummerentwicklung maßgeblich beeinflussen, wie z.B. die Merging- und Splittingprozesse, so wird klar, dass die Wiedergabe der Charakteristika der Übergangsmatrix nicht selbstverständlich sind.

Das Schauermodell ist in der Lage, die simulierten postfrontalen Niederschlagszellen mit einer konstanten homogenen Niederschlagsrate zu versehen. Aufgrund dieser Vereinfachung der Niederschlagsrate ist eine Niederschlagsmengenberechnung für das Modellgebiet zwar möglich, für eine adäquate Kontrolle bzgl. der Niederschlagsmenge ist jedoch eine detailliertere Umsetzung der Niederschlagsrate nötig. Möglichkeiten dazu wurden in Kapitel 5.2 erläutert. Dennoch bestand die Möglichkeit eine Kontrolle anhand von Niederschlagsereignissen durchzuführen, bei der nicht die Niederschlagsmenge im Vordergrund stand sondern das Eintreten eines Niederschlagsereignisses. Ergebnis dieser Kontrolle von Niederschlagsdauern und Trockenzeiten war, dass es zwischen den Ergebnissen des hier beschriebenen Schauermodells und den Untersuchungen von WEUSTHOFF (2008B) Unterschiede hinsichtlich der ermittelten Niederschlagsdauern und Trockenzeiten gab, die ein Verhältnis von bis zu 7,3 aufweisen, aber trotzdem bis auf einem Fall innerhalb des Unsicherheitsbereiches von WEUSTHOFF (2008B) lagen. Dennoch sollte dieser Kontrolle über die Dauer von Niederschlägen kein zu großes Gewicht zukommen, da die ermittelten Niederschlagsdauern und Trockenzeiten wie gezeigt zu einem großen Teil durch die Verlagerungsgeschwindigkeit von Zellen und die Ausdehnung von Niederschlagsflächen beeinflusst werden.

Zeitliche Struktur

Bei der Kontrolle des Schauermodells in zeitlicher Hinsicht stand der Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche im Mittelpunkt. Dazu zählten sowohl der mittlere Tagesgang, abgeleitet aus vorangegangenen Untersuchungen von THEUS und WEUST, sowie zwei Testszenarien, welche zur Untersuchungen der Reaktionszeit des Schauermodells auf Inputveränderungen dienten. Das Schauermodell ist in der Lage, den vorgegebenen mittleren Tagesgang der relativen Niederschlagsfläche zu simulieren, wobei bei der Betrachtung eines gleitenden Mittels die simulierte relative Niederschlagsfläche kontinuierlich ca. 0,01 unterhalb der Vorgabe liegt. Dieses war auf die Dynamik des Modelles zurückzuführen, da die Steuerung der Generation von neuen Zellen über einen Vorfak-

tor g_{gen} erfolgt, der maximal den Wert 2,08 annehmen konnte, bevor die Zelldichte im Schauermodell zu hoch wurde und es durch Mergingprozesse zu einem Kaskadeneffekt kam. Ungeachtet dieser geringen Differenz konnte der Tagesgang durch das Schauermodell simuliert werden. Bei den beiden oben genannten Testszenarien kam zum einen ein Tagesgang in Form einer Stufenfunktion und zum anderen der Betrag einer eineinhalbfachen Sinusschwingung zum Einsatz, um zu zeigen, dass das Schauermodell auf plötzliche sowie kontinuierliche Änderungen der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche adäquat reagieren kann. Die untersuchte Reaktion des Schauermodells auf Inputveränderungen beschränkte sich nicht nur auf die relative Niederschlagsfläche, sondern es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass die Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummern und das Verhältnis von Einzellern und Clustern hinsichtlich der Niederschlagsfläche als auch hinsichtlich der Anzahl durch das Schauermodell korrekt und wie erwartet wiedergegeben werden konnte. Bei der Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummern viel darüber hinaus auf, dass sich ein Gleichgewicht bzgl. der Anzahl von großen und kleinen Zellen (hohe bzw. geringe Peak-Nummer) einstellt. Abrupte Änderungen des Quellterms für neue Zellen stellen eine Störung des Gleichgewichts dar, welches sich jedoch durch Mergingprozesse oder das Auflösen großer Niederschlagszellen nach einigen Zeitschritten wieder einstellt. Das mit Hilfe des Tagesganges der relativen Niederschlagsfläche simulierte postfrontale Niederschlagsfeld entspricht der mittleren Niederschlagsflächenentwicklung mehrerer postfrontaler Situationen, welche zu unterschiedlichen Tageszeiten stattgefunden haben. Die Simulation einer einzelnen postfrontalen Situation im Schauermodell ist zwar möglich, bedarf jedoch einer gezielten Untersuchung der entsprechenden realen Situation.

Zur Kontrolle wurde desweiteren eine zeitliche, relative Betrachtung von Einzellern und Clustern bzgl. der Niederschlagsfläche und der Anzahl von Zellen herangezogen. Ergebnis dieser Kontrolle war, dass das simulierte postfrontale Niederschlagsfeld des Schauermodells einen vergleichbaren relativen Zusammenhang bzgl. der Niederschlagsfläche und der Anzahl von den genannten Zelltypen liefert wie bei THEUS und WEUST. Die eben erwähnten relativen Anteile zeigen keinen Tagesgang, der zu bestimmten Zeiten charakteristische Ausprägungen aufweist, sondern zeigen einen Verlauf, der zu sämtlichen Zeiten in einem konstanten Bereich liegt. Der relative Anteil von Clustern an der Gesamtniederschlagsfläche lag dabei im Mittel bei 21,1% und somit ca. 6,1% oberhalb der Literaturwerte von THEUS und WEUST. Bei der Betrachtung des relativen Anteils der Einzeller an der Gesamtzahl der Zellen ergab sich ein Wert von 63,1%, welcher bis zu 8,9% unterhalb der eben genannten Literaturwerte lag. Insgesamt kann bzgl. der Anteile von Niederschlagsgebieten und Zellanzahl der genannten Zelltypen gesagt werden, dass das Schauermodell in dem Sinne korrekt simuliert, dass Einzeller zah-

lenmäßig das postfrontale Niederschlagsgebiet dominieren und sie bei der Betrachtung der Niederschlagsfläche nur einen geringen Beitrag zu dieser leisten.

Anwendung

Für die Anwendung des Schauermodells wurden mehrere Möglichkeiten aufgezeigt. Ein Anwendungsbereich liegt in der Luftfahrt, welche maßgebend durch das Wetter beeinflusst wird. Konkret könnte eine Kombination des Schauermodells mit dem am Institut entwickelten Modell DIVMET geschehen, welches ein Modell zur Modellierung der Interaktion zwischen Luftverkehr und sicherheitsrelevantem Wetter ist und Ausweichrouten hinsichtlich der Reduzierung von Verspätungen und der Steigerung der Sicherheit vorschlägt (HAUF *et al.* 2013). Bei dieser Kombination wäre eine Differenzierung empfehlenswert, da nicht alle Zellgrößen für alle Flugzeuggrößen sicherheitsrelevant sind. Ebenfalls wurde die Kombination des Schauermodells mit einem Niederschlagsabflussmodell vorgeschlagen, womit speziell die Auswirkungen vom postfrontalen Niederschlag auf die Abflussmenge in einem Einzugsgebiete eines Flusses untersucht werden könnten. Eine weitere interessante Anwendungsmöglichkeit liegt im Bereich der Untersuchung zur Ausbreitung von EM-Wellen während Niederschlagsereignissen. Nach der Implementierung einer detaillierteren Darstellung der Niederschlagsrate innerhalb einzelner Zellen wäre eine Untersuchung zur Ausbreitung von EM-Wellen speziell für eine postfrontale Niederschlagsituation möglich.

Insgesamt gesehen konnte gezeigt werden, dass obwohl nur auf der Grundlage der Übergangsmatrix, der Häufigkeitsverteilung von Zelldurchmessern, des mittleren Tagesganges der relativen Niederschlagsfläche und einer Vereinfachung der Zellstruktur durch kreisförmige Objekte eine Simulation des postfrontalen Niederschlagsgebietes erfolgt, dennoch das Schauermodell die von THEUS und WEUST beobachteten Charakteristika sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht simulieren kann. Für die Simulation des postfrontalen Niederschlagsfeldes wurden einige Annahmen getroffen, welche eine Vereinfachung der Realität darstellen, wie z.B. die kreisförmige Darstellung von Niederschlagszellen, die Unterteilung der Übergangsmatrix in interne Wachstums, Merging- und Splittingsprozesse oder die homogene Verteilung der Niederschlagsrate. Trotz dieser Annahmen ist eine Umkehrung der aus den Forschungen von THEUS und WEUST gewonnenen Kenntnisse und eine anschließende Überführung in ein Schauermodell möglich und bietet einen alternativen Ansatz zur Simulation von postfrontalen Niederschlagsgebieten, welcher auf die Verwendung der Navier-Stokes-Gleichungen verzichten kann und trotzdem eine detaillierte und individuelle Simulation von einzelnen

Zellen erlaubt.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Wolkenstraßen, offene und geschlossene Zellen	2
1.2	Satellitenbild einer postfrontalen Situation	4
1.3	Niederschlagsradarbild einer postfrontalen Situation	5
1.4	Geopotentielle Höhe und Temperatur im 850 hPa-Niveau	6
1.5	Temp im postfrontalen Bereich	7
1.6	Normierte Entwicklung der Niederschlagsfläche	8
2.1	Relative Häufigkeitsverteilungen der Peak-Nummer	20
2.2	Tagesgang der mittleren Niederschlagsfläche	22
2.3	Häufigkeitsverteilung der Clusterdurchmesser in Abhängigkeit von der Peak-Nummer	24
2.4	Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung konvektiver Niederschlagsgebiete	25
2.5	Übergangsmatrix	26
2.6	Lebensdauerverteilung	27
3.1	Schema des Modellgebietes	28
3.2	Schema der Zelldarstellung	29
3.3	Schematische Darstellung der Advektion	29
3.4	Schematische Darstellung der Zellentwicklung	30
3.5	Schematische Darstellung des Merging und Splitting	30
3.6	Übergangsmatrix (Isoliniendarstellung)	33
3.7	Übergangsmatrix (dreidimensionale Darstellung)	34
3.8	Spaltensummen der Übergangsmatrix und deren Verhältnis	36
3.9	Beispielübergangsmatrix	38
3.10	Beispiel einer Peak-Nummerentwicklung	39
3.11	Modellschema	40
3.12	Darstellung der Mergingerkennung	43
3.13	Schematische Darstellung eines Splittingprozesses in Niederschlagsradar-daten	47

3.14	Darstellung eines Splittingprozesses	48
3.15	Kaskadeneffekt	50
3.16	Tagesgang der relativen postfrontalen Niederschlagsfläche (7 dBZ und 19 dBZ)	51
3.17	Berechnung des mittleren Tagesganges der postfrontalen Fläche	53
4.1	Darstellung von Niederschlagszellen durch das Schauermodell	59
4.2	Modelloutput der relative Häufigkeitsverteilung der <i>Peak-Nummern</i> (PND)	60
4.3	Relative Häufigkeitsverteilung der simulierten Niederschlagsfläche	62
4.4	Tagesgang des Exponenten b der Regressionsfunktion (normaler Tagesgang)	64
4.5	Clustergrößenverteilung des Modelles	65
4.6	Relative Lebensdauerverteilung der Zellen	66
4.7	Gesamte Übergangsmatrix	68
4.8	Übergangsmatrix für Zellen ohne Merging	69
4.9	Übergangsmatrix für Zellen mit Merging	69
4.10	Niederschlagshöhe im Simulationsgebiet	70
4.11	Mittlere Niederschlagsdauer pro Event	72
4.12	Mittlere Dauer einer Trockenphase und mittlere Niederschlagszeit aller Gitterelemente	72
4.13	Tagesgang der rel. Niederschlagsfläche des Modelles	74
4.14	Stufenförmiger Tagesgang der rel. Niederschlagsfläche	75
4.15	Relative Niederschlagsflächenentwicklung zum Zeitpunkt des Flächenanstieg und der Flächenabnahme einer Stufenfunktion	76
4.16	Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei plötzlicher Vergrößerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche	77
4.17	Relative Niederschlagsfläche für das Testszenario der Stufenfunktion	78
4.18	Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei plötzlicher Verringerung der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche	79
4.19	Tagesgang des Exponenten b der Regressionsfunktion (Testszenario 1)	81
4.20	Betrag der relativen Niederschlagsfläche für eine eineinhalbfache Sinusschwingung	82
4.21	Tagesgang des Parameters b der Regressionsfunktion für die Peak-Nummerverteilung	82
4.22	Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei sinusförmiger Zunahme der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche	83
4.23	Absolute Häufigkeitsverteilung der Peak-Nummer bei sinusförmiger Abnahme der vorgegebenen relativen Niederschlagsfläche	84

4.24	Tagesverlauf der relativen Niederschlagsfläche und der Zellenanzahl . . .	86
5.1	Darstellung einer Ausweichroute mit DIVMET	90

Literaturverzeichnis

Agee, E. M., T. S. Chen, K. E. Dowell, 1973: A review of mesoscale cellular convection. — *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **54**, 1004–1012.

Atkinson, B. W., J. W. Zhang, 1996: Mesoscale shallow convection in the atmosphere. — *Rev. Geophys.*, **34**, 403–431.

Baldauf, M., J. Förstner, S. Klink, T. Reinhardt, C. Schraff, A. Seifert, K. Stephan, 2014: *Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Kürzestfrist COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD.* — Deutscher Wetterdienst, Version 2.1, 87 pp.

Baldauf, M., A. Seifert, J. Förstner, D. Majewski, M. Raschendorfer, 2011: Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. — *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3887–3905.

Barthlott, C., U. Corsmeier, C. Meißner, F. Braun, C. Kottmeier, 2006: The influence of mesoscale circulation systems on triggering convective cells over complex terrain. — *Atmos. Res.*, **81**, 150–175.

Bennett, L. J., K. A. Browning, A. M. Blyth, D. J. Parker, P. A. Clark, 2006: A review of the initiation of precipitating convection in the United Kingdom. — *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 1001–1020.

Blahak, U., 2010: Persönliche Mitteilung. — Deutscher Wetterdienst.

Breinl, K., T. Turkington, M. Stowasser, 2013: Stochastic generation of multi-site daily precipitation for applications in risk management. — *J. Hydrol.*, **498**, 23–35.

Brennan, W. T., 1983: *AC 00-24B - Thunderstorms.* — Federal Aviation Administration, 6 pp.

Capsoni, C., F. Fedi, C. Magistroni, A. Paraboni, A. . Pawlina, 1987: Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications. — *Radio Sci.*, **22**, 395 – 404.

Dixon, M., G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking,

Analysis and Nowcasting - A Radar-based Methodology. — *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 785–797.

Doms, G., 2011: *A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Part 1: Dynamics and Numerics.* — Consortium for Small-Scale Modelling, Version September 2011, 147 pp.

Feral, L., F. Mesnard, H. Sauvageot, L. Castanet, J. Lemorton, 2000: Rain Cells Shape and Orientation Distribution in South-West of France. — *Phys. Chem. Earth*, **25**, 1073–1078.

Féral, L., H. Sauvageot, 2003: HYCELL - A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies: 1. Modeling of the rain cell. — *Radio Sci.*, **38**, 22–1 – 22–20.

Féral, L., H. Sauvageot, 2003A: HYCELL - A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies: 2. Statistical modeling of the rain rate field. — *Radio Sci.*, **38**, 23–1 – 23–18.

Féral, L., H. Sauvageot, L. Castanet, J. Lemorton, F. Cornet, K. Leconte, 2006: Large-scale modeling of rain fields from a rain cell deterministic model. — *Radio Sci.*, **41**, 1–21.

Hand, W. H., 1996: An object-oriented technique for nowcasting heavy showers and thunderstorms. — *Meteorol. Appl.*, **3**, 31–41.

Harpham, C., R. L. Wilby, 2005: Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. — *J. Hydrol.*, **312**, 235–255.

Hauf, T., C. Dettmer, W. Deierling, 2001: Parametrisierung der Statistik von konvektiven Niederschlagsfeldern durch inverse Modellierung. — Abschlussbericht zum BMBF-Projekt 01LA9853/0, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Hannover, 59 S.

Hauf, T., L. Sakiew, M. Sauer, 2013: Adverse weather diversion model DIVMET. — *Journal of Aerospace Operations*, **2**, 115–133.

Hübner, G., 2003: *Stochastik.* — Springer-Verlag, Wiesbaden, 206 pp. pp.

Herbort, F., D. Etling, 2011: Post-frontal shower cells in the COSMO-DE model. A comparison with radar measurements. — *Meteor. Z.*, **20**, 217–226.

Heus, T., A. Seifert, 2013: Automated tracking of shallow cumulus clouds in large domain, long duration large eddy simulations. — *Geosci. Model Dev.*, **6**, 1261–1273.

- Jeannin, N., L. Feral, H. Sauvageot, L. Castanet, J. Lemorton, 2006:** Modeling of rain fields at large scale. — *Proceedings of 2006 International Workshop on Satellite and Space Communications*, 233 – 236.
- Knight, D., A. Shamseldin, 2005:** *River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation*. — Taylor & Francis Groupe plc, London, 608 pp.
- LaFontaine, J., L. Hay, R. Viger, S. Markstrom, R. Regan, C. Elliott, J. Jones, 2013:** *Application of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) in the Apalachicola-Chattahoochee-Flint River Basin in the southeastern United States*. — U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5162, 118 pp.
- Leavesley, G. H., S. L. Markstrom, R. J. Viger, 2005:** *USGS Modular Modeling System (MMS) - Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS)*. — In: *Watershed Models*, CRC Press, V. P. Singh, D. K. Frevert, Boca Raton, USA, 159 - 178.
- Lemorton, J., L. Castanet, V. Huot, T. Marsault, 2001:** A new opportunity for EHF propagation experiments: the EXPRESS campaign with the satellite STENTOR. — *Int. J. Satell. Commun.*, **19**, 347 – 362.
- Liljequist, G. H., K. Cehak, 1979:** *Allgemeine Meteorologie*. — Friedr. Vieweg + Sohn, Braunschweig, 385 pp.
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, S. Bergström, 1997:** Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. — *J. Hydrol.*, **201**, 272 – 288.
- Lisniak, D., J. Franke, C. Bernhofer, 2013:** Circulation pattern based parameterization of a multiplicative random cascade for disaggregation of observed and projected daily rainfall time series. — *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**, 2487–2500.
- Lüpkes, C., V. M. Gryanik, B. Witha, M. Gryschka, S. Raasch, T. Gollnik, 2008:** Modeling convection over arctic leads with LES and a non-eddy-resolving microscale model. — *J. Geophys. Res.*, **113**, 1–17.
- Luini, L., C. Capsoni, 2011:** MultiEXCELL: A New Rain Field Model for Propagation Applications. — *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **59**, 4286 – 4300.
- Markstrom, S., R. Niswonger, R. Regan, D. Prudic, P. Barlow, 2008:** *GSFLOW - Coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005)*. — U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240 pp.

- Mesnard, F., H. Sauvageot, 2003:** Structural characteristics of rain fields. — *J. Geophys. Res.*, **108**, 5–1 bis 5–17.
- Nair, U. S., R. C. Weger, K. S. Kuo, R. M. Welch, 1998:** Clustering, randomness, and regularity in cloud fields 5. The nature of regular cumulus cloud fields. — *J. Geophys. Res.*, **103**, 11363 – 11380.
- Neggers, R. A. J., H. J. J. Jonker, A. P. Siebesma, 2003:** Size Statistics of Cumulus Cloud Populations in Large-Eddy Simulations. — *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1060–1074.
- Pierce, C. E., P. J. Hardaker, C. G. Collier, C. M. Haggett, 2000:** GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation. — *Meteorol. Appl.*, **7**, 341–360.
- Reiber, M., 1998:** *Moderne Flugmeteorologie*. — Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt am Main, 232 pp.
- Rosenfeld, D., Y. J. Kaufman, I. Koren, 2006:** Switching cloud cover and dynamical regimes from open to closed Benard cells in response to the suppression of precipitation by aerosols. — *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 2503–2511.
- Roth, R., A. Clausen, 2001:** Regionalisierung von Niederschlag und Verdunstung zur besseren Parameterisierung des hydrologischen Zyklus in Klimamodellen. — Schlußbericht des BMBF Verbundprojektes Wasserkreislauf (07 VWK 01-6), 20 pp.
- Sasse, M., 2000:** *Pilotstudie zum Wettereinfluß auf den Flugverkehr*. — Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover, 103 pp.
- Schulz, J.-P., U. Schättler, 2011:** *Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Europa COSMO-EU (LME) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD*. — Deutscher Wetterdienst.
- Sengupta, S. K., R. M. Welch, M. S. Navar, T. A. Berendes, D. W. Chen, 1990:** Cumulus cloud field morphology and spatial patterns derived from high spatial resolution landsat imagery. — *J. Appl. Meteor.*, **29**, 1245 – 1267.
- Stephan, K., S. Klink, C. Schraff, 2008:** Assimilation of radar-derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD. — *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1315 – 1326.
- Tetzlaff, G., N. Hagemann, 1986:** Bemerkungen zum Niederschlag in Hannover. — *Meteor. Rundsch.*, **39**, 1–12.

- Theusner, M., 2007:** *An Investigation on Small Scale Precipitation Structures.* — Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 95 pp.
- Theusner, M., T. Hauf, 2004:** A study on the small scale precipitation structure over Germany using the radar network of the German Weather Service. — *Meteor. Z.*, **13**, 311–322.
- Tiedtke, M., 1988:** *Parameterization of cumulus convection in large-scale models.* — Physically-Based Modeling and Simulation of Climate and Climate Change, Part I, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Niederlande, pp. 375–431.
- Tijms, H. C., 2003:** *A first course in stochastic models.* — John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- Wallace, J., P. Hobbs, 2006:** *Atmospheric Science.* — Academic Press, Burlington, San Diego, London, 483 pp.
- Walther, A., R. Bennartz, 2006:** Radar-based precipitation type analysis in the Baltic area. — *Tellus A*, **58**, 331–343.
- Westcott, N. E., 1994:** Merging of Convective Clouds: Cloud Initiation, Bridging, and Subsequent Growth. — *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 780–790.
- Weusthoff, T., 2008B:** *Studies on the Characteristics of Post-Frontal Precipitation Structures in the Mid-Latitudes.* — Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 118 pp.
- Weusthoff, T., 2011:** Persönliche Mitteilung. — MeteoSchweiz.
- Weusthoff, T., T. Hauf, 2008:** Basic characteristics of post-frontal shower precipitation rates. — *Meteor. Z.*, **17**, 793–805, www.schweizerbart.de.
- Weusthoff, T., T. Hauf, 2008A:** The life cycle of convective-shower cells under post-frontal conditions. — *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 841–857.
- Wilby, R. L., O. J. Tomlinson, C. W. Dawson, 2003:** Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. — *Clim Res*, **23**, 183–194.
- Wilks, D., R. Wilby, 1999:** The weather generation game: a review of stochastic weather models. — *Progress in Physical Geography*, **23**, 329–357.
- Witha, B., 2007:** *Untersuchungen zur Variabilität postfrontaler Schauer.* — Diplomarbeit, Leibniz Universität Hannover.
- Young, G. S., D. A. R. Kristovich, M. R. Hjelmfelt, R. C. Foster, 2002:** Rolls, Streets, Waves, and more: A review of Quasi-Two-Dimensional Structures in the Atmospheric Boundary Layer. — *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 997–1001.

Danksagung

Auf dieser Seite möchte ich mich gerne bei den Personen bedanken, ohne die diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere gilt dieser Dank meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas Hauf für die sehr gute Betreuung während meiner ganzen Promotionszeit. Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr. Dieter Etling für die Übernahme des Amtes des Korreferenten bedanken.

Desweiteren bin ich für die Unterstützung sehr dankbar, welche mir bei der Dissertation zugekommen ist. Seien es die immer offen stehenden Türen bei Fragen, die fachlichen Diskussionen oder die Korrektur dieser Dissertation, für diese Hilfe bin ich sehr dankbar. Deshalb ein sehr großes Dankeschön an:

Meine Familie

Dr. Micha Gryschka

Dr. Rieke Heinze

Svenja Koos

Manuela Sauer

Dr. Jakob Tendel

Dr. Michael Theusner

Dr. Tanja Weusthoff

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name: Stephan Himmelsbach
Geburtsdatum/-ort: 24.06.1983, Hannover

Wissenschaftlicher Werdegang

2003	Abitur
2004 bis 2009	Leibniz Universität Hannover Studienfach: Meteorologie
2009 bis 2014	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover
2009 bis 2015	Leibniz Universität Hannover Promotionsstudium