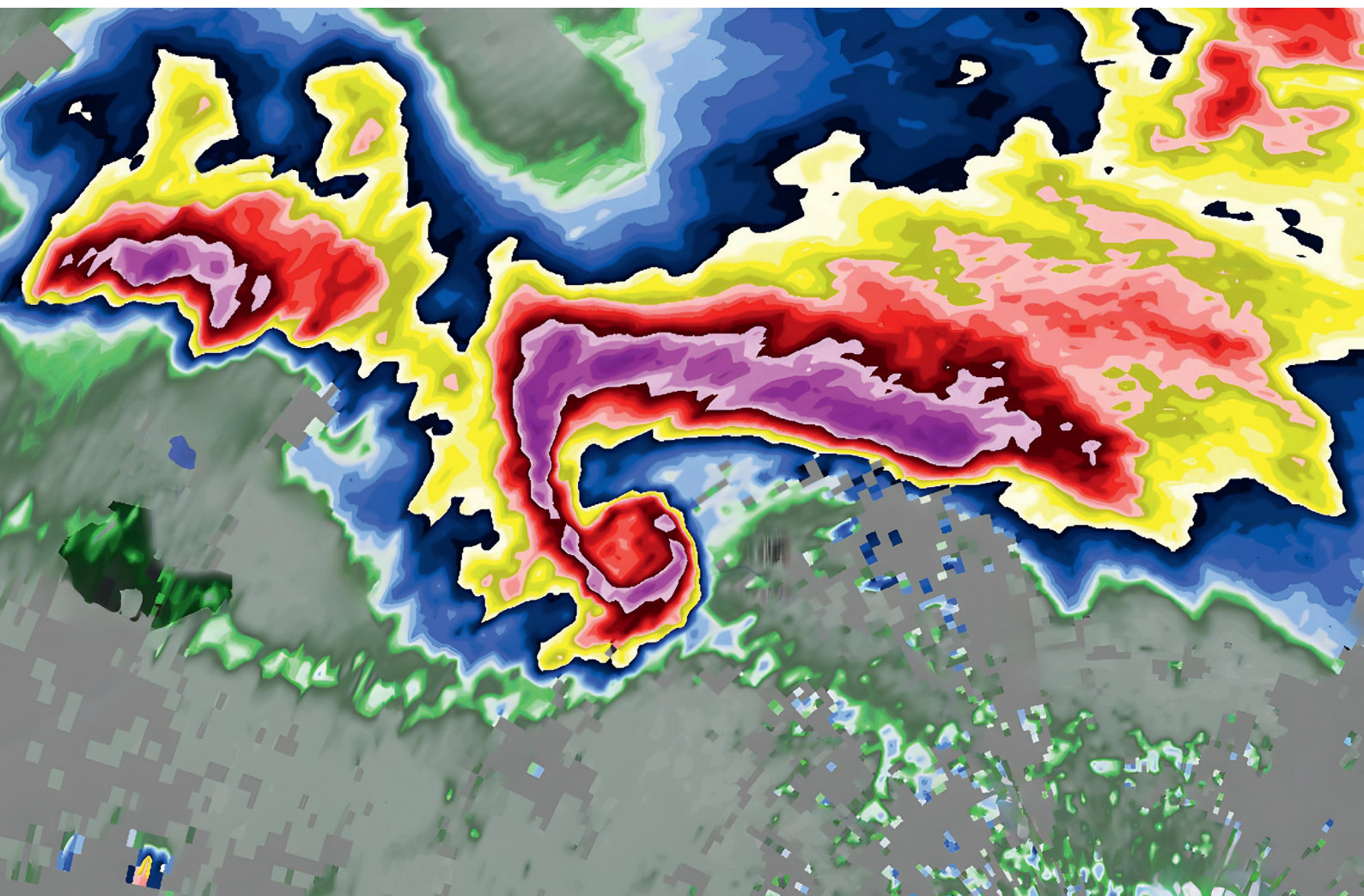


Heft 107 (2024) 22,90 Euro

**promet**

meteorologische fortbildung

## Radarmeteorologie



**Impressum**

**Herausgeber**

Deutscher Wetterdienst

**Hauptschriftleitung**

Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann (Offenbach/M.)

**Stellvertretende Schriftleitung**

Dipl.-Met. Peggy Hofheinz (Offenbach/M.)

**Mitarbeit**

Pola Jakubowski (Langen)

**Redaktionsausschuss**

Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt/M.)

Prof. Dr. F. Ament (Hamburg)

PD Dr. F. Berger (Lindenberg)

Prof. Dr. C. Bernhofer (Dresden)

Prof. Dr. G. Craig (München)

Prof. Dr. S. Jones (Offenbach/M.)

Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)

Prof. Dr. S. Meilinger (Sankt Augustin)

Dr. M. Olefs (Wien)

Dr. C. Plaß-Dülmer (Hohenpeißenberg)

Dr. M. Sprenger (Zürich)

**Layout und Satz**

Dipl.-Des. Simone Leonhardt (Frankfurt/M.)

**Titelseite**

Radarbild (Niederschlags-Scan Reflektivität, Auflösung 1° x 250 m) einer Superzelle von Pfingstmontag, 24.05.2010 15:40 MESZ, die mehrere Tornados produziert hat, darunter einen F3-Tornado in Großenhain (Sachsen). Zu erkennen ist ein Haken-Echo (*hook echo*) mit rotierendem, niederschlagsfreiem Aufwindbereich (*bounded weak echo region*), vorder- und rückseitigem Abwind (*forward/rear flank downdraft*) sowie vorauslaufender Böenfront (*outflow boundary*, grüne Linien). Bildnachweis: Marcus Beyer/DWD

**Verlag**

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Am DFS-Campus 4, 63225 Langen, selbstverlag@dwd.de

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich.

Dieses Heft steht unter der Creative Commons-Lizenz CC BY 4.0.



**Druck**

Heyne-Druck GmbH (Offenbach/M.)



**Auflage:** 3 250

**Preis des Heftes:** 22,90 € plus Versandkosten

**Redaktionsschluss:** 22.10.2024

**ISSN:** 0340-4552 (print) | 2194-5950 (online)

**ISBN:** 978-3-88148-558-6 (print) | 978-3-88148-559-3 (online)

**DOI:** 10.5676/DWD\_pub/promet\_107

Ihre Meinung ist uns wichtig! Bitte nehmen Sie an einer kurzen Umfrage teil (siehe S. 107)



**Editorial**

Liebe Leserinnen und Leser,

woran denken Sie, wenn Sie das Wort „Radar“ hören? Vielleicht an das meteorologische



Messgerät an sich, das oft erhöht auf Hügeln oder Bergen steht, um möglichst ungestört die Niederschlagsteilchen zu detektieren. Vielleicht assoziieren Sie damit auch das klassische Regenradar-Produkt, das uns in der DWD-WarnWetter-App oder diversen anderen Wetter-Apps recht zuverlässig die Verteilung und Stärke der aktuellen Niederschläge zeigt.

Tatsächlich liefert ein Radarbild jedoch so viel mehr als nur eine Aussage, wo es gerade regnet. Das geschulte Auge kann aus ihm die Dynamik einer Gewitterzelle erkennen, Auf- und Abwinde, Hagelkerne und nicht-hydrometeorbedingte Aspekte wie *outflow boundaries*.

Zugegeben, diese Ausgabe ist eher für fachliche Insider als für die breite Öffentlichkeit verfasst. Dennoch hat die Forschung im Bereich der Radarmeteorologie weitreichende Auswirkungen auf die Allgemeinheit, wie das Projekt und gleichnamige System SINFONY in Beitrag 1 zeigt. Damit soll zukünftig der „Sprung“ zwischen dem Nowcasting der nächsten zwei Stunden und der numerischen Wettervorhersage, der im oben erwähnten Regenradar-Produkt der Wetter-Apps oft deutlich zu sehen ist, beseitigt werden. Wie das funktioniert und viele weitere Hintergründe aus der „Welt der Radarmeteorologie“ können Sie in diesem Heft erfahren.

Eine informative Lektüre wünscht Ihnen

Magdalena Bertelmann  
Schriftleiterin *promet*

## Inhalt

promet – Meteorologische Fortbildung, Heft 107 (2024)

Thema des Heftes: **Radarmeteorologie**

Fachliche Redaktion: Dr. Kathleen Helmert, DWD Offenbach

Fachliche Durchsicht: Dr. Martin Hagen, DLR Oberpfaffenhofen

<b>Beitrag</b>	<b>Seite</b>
K. HELMERT Vorwort „Zu diesem Heft“ .....	2
U. BLAHAK 1 SINFONY – das neue nahtlose Vorhersagesystem .....	3
M. FRECH, M. SCHAPER, B. ROHRDANTZ, M. BOSCACCI, M. HAPPENHOFER 2 Das polarimetrische Wetterradar: Messprinzip und Betrieb .....	23
M. MOTT, M. SCHULTZE 3 Kompositionerstellung und Verlagerung .....	34
M. SCHULTZE, J. STEINERT 4 Bestimmung der Niederschlagsart .....	45
S. TRÖMEL, J. CHEN, C. CHWALA, M. GOTTSCHALK, E. WEIGL, T. WINTERRATH 5 Quantitative Niederschlagsschätzung (QPE) .....	56
M. WERNER, R. FEGER, D. HEIZENREDER, K. HELMERT, T. HENGSTEBECK, P. JAMES, L. JOSIPOVIC, K. WAPLER 6 Gewitternowcasting .....	66
U. GERMANN, M. SARTORI, A. HERING, M. BOSCACCI, L. CLEMENTI, B. CALPINI 7 Radarmeteorologie – Herausforderungen im Gebirge .....	79
K. STEPHAN 8 Assimilation von Radarbeobachtungen in die NWV-Modelle des DWD .....	91
Buchbesprechung .....	97
Examina im Jahr 2023 .....	98
Umfrage .....	107

---

# Radarmeteorologie

---

## Zu diesem Heft

*„Der Regen, der ist ein Segen“ wussten unsere Ahnen schon.*

*Doch wann und wo tritt er auf, mit welcher Intensität und in welcher Form? Zur Beantwortung dieser Fragen hat sich die Radarmeteorologie als unverzichtbares Werkzeug in der modernen Wettervorhersage etabliert. Durch die Fähigkeit, Niederschläge in Echtzeit zu erfassen und deren Intensität, Verteilung und Bewegung zu messen, trägt sie erheblich zum Verständnis von Niederschlagsprozessen und deren Vorhersage bei. Während konventionelle Wetterbeobachtungen oft durch die begrenzte räumliche und zeitliche Abdeckung eingeschränkt sind, ermöglicht das Radar eine flächendeckende räumlich und zeitlich hochaufgelöste dreidimensionale Erfassung des Niederschlags. Neben der Messung der Reflektivitäten können auch Dopplerinformationen und polarimetrische Größen erfasst werden. Das ermöglicht es, nicht nur Niederschläge zu erkennen und zu verfolgen, sondern unter anderem auch Rotationssignaturen abzuleiten sowie die verschiedenen Hydrometeorotypen zu unterscheiden.*

*Damit stellen Radardaten eine wichtige Basis für die Wettervorhersage und das Warnmanagement dar. Insbesondere die zeitlich und räumlich punktgenauen und rechtzeitigen Warnungen vor kleinräumigen Extremereignissen durch Starkregen und Hagel gewinnen zunehmend an Bedeutung. Hierzu sind flächendeckende, raum-zeitlich hochaufgelöste und quantitativ genaue Analysen und Vorhersagen von insbesondere konvektiven Niederschlägen notwendig, die zusätzlich Unsicherheitsinformationen enthalten und einen möglichst großen Vorhersagezeitbereich nahtlos abdecken. Diese Anforderungen werden im neuen „Seamless INtegrated FOrecastiNg sYstem (SINFONY)“ des DWD adressiert, welches in Kapitel 1 des vorliegenden Heftes beschrieben ist. In SINFONY werden die bestehenden Verfahren des Nowcastings und der numerischen Wettervorhersage verbessert und erweitert, sowie daraus neue, bruchfreie Vorhersageprodukte entwickelt. Radardaten und -verfahren spielen dabei eine zentrale Rolle und der SINFONY-Artikel soll als Motivation und verbindende Klammer für deren genauere Beschreibung in den nachfolgenden Kapiteln dienen. Dabei widmet sich Kapitel 2 der Wetterradarmessung, indem es das Wetterradarsystem mit seinen wesentlichen Komponenten, die Signalverarbeitung und die wichtigsten Radarmomente beschreibt sowie die genutzten Monitoringverfahren zur Sicherstellung der Verfügbarkeit und Datenqualität vorstellt. In den meisten europäischen Ländern werden heutzutage C-Band Dualpolarisations-Radare genutzt und in einem Verbund aufgebaut. Die Kombination von Informationen einzelner Radare erlaubt dann eine umfassendere und ganzheitlichere Darstellung der Niederschlagsituation. Aus der zeitlichen Abfolge kann die Bewegung von Niederschlagsstrukturen abgeschätzt werden, aus denen für den Nowcasting-Bereich (bis zu 2 Stunden) Niederschlagsvorhersagen als rein advektiver Prozess abgeleitet werden können. Die für die Kompositerstellung und Verlagerung genutzten Methoden werden in Kapitel 3 vorgestellt. Gegenstand des Kapitels 4 ist die Bestimmung der bodennahen Niederschlagsart. Anhand eines spannenden Fallbeispiels wird aufgezeigt, wie mithilfe der polarimetrischen Messgrößen eine Hydrometeoriklassifikation erfolgt, diese mithilfe korrigierter thermodynamischer Profile der numerischen Wettervorhersage (NWV) in Bodennähe extrapoliert wird und welche Herausforderungen dabei zu bewältigen sind. Herausfordernd ist nach wie vor auch die Bestimmung einer zeitlich und räumlich hochaufgelösten flächendeckenden quantitativ genauen Niederschlagsmenge am Boden. Kapitel 5 beschreibt hierzu die in der Anwendung und Weiterentwicklung befindlichen Methoden und geht dabei auch auf die Aneichung mit konventionellen Niederschlagsmessungen ein. Neben der flächenbasierten Niederschlagsinformation ist die Erkennung und Vorhersage von Gewittern und ihren Begleiterscheinungen wie zum Beispiel Blitze, Starkniederschläge, Hagel und Böen von großer Bedeutung für den Warndienst. Daher widmet sich Kapitel 6 diesem Phänomen und beschreibt die entsprechenden Nowcasting- und Warnverfahren sowie zukünftige Entwicklungen auf diesem Gebiet. Die besonderen Herausforderungen beim Betrieb von Radaren und der Auswertung der Daten in Bergregionen werden in Kapitel 7 am Beispiel der Schweizer Alpen beleuchtet. Gerade wegen der starken orografischen Niederschläge und der hohen Häufigkeit von Sturzfluten, Hangrutschungen und Murgängen gibt es hier besondere Anforderungen an Wetterradarmessungen von Regen, Schnee, Hagel- und Gewitterzellen. Im letzten Kapitel dieses Heftes wird die Assimilation der Radardaten in der numerischen Wettervorhersage vorgestellt. Hierdurch werden Verbesserungen erzielt, die zur Bereitstellung einer nahtlosen Niederschlagsvorhersage bis zu 12 Stunden, wie sie in SINFONY angestrebt wird, beitragen.*

*Insgesamt erkunden wir somit in diesem Heft die Prinzipien der Radarmeteorologie, ihre Anwendungen und die innovativen Entwicklungen, die sie für mich zu einem der spannendsten Gebiete der Meteorologie machen.*

Kathleen Helmert

# 1

U. BLAHAK

## SINFONY – das neue nahtlose Vorhersagesystem des DWD

### SINFONY – DWD's New Seamless Forecasting System

#### Zusammenfassung

Mit SINFONY (*Seamless INtegrated FOrecastiNg sYstem*) entwickelt der DWD seit 2017 ein neues Vorhersagesystem, das für den Zeitraum der Kurzfristvorhersage (0 bis 12 Stunden) eine bruchfreie Vorhersage von Wetterereignissen mit Schadenspotential und deren Auftretenswahrscheinlichkeit ermöglichen wird. Hierfür werden die bestehenden Verfahren des Nowcastings und der Numerischen Wettervorhersage verbessert und erweitert. Durch eine innovative Verschneidung über die Vorhersagezeit wird die Information aus beiden Verfahren in neue bruchfreie Vorhersageprodukte für die kommenden 12 Stunden überführt. Künftige Nutzende der Vorhersageprodukte werden bereits im Entwicklungsprozess mit einbezogen. Wir setzen uns zum Ziel, dass SINFONY in Zukunft die Grundlage für verbesserte Warnungen vor kleinräumigen konvektiven schadensträchtigen Ereignissen sein wird, wie zum Beispiel lokaler Starkregen, Hagel, Windböen, Tornados, aber auch vor Sturzfluten in kleinen Bacheinzugsgebieten. Gerade bei kleinräumigen Extremereignissen wie Hagelgewittern ist aufgrund ihrer stark nichtlinearen kleinskaligen Dynamik eine Vorhersage nach wie vor nur mit einer gewissen Unsicherheit möglich. Daher ist die Abschätzung der Vorhersageunsicherheit mittels eines Ensemble-Ansatzes ein wichtiger Bestandteil von SINFONY. Das Radar als Messsystem spielt in SINFONY eine zentrale Rolle. Daher soll dieser Artikel auch als Aufhänger und Motivation für die nachfolgenden Beiträge in diesem Heft dienen.

#### Summary

With SINFONY (*Seamless INtegrated FOrecastiNg sYstem*), DWD has been developing a new forecasting system since 2017, which will enable a seamless forecast of weather events with damage potential and their probability of occurrence for short-range forecasting (0 to 12 hours). To do this, the existing Nowcasting (NWC) and Numerical Weather Prediction (NWP) methods are being improved and expanded. Through innovative optimal combination techniques over the forecast lead time, the information from both methods is combined into new, seamless forecast products for the next 12 hours. Future users of the forecast products are already being included in the development process. Our goal is that in the future, SINFONY will be the basis for improved warnings of small-scale convective events that may cause damage, such as local heavy rain, hail, strong wind gusts, tornadoes, and flash floods in small stream catchment areas. Especially in the case of small-scale extreme events such as hailstorms, a forecast is still only possible with a certain degree of uncertainty due to their highly non-linear small-scale dynamics. Therefore, estimating the forecast uncertainty using the ensemble approach is an essential component of SINFONY. Meteorological radar as a measurement system plays a central role in SINFONY. This article should therefore also serve as a hook and motivation for the subsequent articles in this issue.

#### 1 Einleitung

Kleinräumige Unwetterereignisse haben in den letzten Jahren immer wieder Menschenleben gefordert und zu teils enormen Schäden geführt. Beispielhaft seien hier die Sturzfluten durch langsam ziehende, lokal intensive Gewitter genannt, die im Frühsommer 2016 im baden-württembergischen Braunsbach und im bayerischen Simbach insgesamt elf Menschenleben forderten und eine Schneise der Zerstörung hinterließen. Aber auch so manch schweres Hagelgewitter wie am 28.7.2013 (KUNZ et al. 2018) hat große wirtschaftliche Schäden verursacht. Bei einer recht-

zeitigen und zielgerichteten Warnung hätte vielleicht die Chance bestanden, durch geeignete Maßnahmen die schlimmsten Auswirkungen und Schäden abzumildern.

Solche zeitlich und räumlich punktgenauen und rechtzeitigen Warnungen vor kleinräumigen Extremereignissen für Katastrophenschutzeinrichtungen und die Bevölkerung waren und sind jedoch für alle an der Warnkette Beteiligten eine große Herausforderung. Ein Problem stellen dabei nicht zuletzt die meteorologischen Basisvorhersagen dar, die am Beginn der Warnkette stehen und die bis dato auf kleiner Skala und für die benötigten Vorwarnzeiten zu un-

genau und nicht sicher genug erscheinen. An dieser Stelle setzt SINFONY an.

Die weitere Warnkette bis zu den Betroffenen hat nochmals ihre ganz eigenen Herausforderungen. Auf Grundlage von unsicherer Basisinformation müssen glaubwürdige Warnungen (nichts verpassen, aber auch nicht überwarnen) erstellt und über geeignete Kanäle rasch verbreitet werden. Diesen Warnungen muss vertraut und entsprechende konkrete Maßnahmen eingeleitet werden. Speziell bei den Sturzfluten, deren Bewarnung in der Zuständigkeit der Hochwasservorhersagezentralen (HVZn) der Bundesländer liegt, gibt es noch das Problem, dass für derart kleine Einzugsgebiete und derart kurze Reaktionszeiten vom Niederschlag bis zum Flutereignis oftmals noch gar keine brauchbare Abflussmodellierung für jeden kleinen Bach möglich und vorhanden ist. Um hier voranzukommen, werden schon während des Entwicklungsprozesses von SINFONY die späteren Anwender im Bereich der meteorologischen Warnungen und der HVZn über die neuen Verfahren informiert, mit experimentellen Testvorhersagen versorgt und im Rahmen von Evaluierungsrunden um Rückmeldung gebeten. Dadurch können zum einen aus Entwicklersicht die Arbeiten frühzeitig in die richtige Richtung gelenkt werden, zum anderen aber auch auf Anwenderseite frühzeitig entsprechende Kenntnisse über die Methoden und deren Eigenschaften, Stärken und Schwächen aufgebaut werden.

Dieser Beitrag gliedert sich wie folgt: Zuerst werden die bisherigen Vorhersageverfahren dargestellt und das Konzept von SINFONY zu deren Verbesserung und Ergänzung erläutert. Es folgt eine Betrachtung der einzelnen Systembestandteile und schließlich ein Ausblick.

Als weitere Informationsquelle arbeiten wir derzeit an einer Serie interaktiver Erklärvideos, die diesen Problembereich und die Rolle des neuen SINFONY-Systems allgemeinverständlich darstellen. Die ersten drei Kapitel zu Problemstellung (SOHN et al. 2021), SINFONY-Ansatz (SOHN et al. 2022) und Nowcasting (SOHN et al. 2023) sind fertiggestellt und ein viertes zur Numerischen Wettervorhersage (SOHN et al. 2024) steht kurz vor Vollendung. Ein weiteres zu den neuen nahtlosen Vorhersageprodukten ist geplant.

## 2 Bisherige Vorhersageverfahren für den Zeitbereich konvektiver Warnungen

Für die Vorhersage von kleinräumigen Unwetterereignissen und die Erstellung entsprechender Warnungen kommen bislang beim DWD zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz. Der Zeitraum von Minuten bis zu zwei Stunden wird dabei über das Nowcasting (NWC) abgedeckt, in Kombination mit der synoptischen Analyse durch den Warn-Meteorologen („Zutatenmethode“, bei der meteorologische Parameter wie Labilität, Feuchte, Hebung und Scherung analysiert werden). Wetterprognosen für Zeiträume ab zwei Stunden basieren

dagegen auf Berechnungen hochaufgelöster numerischer Wettervorhersagemodelle (NWV). Beide Verfahren bilden die Grundlage für die konvektive Warntätigkeit der Meteorologen im synoptischen Dienst, wo sie mit Expertenwissen (Stärken, Schwächen, Erfahrungswerte) letztendlich in Warnungen umgesetzt werden.

### 2.1 Nowcasting

Das Nowcasting basiert auf einer Folge von zeitlich hochaufgelösten flächendeckenden Beobachtungen wie beispielsweise den 5-minütigen Beobachtungen des DWD-Radarverbundes. Dabei wird zwischen (mindestens) zwei verschiedenen Arten von Nowcasting unterschieden: Dem Flächen- und dem Zell-Nowcasting.

#### 2.1.1 Flächen-Nowcasting

Beim Flächen-Nowcasting wird aus der jeweils unmittelbar zurückliegenden Bildsequenz ein Verlagerungsvektorfeld von Niederschlagsstrukturen abgeleitet (zum Beispiel mit Methoden der Bildverarbeitung; „Optischer Fluss“) und zum Zwecke der Vorhersage die Strukturen im aktuellsten Radarbild entlang der Stromlinien dieses (zeitlich konstant gehaltenen) Feldes weiteradvehiert. Beim DWD wurde bisher für Radarbeobachtungen operationell ein rein deterministisches Radarnowcasting, basierend auf zweidimensionalen Kompositen der Radarreflektivität und der Niederschlagsrate, betrieben. Typischerweise ist das Verlagerungsvektorfeld recht glatt und repräsentiert nur Skalen größer als etwa 50 km; würde man nicht so stark glätten, finge man sich unvermeidlich zu viel unerwünschtes Rauschen und andere lokale Fehler ein. Das Verfahren ist durch seine Beschränkung auf 2D-Advektionsprozesse mathematisch sehr effizient und erlaubt es, alle 5 min neue Vorhersagen zu berechnen, sobald eine neue Radarbeobachtung einläuft. Aber da bei der Vorhersage keine anderen Niederschlagsprozesse wie zum Beispiel Verstärkung, Abschwächung, Neubildung oder Zerfall berücksichtigt werden, sinkt die Treffgenauigkeit (*skill*) rasch ab. Insbesondere bei konvektiven Niederschlägen dominieren diese Prozesse häufig über die Advektion, und Vorhersagen sind kaum länger als 1/2 oder 1 h brauchbar, wenn überhaupt. Größerskalige Niederschläge können aber auch manchmal etwas länger gut vorhergesagt werden. Mehr Informationen finden sich in Beitrag 4 in diesem Heft. Auch kann das Verfahren nicht mit Situationen umgehen, in denen die lokale Zugrichtung stark von der umgebenden großräumigeren Strömung abweicht, zum Beispiel bei ausscherehenden rotierenden Superzellen (*Right-mover*, *Left-mover*) oder quasi-stationären Zellen, die sich an derselben Stelle immer wieder neu bilden („rückwärts anbauen“) und scheinbar auf der Stelle stehen.

#### 2.1.2 Zell-Nowcasting

Eine andere Art des Nowcastings fokussiert sich speziell auf einzelne konvektive Zellen. Abgeschlossene Gebiete mit einer Reflektivität oberhalb eines Schwellenwerts werden

in den Radardaten ermittelt und als individuelle Zellen markiert (Zelldetektion). In der zeitlichen Abfolge der Radarmessungen kann man dann individuelle Zellen verfolgen (Zelltracking) und deren Verlagerung im einfachsten Fall als „Starrkörper“ linear in die Zukunft extrapolieren. Hierbei werden auch zum Beispiel ausscherende Superzellen und quasistationäre Zellen richtig erfasst, sobald in der Abfolge der letzten Beobachtungen ihr individuelles Zugverhalten ermittelt werden konnte. Wertet man die Eigenschaften der Radardaten innerhalb der Zelle weiter aus, kann man neben Ort (Mittelpunkt) und Zuggeschwindigkeit weitere Eigenschaften der Zelle wie Fläche, Stärke (*Severity*) und Verstärkungs- und Abschwächungstendenzen detektieren. Blitzaktivität und Rotationseigenschaften der Zelle können durch Hinzuziehen von Blitzdaten und Radialwinden ermittelt werden. Die Zusammenfassung dieser Eigenschaften definiert ein Zell-Objekt. Deshalb bezeichnet man diese Art des Nowcastings auch als Zell-Objekt-Nowcasting. Der DWD betrieb bis Anfang 2023 operationell das deterministische KONRAD-Verfahren (KONvektive Zellen in RADardaten), das Zellen in 2D-Kompositen bodennaher Reflektivität detektiert, getrackt und als Starrkörper in die Zukunft extrapoliert hat. Mehr Informationen finden sich dazu in Beitrag 6 in diesem Heft.

Im Zell-Nowcasting wird bisher kein Versuch gemacht, den zu erwartenden weiteren Lebenszyklus eines Zell-Objekts vorherzusagen, wodurch auch hier die Treffgenauigkeit über die Vorhersagezeit rasch abnimmt. Allgemein ist das noch ein junges Forschungsgebiet und es ist klar, dass das eine sehr große Herausforderung ist. Beispielsweise verfolgen FORSTER et al. (2020), ZÖBISCH et al. (2023) und LEINONEN et al. (2022, 2023) den Ansatz der Zusammenschau (*data fusion*) unterschiedlicher Datensätze aus Satellitendaten, Radardaten und NWV, um daraus zum Beispiel die noch verbleibende Lebensdauer von beobachteten Zellen oder auch den in der nächsten Stunde maximal zu erwartenden Schweregrad abzuschätzen.

## 2.2 Numerische Wettervorhersage (NWV)

Die Numerische Wettervorhersage (NWV) basiert auf einem dreidimensionalen Strömungsmodell der Atmosphäre auf der Erdoberfläche, das für regelmäßig angeordnete Gitterpunkte im Raum berechnet wird. Typische Gitterabstände betragen heutzutage etwa 1 bis 20 km horizontal, je nach Gebietsgröße und verfügbarer Rechenleistung, und wenige 10 bis 500 m vertikal, je nach Höhe über Grund. Für jeden Gitterpunkt wird der 3D-Windvektor, Temperatur, Luftfeuchte und Wolkenvariablen (Wolkenwasser, Regenwasser, Wolkeneis, Schneeflocken, Graupelgehalt usw.) im Zeitverlauf auf Basis des aktuellen Werts, der Differenzen zu Nachbarpunkten und dem vorherigen Zeitverlauf vorhergesagt (partielle Differentialgleichungen). Hier hängt buchstäblich alles mit allem zusammen und ein Gitterpunkt repräsentiert den Mittelwert über die ihn umschließende Gitterbox. Ein NWV-Modell schließt alle relevanten physikalischen Prozesse ein, die einen Einfluss auf das Wettergeschehen haben. Manche dieser Prozesse sind so klein-

skalig, dass sie vom Rechengitter nicht oder nicht vollständig aufgelöst werden können und deshalb mehr oder weniger grob und ausgefeilt auf Basis der Gitterpunktwerte angenähert („parametrisiert“) werden müssen. Transport (Advektion) sowie lokalzeitliche Änderungen durch Ein-/Ausstrahlung, Wechselwirkung mit dem Untergrund, subskaliger turbulenter und konvektiver Transport von Wärme und Feuchte und Prozesse der Niederschlagsbildung sind hier zu nennen. Zu Beginn der Vorhersage braucht es einen vollständigen Satz von Anfangswerten auf jedem Gitterpunkt als Start der Zeitintegration. Hier fließen im Rahmen der Datenassimilation zahlreiche Beobachtungen ein, wobei es aber insgesamt viel zu wenige Beobachtungen für die oft zig Millionen Gitterpunkte des NWV-Modells gibt. In der Datenassimilation macht man daher für jeden Gitterpunkt eine beste Schätzung auf Basis der jüngsten Vorhersagefelder, verschnitten mit aktuellen Beobachtungen aus einer gewissen Umgebung und unter Berücksichtigung von Modellfehlern und Beobachtungsfehlern (bestehend aus Messfehler plus Repräsentationsfehler – Punktwert vs. Gitterboxmittel). Ist der Beobachtungsfehler klein gegenüber dem Modellfehler, dann liegt die resultierende Analyse nah an der Beobachtung und umgekehrt. Diese Analyse wird aus den genannten Gründen meist nicht perfekt sein und daher entspricht der Anfangszustand nicht genau der Realität, selbst nicht an den Orten der Beobachtungen. Aus diesen kleinen Anfangsfehlern erwachsen allmählich, in Kombination mit Diskretisierungs- und Approximationsfehlern des Modells, immer größere Vorhersagefehler. Mehr dazu findet sich auch in Beitrag 8 in diesem Heft.

Die Unsicherheit nimmt auch in der Numerischen Wettervorhersage mit der Vorhersagezeit zu. Um diese Unsicherheit abzuschätzen und angeben zu können, setzt man seit vielen Jahren Ensemble-Vorhersagen ein: Man führt nicht nur eine einzige deterministische Vorhersage durch, sondern startet im Rahmen eines *Ensemble Prediction Systems* (EPS) parallel eine Vielzahl von unterschiedlichen aber meteorologisch möglichen Vorhersagen (auch „Member“ genannt). Diese entstehen dadurch, dass für jeden Member der Anfangszustand an jedem Gitterpunkt leicht verändert wird und ggf. auch gewisse unsicher festzulegende physikalische Parameter in den Modellgleichungen variiert werden.

Prinzipiell nimmt bei der Numerischen Wettervorhersage die Treffgenauigkeit wesentlich langsamer über die Vorhersagezeit ab als beim Nowcasting. Da aber der Anfangszustand nicht genau stimmt, liegt die Güte für eine kurze Vorhersagezeit zunächst unterhalb der des Nowcastings. Dazu später noch mehr.

Der DWD betreibt auf seinem eigenen Großrechner eine 3-stufige Hierarchie von NWV-Modellen. Sie besteht zum einen aus dem weltumspannenden globalen Modell ICON (*ICOsahedral Non-hydrostatic*) mit einer Maschenweite von 13 km bzw. 26 km für das ICON-EPS. Darin eingebettet ist das ICON-EU als Ausschnittsmodell mit 6,5 km Maschenweite (13 km beim ICON-EU-EPS) für das Gebiet Nordatlantik, Europa, Nordafrika und westlicher Teil des

Mittleren Ostens. Neue Vorhersagen werden bei beiden Modellen alle 6 h gestartet und bis zu 7 bzw. 5 Tage in die Zukunft gerechnet. Seine Randwerte bezieht das ICON-EU in einer speziellen, sehr eng gekoppelten Weise vom globalen ICON. Insbesondere durch die bessere Auflösung der Orographie werden im ICON-EU zum Beispiel Stau-niederschläge und bodennahe Winde, Temperaturen und Feuchten realistischer simuliert, dennoch sind hier die Berge und Täler noch deutlich zu flach und zu glatt. Auch fallen kleinräumige konvektive Zellen nach wie vor durchs Raster, sodass deren Auswirkungen auf Modellvariablen und beispielsweise Böen und Niederschlag in beiden Modellen nur indirekt, zeitlich ungenau und in einer räumlich geglätteten Weise parametrisiert sind (Konvektions-parametrisierung).

Um insbesondere die orographischen Effekte und die konvektiven Zellen im Detail realistischer vorherzusagen, wird als dritte Hierarchiestufe das ICON-D2(-EPS) als Ausschnittsmodell über Mitteleuropa mit einer Maschenweite von ungefähr 2 km (auch im Ensemble) betrieben. Neue Vorhersagen werden alle 3 h gestartet und bis zu 2 Tage in die Zukunft gerechnet. Es bezieht seine benötigten Randwerte vom nächstgrößeren ICON-EU. Neben dem deterministischen Lauf gibt es 20 Member im Ensemble. Die Modellkette ist auch in Abbildung 1-6 dargestellt.

### 3 Bruch im Übergangsbereich zwischen NWC und NWV

Bisher werden beim DWD die beiden Ansätze Numerische Wettervorhersage und Nowcasting fachlich weitestgehend getrennt voneinander entwickelt und betrieben. Oft besteht auch inhaltlich ein „Bruch“ in der Vorhersage am Übergang vom NWC zur NWV. Hierzu zeigt Abbildung 1-1 von oben nach unten beispielhaft halbstündige Vorhersageschritte beider Verfahren zusammen mit den tatsächlichen Beobachtungen für einen bestimmten Zeitpunkt, kurz nach 13 UTC. Gezeigt ist die Radarreflektivität als Komposit der bodennächsten Elevationen der DWD-Radare, für die daraus abgeleitete Regenrate würde es analog aussehen. Man erkennt, dass die jüngste NWC-Vorhersage zum Startzeitpunkt 13 UTC (linke Spalte) genau der Beobachtung entspricht (mittlere Spalte) und sich die Niederschlagsstrukturen im Vorhersageverlauf nur starr verlagern. Die NWC-Vorhersage wird im Vergleich zu den tatsächlich eingetretenen Beobachtungen rasch sehr schlecht. Die NWV-Vorhersage (rechte Spalte, ein Member) zeigt ein komplementäres Verhalten. Ausgehend von einem nicht so gut passenden Zustand um 13 UTC verhalten sich die Strukturen zu den späteren Zeitpunkten dynamisch (Neubildung, Zerfall, räumliche Organisation) und wesentlich realistischer.

Beachten muss man, dass es sich hierbei um die 12-UTC-Vorhersage (und nicht 13 UTC) handelt. Denn aufgrund des hohen mathematischen Aufwands für Datenassimilation und 2-Tages-Vorhersage vergehen beim ICON-D2 und ICON-D2-EPS trotz leistungsfähigem Großrechner

ca. 1–1,5 h, bis die Ergebnisse für einen bestimmten Starttermin fertig gerechnet und in Kundensystemen verfügbar sind. Für einen Nutzer um kurz nach 13 UTC steht daher bestenfalls die „alte“ 12-UTC-Vorhersage zur Verfügung. Im Extremfall kann dieser Verzug im Tagesverlauf bis zu 4–4,5 h betragen, eine Kombination aus Fertigstellungszeit und dem „nur“ 3-stündigen Start neuer Vorhersagen.

Vor diesem Hintergrund werden derzeit für Warnungen vor einzelnen konvektiven Ereignissen neben aktuellen Beobachtungsdaten hauptsächlich Nowcasting-Vorhersagen im Zusammenspiel mit der oben erwähnten „Zutatenmethode“ herangezogen. Die konkreten Warnungen vor bereits existierenden Gewitterzellen erfolgen auf Gemeindeebene, meist für ein bis zwei Stunden in die Zukunft, limitiert durch den beschränkten Vorhersagehorizont des Nowcastings.

Zellen, die in einem bestimmten Gebiet voraussichtlich erwartet werden und erst neu entstehen, sind im Nowcasting nicht explizit enthalten, können aber teilweise auch schon vorab bewarnt werden. Beispielsweise werden Kaltluftgewitter, die verbreitet auftreten aber nur eine kurze Lebensdauer aufweisen, oft in einem größeren Bereich bewarnt. Im Falle von Gewittern, die in einer Umgebung mit sehr günstigen Entwicklungsbedingungen erwartet werden, kann ebenfalls eine frühzeitige Warnung erfolgen, sobald erste Signale im Radar zu erkennen sind.

Für Zeiträume über zwei Stunden werden Informationen aus den numerischen Modellen von den Meteorologinnen und Meteorologen ausgewertet, die als Ausblick für die nächsten 24 h im Warnlagebericht erscheinen oder bei schadensträchtigen Lagen als Vorabinformation der Öffentlichkeit Hinweise auf mögliche Unwetterereignisse liefern, ohne dass jedoch bereits genauere Angaben zu Auftrittsort und -zeitpunkt im Detail möglich sind.

### 4 Rolle von SINFONY

Für eine sinnvolle Warnung vor plötzlichen Sturzfluten in kleinen Bacheinzugsgebieten wie dem Braunsbach oder dem Simbach im Rahmen der Hochwasservorhersage wäre derzeit insgesamt die Vorhersagegüte des Niederschlags in NWC und NWV zu schlecht (Orts-, Zeit- und Intensitätsfehler zu groß), selbst wenn zum Beispiel die NWV-Vorhersagen für die nächsten paar Stunden schnell genug fertiggestellt und an die HVZn übertragen werden könnten.

Mit SINFONY wollen wir das ändern. Das System soll in Zukunft ermöglichen, auf Basis von NWC und NWV zielgerichtet vor einzelnen Ereignissen zu warnen, und das weit über den derzeitigen 2-h-Horizont hinaus. Weg von *Warn-on-detection* hin zu *Warn-on-forecasts*. Dafür ist es aber notwendig, aus NWC und NWV einheitliche und raum-zeitlich konsistente Vorhersagen, zum Beispiel von Zugbahnen und Lebenszyklen einzelner Gewittersysteme, zu haben. Unterstellt man im vorliegenden Beispiel der Abbildung 1-1 den *Break-even-Point* der Qualität von NWC

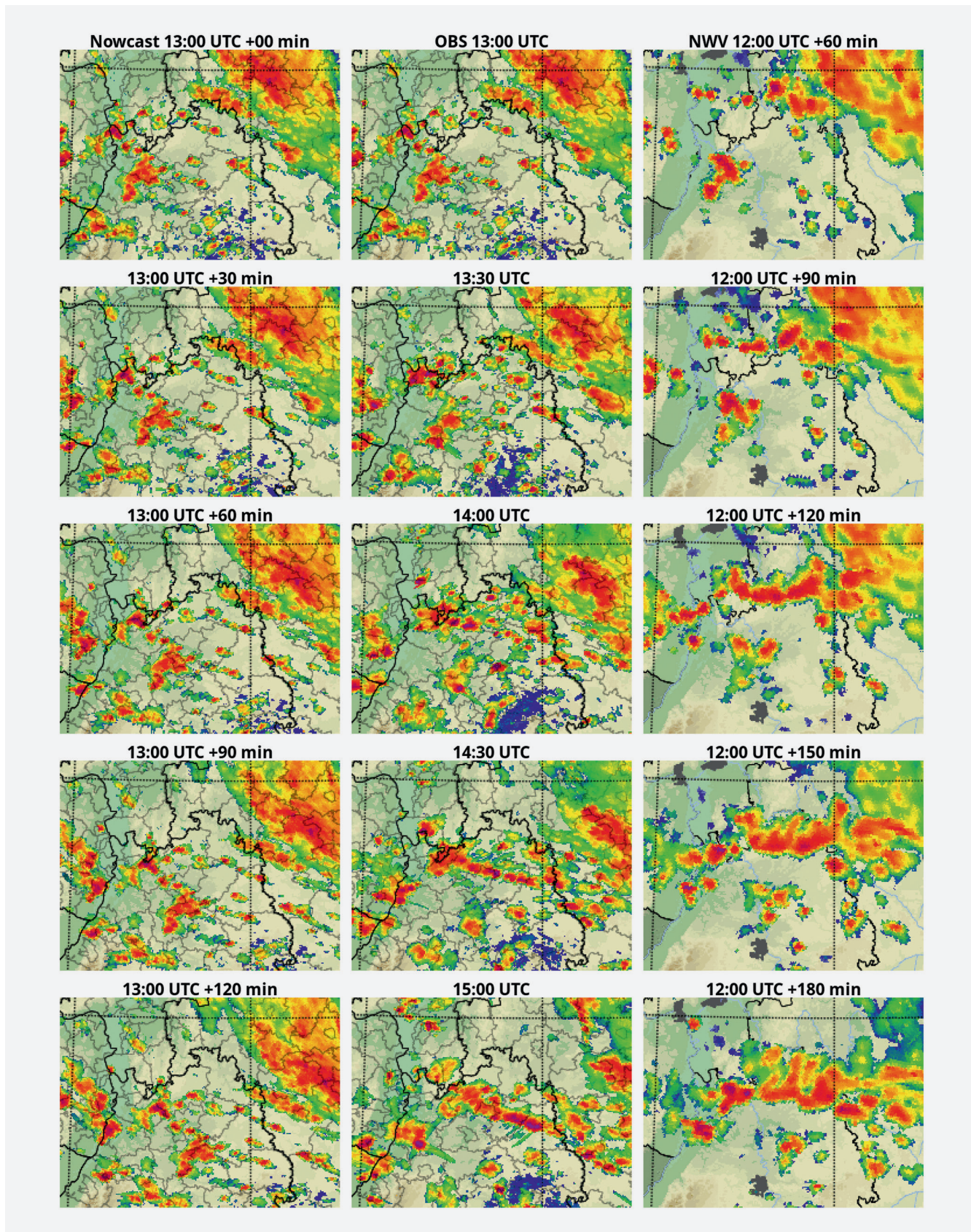


Abbildung 1-1: Vergleich der bisherigen Vorhersageverfahren für den Zeitbereich bis zu zwei Stunden anhand von Kompositen der bodennächsten Radarreflektivität der DWD-Radare für eine konvektive Gewitterlage vom 9.7.2021 im nördlichen Baden-Württemberg. Linke Spalte Nowcasting (NWC), rechte Spalte Numerische Wettervorhersage (NWP; ein Member eines Ensembles), mittlere Spalte Beobachtung (OBS) in Halbstundenschritten von 13 bis 15 UTC (von oben nach unten). Gezeigt sind jeweils die um kurz nach 13 UTC verfügbaren aktuellsten Vorhersageläufe: 13-UTC-Lauf für NWC, 12-UTC-Lauf für NWP. Hohe Reflektivitätswerte sind rot dargestellt; orange, gelb und grün bezeichnen zunehmend niedrigere Werte. Während die NWC-Vorhersage den Anfangszustand gut erfasst und sich mit der Zeit rasch verschlechtert, stimmt die NWP-Vorhersage mit den tatsächlich aufgetretenen Strukturen zu späteren Zeitpunkten besser überein.

und NWV bei etwa 90 min (subjektiver Eindruck des Verfassers) und würde man die beiden Vorhersagen zu dieser Zeit ineinander überblenden, um so ein durchgehendes Produkt zu erzeugen, dann würde man einen klaren „Bruch“ der Niederschlagsstrukturen erzeugen. Leider liegt dieser Bruch typischerweise genau im warnrelevanten Vorwarnzeitbereich von 0,5–2 h und kann somit zu Unstimmigkeiten in Vorhersagen und Warnungen führen. Genau diesen Bruch wollen wir mit dem SINFONY-System glätten und bezeichnen das als bruchfrei (*seamless*).

Gleichzeitig ist aber klar, dass insbesondere kleinräumige Extremereignisse wie Hagelgewitter aufgrund ihrer stark nichtlinearen kleinskaligen Dynamik nach wie vor nur mit einer gewissen Unsicherheit durch die genannten Verfahren erfasst werden können. Im Rahmen einer sinnvollen Warnfähigkeit ist daher eine Abschätzung dieser Unsicherheit sehr wichtig, die in SINFONY durch den Ensemble-Ansatz bei allen Systembestandteilen bereitgestellt wird.

Einen allgemeinverständlichen Überblick über diesen Problembereich und die Rolle von SINFONY geben die ersten beiden Erklärvideos unserer Serie (SOHN et al. 2021, 2022).

## 5 Konzept und Prinzip von SINFONY

Das SINFONY-System beruht auf den grundlegenden Techniken des Nowcastings und der numerischen Wettervorhersage und soll insbesondere den in Abschnitt 3 beschriebenen Bruch im Übergangsbereich überwinden.

Abbildung 1-2 skizziert die Grundidee der Entwicklungsarbeiten, der wir in den letzten Jahren gefolgt sind, anhand eines beliebigen Verifikationsscores, der die Treffgenauigkeit von Vorhersagen auf einer Skala von 0 (schlecht) bis 1 (perfekt) bewertet. Die beiden Einzelverfahren NWC (1) und NWV (2) werden zuerst individuell verbessert und erweitert, wodurch sich der Score von den durchgezogenen auf die gestrichelten Linien anheben soll. Im Zentrum steht

dabei der Ensemble-Ansatz auf allen relevanten Raum- und Zeitskalen, nicht nur in der NWV, sondern auch im NWC. Durch den Ensemble-Ansatz ergeben sich mehrere mögliche Szenarien für die weitere Entwicklung des aktuellen Wetters und es lässt sich eine Auftretenswahrscheinlichkeit ableiten.

Für die Realisierung des SINFONY-Systems muss daher das aktuelle, deterministische NWC in ein Ensemble-Nowcasting (1a) überführt werden, das gleichzeitig um Prozesse der individuellen Lagrangeschen Änderungen entlang der Transportvorhersage ergänzt wird (1b, Entwicklungstendenzen). Zunächst liegt der Fokus auf

- Radar-basiertem Flächen-Nowcasting von Radarreflektivität und Niederschlag (siehe Abschnitte 2.1.1 und 6.1) sowie
- Radar-basiertem Zell-Objekt-Nowcasting (siehe Abschnitte 2.1.2 und 6.2).

Schon allein die Einführung von Ensembles lässt erwarten, dass der Wert für Nutzende steigen wird, flankiert durch die inhaltliche Verbesserung durch die Lagrangeschen Tendenzen.

Das bereits existierende NWV-Ensemble-Vorhersagesystem (Abschnitt 2.2) wird um einen sogenannten *Rapid-Update-Cycle* ICON-RUC nebst ICON-RUC-EPS erweitert (siehe Abschnitt 7), bei dem Verbesserungen an dreierlei Stellen einfließen:

- (1) Zusätzliche Assimilation neuer flächendeckender und raum-zeitlich hochaufgelöster Beobachtungsquellen (2a) zur Verbesserung des Anfangszustandes: Radarvolumendaten (Radialwind, Reflektivität), wolkenbeeinflusste Satellitendaten (Meteosat), Blitzdaten, Zell-Objekte.
- (2) Jede Stunde neue Ensemble-Vorhersagen und nicht nur alle 3 h wie bisher (2b), fertiggestellt schon 45 min nach

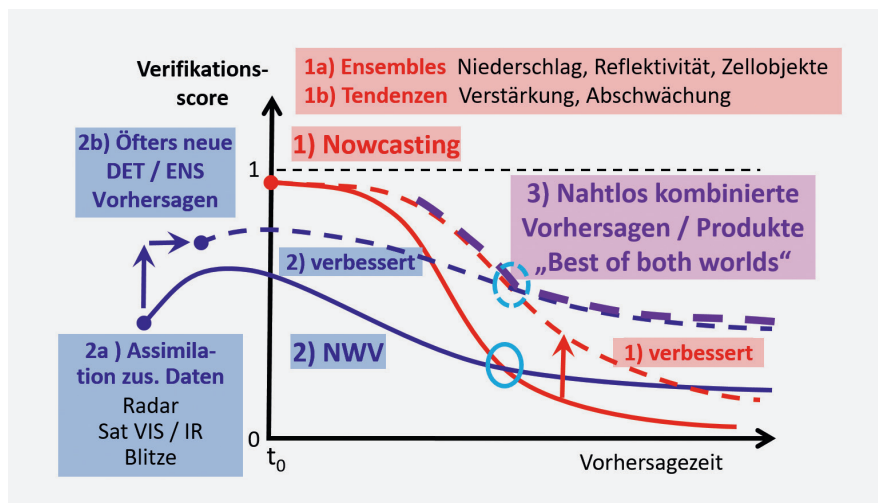


Abbildung 1-2: Grundidee der SINFONY-Entwicklungsarbeiten, ausgehend vom im Jahr 2017 rein deterministischen Radar-nowcasting (1) und der im Jahr 2017 operationellen COSMO-DE NWV (2) anhand eines beliebigen Vorhersagequalitätsmaßes (*Score*; 1 = gute, 0 = schlechte Vorhersage). NWC und NWV werden zunächst individuell verbessert (1a+b, 2a+b) und dann auf dieser Basis optimal kombiniert bzw. „überblendet“ (3), um bruchfreie Vorhersagen und Warnungen zu ermöglichen.

Termin, um den Startzeitpunkt näher an die Echtzeit zu bringen. Aber kürzerer Vorhersagezeitbereich zunächst bis +12 h.

- (3) Angepasste Modellphysik, um insbesondere kleinräumige Niederschlagsereignisse besser zu erfassen und die Vorhersagegüte über den ganzen Zeitbereich anzuheben.

Hierbei wird besonderer Wert auf die Qualität simulierter Beobachtungen (mittels sogenannter Vorwärtsoperatoren) wie Radarreflektivität und Satellitendaten gelegt, weil diese für die Datenassimilation und für die unten genannten Vorhersageprodukte im Beobachtungsraum wichtig sind.

Um möglichst nahtlose Vorhersagen von der Beobachtung über das NWC in die NWV erzeugen zu können (3), mit nur minimalen Störeffekten zum Beispiel durch Positions- und Zeitfehler von Niederschlagsstrukturen, sind alle diese Verbesserungen in NWC und NWV essentiell, um die meteorologischen Felder und Objekte zu homogenisieren. Zu dieser Homogenisierung trägt auch eine innovative Verzahnung von NWC- und NWV-Verfahren auf verschiedenen technischen und algorithmischen Ebenen bei, indem beispielsweise im NWC Informationen über konvektive Umgebungsbedingungen (Instabilität, Windscherung etc.) aus der NWV verwendet werden, oder auch Zelldetektionsverfahren des NWC auf simulierte Beobachtungäquivalente der NWV angewendet werden (simulierte Zell-Objekte). Darauf aufbauend werden neue kombinierte (überblendete) Produkte im Beobachtungsraum zunächst für Niederschlagsfelder, Radarkomposit und konvektive Zellen (in Form von Zell-Objekten) entwickelt und implementiert:

- Kombination von Auftrittswahrscheinlichkeiten (Abschnitt 8.1)
- Kombination im Ensembleraum (Abschnitt 8.2)
- Zell-Objekt-Ensembles (Abschnitt 8.3)

Außerdem braucht es eine gemeinsame vergleichende Verifikation aller Verfahren sowie langfristig geplante Schritte zur Operationalisierung.

Am Ende erzeugt das SINFONY-System einen großen, möglichst homogenen und raum-zeitlich sehr hochauflösten Datensatz auf der Kurzfrist, der zunächst für die schon existierenden Anschlussverfahren im DWD, aber auch für sonstige interne und externe Kunden eine verfeinerte Datengrundlage liefert. Darüber hinaus ermöglichen die neuen SINFONY-spezifischen kombinierten Produkte im Warndienst und entlang der weiteren Warnkette die effiziente und zielgerichtete Nutzung der vielfältigen und unübersichtlichen Informationen, indem die Ensemble-Informationen aus dem NWC und der NWV in optimaler Weise auf das Wesentliche reduziert werden und in einer kombinierten, möglichst bruchfreien Darstellung einen schnellen Überblick ermöglichen. Aktuell liegt der Fokus

auf der Vorhersage für sommerliche konvektive Starkniederschlagsereignisse. Natürlich soll das System auch für alle anderen Wetterlagen gute Ergebnisse liefern, wofür eine enge Anbindung und Kommunikation mit den zahlreich parallel stattfindenden anderen Modell- und Nowcasting-Entwicklungen wichtig ist.

Entscheidend für all dies ist nicht zuletzt auch eine möglichst nahtlose Verzahnung und Vernetzung der Wissenschaftler und Entwickler über Fach- und Organisationsgrenzen hinweg, um zu ermöglichen, dass zum Beispiel bei Entwicklungen an einem Teilsystem die möglichen Auswirkungen auf andere Bestandteile von SINFONY und auch auf die Nutzenden und Kunden mitbedacht werden, in einer effizienten und pro-aktiven Weise. Rückmeldungen von Nutzenden und Kunden fließen schon frühzeitig während des Reifungsprozesses neuer Verfahren und Produkte im Rahmen von Evaluierungen in einem iterativen Co-Design-Prozess ein.

## 6 Neue probabilistische Nowcasting-Verfahren

### 6.1 Flächenbasiertes NWC-Ensemble

Ein Ensemble soll die Unsicherheiten im Vorhersageverfahren abbilden. Für das Nowcasting der Radarreflektivität spielen reine Messfehler nur eine sehr untergeordnete Rolle, wenn die Qualität der Messdaten gesichert ist (siehe Beiträge 2 und 7 in diesem Heft). Bei der Niederschlagsrate am Boden, die daraus abgeschätzt wird (*Quantitative Precipitation Estimation*, QPE), bestehen aber größere systematische Fehler und statistische Unsicherheiten (siehe Beitrag 5 in diesem Heft), die wir hier derzeit noch nicht berücksichtigen (etwaige Ensemble-QPE).

Größere Unsicherheiten entstehen durch die Annahme der Starrkörperverlagerung in einem zeitlich konstant gehaltenen Verlagerungsvektorfeld. Für Letzteres gibt es gewisse Tuning-Parameter, die man einstellen muss, zum Beispiel Glättung. Lokale Abweichungen vom geglätteten Feld und die nicht berücksichtigte zeitliche Änderung während der Vorhersage sind hier die Unsicherheitsquellen. Beide sind wetterlagenabhängig mal größer, mal kleiner. Wir nehmen gewisse Standardabweichungen von Richtung und Geschwindigkeit an und generieren dadurch zufällige lokale Störungen in jedem Ensemble-Member. Insgesamt ist die dadurch erzeugte Ensemble-Streubreite (*Spread*) aber eher gering.

Entscheidend ist hauptsächlich die Vernachlässigung der Lagrangeschen Tendenzen der Reflektivitäten und Niederschlagsraten entlang ihres Transportwegs. Man kann solche Tendenzen in gewissem Umfang und mit gewissen Schwierigkeiten aus der Abfolge der letzten 5-minütigen Beobachtungen ableiten, aber diese können sich leider sehr nichtlinear verhalten. Wir berücksichtigen zumindest eine „vorsichtige“ systematische Extrapolation von „abfallenden“ Tendenzen über die nächsten 30 min. Die „ansteigenden“

Tendenzen lassen sich, vor allem bei explosiver Entwicklung konvektiver Zellen, meist nicht sinnvoll extrapolieren – Zellen verstärken sich zum Glück nicht ins Unendliche.

Eine andere Methode, wie man sich der Beschreibung dieser Unsicherheit nähert, nutzt die bekannte Tatsache aus, dass sich größere Niederschlagsstrukturen oft langsamer entlang der Zugbahn ändern als kleinere intensive Strukturen wie konvektive Zellen. Damit sind sie länger vorhersagbar, bevor sie in ein eher zufälliges, chaotisches und unvorhersehbares Verhalten übergehen. Diese skalenabhängige Vorhersagbarkeit macht sich das bei anderen Wetterdiensten schon länger operationell betriebene STEPS-Verfahren (*Short-Term Ensemble Prediction System*) zunutze. Ursprünglich am *Bureau of Meteorology* in Australien entstanden (SEED 2003) und am UK Met Office (BOWLER et al. 2006), beim Belgischen Wetterdienst RMI (FORESTI et al. 2016), der MeteoSchweiz und beim Finnischen Wetterdienst FMI (PULKKINEN et al. 2019) weiterentwickelt, haben wir den Verfahrensteil der Ensemble-Generierung übernommen, weiterentwickelt (REINOSO-RONDINEL et al. 2022) und mit den obigen Windunsicherheiten und Tendenzextrapolation kombiniert (STEPS-DWD).

Bei STEPS werden die Radarkomposits der zurückliegenden 5-minütigen Beobachtungen durch eine Kaskade von räumlichen Gaußschen Bandpass-Filtern in (bei uns) 8 Skalen von „grob“ nach „fein“ zerlegt, die in Summe wieder das jeweilige Originalbild ergeben. Die Lagrangeschen Autokorrelationen in den Zeitreihen für jede Skala definieren über ihren Abfall die für künftige Vorhersagezeitpunkte „unvorhersagbar gewordenen“ Skalen. Würde man diese Skalen vor dem Aufaddieren zum Gesamtbild jeweils zu 0 setzen, bekäme man eine mit jedem 5-min-Schritt glatter werdende Vorhersage des „Vorhersagbaren“, in der kleinskalige Maxima zunehmend fehlen.

Ersetzt man stattdessen die unvorhersagbaren Skalen durch Realisierungen von zufälligem korrelierten Rauschen, das die aktuellen Korrelationen in Raum und Zeit erfüllt und das daher für die jeweilige Raumskala „wie Wetter“ aussieht, dann erhält man nach dem Skalenaufsummieren ein mögliches Szenario innerhalb einer gewissen Bandbreite. Mehrere verschiedene Realisierungen dieses Rauschens (bei uns derzeit 20) liefern ein Ensemble. Die einzelnen Schritte sind plastisch im dritten SINFONY-Erklärvideo „Nowcasting“ dargestellt (SOHN et al. 2023).

Wir betreiben das Verfahren täglich in einem Echtzeit-Testbetrieb seit 2020. Abbildung 1-3 zeigt ein Beispiel für eine solche Ensemble-Vorhersage anhand zweier Vorhersagezeitpunkte und dreier ausgewählter Member für denselben Fall wie in Abbildung 1-1. Man erkennt, dass sich die Niederschlagsstrukturen der Member mit zunehmender Vorhersagezeit stärker unterscheiden (vor allem auf kleinerer Skala), dass sie aber im Wesentlichen um eine reine Transportvorhersage herumwabern. Insbesondere werden dadurch natürlich keine etwaigen Zellneubildungen im Vorhersageverlauf erfasst.

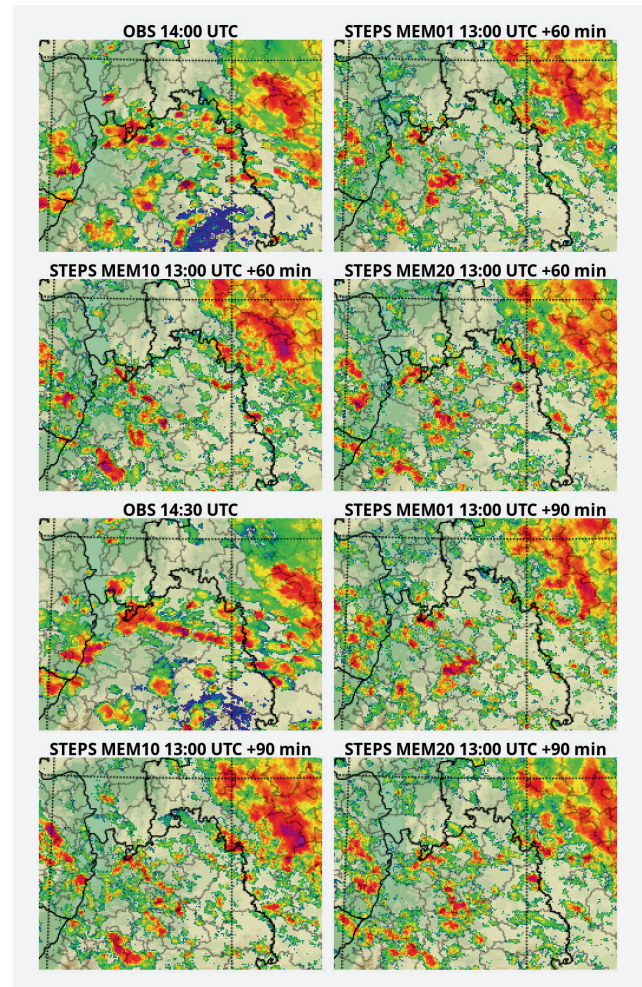


Abbildung 1-3: Ensemble-Vorhersagen von drei willkürlich ausgewählten Mitgliedern des neuen Nowcasting-Systems STEPS-DWD für den Beispielfall aus Abbildung 1-1. 4-er Panel oben: 60 min Vorhersagezeit. 4-er Panel unten: 90 min Vorhersagezeit. Links oben in den Panels zum Vergleich jeweils die Beobachtung. Zu erkennen ist, dass sich mit zunehmender Vorhersagezeit die Niederschlagsstrukturen der Member zunehmend unterscheiden.

Die durch STEPS-DWD simulierte Unsicherheit ist zwar für kurze Vorhersagen durchaus realistisch, unterschätzt darüberhinaus aber per Konstruktion zunehmend die tatsächliche Unsicherheit. Leider bestehen auch bei STEPS-DWD derzeit noch die oben erwähnten Probleme mit ausscherehenden Superzellen und quasi-stationären Niederschlagsstrukturen. Es wird daran gearbeitet, diese Probleme durch lokale Eingriffe in das Verlagerungsvektorfeld in den Griff zu bekommen, basierend auf einer innovativen Verknüpfung mit Informationen aus dem Zell-Objekt-Nowcasting, auch mittels KI-Methoden. Daneben haben wir begonnen, an alternativen Ensemble-Nowcasting-Verfahren zu arbeiten, die rein auf neuronalen Netzen beruhen.

## 6.2 Konvektive Zell-Objekte

Das bisherige KONRAD-Verfahren mit seinen 5-minütigen Zelldetektierungen und neuen Vorhersagen hat sich für den Warndienst als sehr nützlich erwiesen, hatte aber auch einige

bekannte Schwächen und Probleme: manchmal eine als „zu spät“ empfundene Erstdetektion, oftmals sprunghafte Änderungen der ermittelten Zuggeschwindigkeit von einem 5-Minuten-Intervall zum nächsten und oftmals scheinbar „unterbrochene“ Zugbahnen bei langlebigen Zellen, die zwar als Ganzes weiterziehen, aber oftmals etwas pulsieren und im bodennahen 2D-Radarkomposit zeitweise für eine Detektierung zu schwach sind. Zudem gab es keine Unsicherheitsabschätzung und keinen Versuch der Lebenszyklusvorhersage (Verstärkung und Abschwächung über Aufbau-, Reife- und Zerfallsstadium, verbleibende Lebensdauer) sowie von künftigen Zellteilungen und -Vereinigungen.

Diese Probleme – bis auf Teilungs- und Vereinigungsvorhersagen – adressieren wir in zwei Entwicklungsstufen: KONRAD3D und KONRAD3D-EPS. Neben der folgenden Beschreibung finden sich weitere Informationen in Beitrag 6 in diesem Heft sowie im SINFONY-Erklärvideo 3 (SOHN et al. 2023).

**6.2.1 KONRAD3D**

Bei KONRAD3D werden die Signaturen von konvektiven Zellen nicht nur in einem Komposit einer bodennahen Radarelevation gesucht, sondern in allen Elevationen (daher „3D“). Neue Zellen erscheinen hier etwas früher, da sich im noch jungen starken Aufwind hohe Reflektivitäten zuerst in größerer Höhe ausbilden. Weitere Zelleigenschaften wie vertikale Ausdehnung, Masse (*Vertical Integrated Liquid*, VIL oder das *Vertical Integrated Ice*, VII) oder Echotops lassen sich abschätzen, die eine robustere Bestimmung der Zellstärke ermöglichen. Außerdem gibt es seltener „künstliche“ Unterbrechungen in der Zugbahn langlebiger Zellen, weil auch in schwächeren Phasen oftmals in der Höhe noch starke Signale vorhanden sind.

Die Zugbahn ist definiert als die Verbindungslinie der in 5-Minuten-Intervallen ermittelten Zell-Schwerpunkte (Zen-

troide). Ein Kalman-Filter glättet die (auch beim 3D-Detektieren) unvermeidlichen Haken und Sprünge in der seit Erstdetektion gefundenen Zugbahn zu einer eventuell gekrümmten, aber glatten parabolischen Bahnkurve, wie in Abbildung 1-4 schematisch dargestellt ist. Mit jeder neu einlaufenden Beobachtung wird die Schätzung angepasst und verfeinert. Diese Bahnkurve wird extrapoliert und zur Vorhersage der zu erwartenden Zugbahn benutzt. Gleichzeitig bestimmt der Kalman-Filter aus der 2D-Standardabweichung  $\sigma$  der tatsächlichen bisherigen Zentroiden zur geglätteten Kurve über die Gesetze der Fehlerfortpflanzung eine Schätzung des künftig zu erwartenden 1- $\sigma$ -Unsicherheitsbereichs der vorhergesagten Zentroiden (keine Zellumrisse). Diese sind als rot gestrichelte Ellipsen in der Abbildung dargestellt und machen KONRAD3D zu einem probabilistischen Verfahren.

KONRAD3D ersetzt seit April 2023 operationell das alte KONRAD-Verfahren. Nach wie vor wird kein Versuch einer Lebenszyklusvorhersage und deren Unsicherheit gemacht. Dies erfolgt im nächsten Schritt mit KONRAD3D-EPS.

**6.2.2 KONRAD3D-EPS**

Bei KONRAD3D-EPS wird die parametrische Gaußsche Unsicherheitsschätzung im Kalman-Filter durch explizites *Sampling* mittels eines Ensemble-Kalman-Filters (EKF) ersetzt. Wie die Abbildung 1-5 schematisch zeigt, wird die Ortsunsicherheit in der Vorhersage nun durch mehrere mögliche Realisierungen (Member) abgebildet, die ein ganzes Büschel aus parabolisch gekrümmten Bahnkurven bilden. Nimmt man zusätzlich zur Zentroidbahn noch eine Schätzung dazu, wie sich die Größe und Form des Fußabdrucks der Zelle um den Zentroiden herum in jedem Member ändert (rot gestrichelt), dann kann man aus deren räumlicher Überlagerung zum Beispiel die künftige Auftrittswahrscheinlichkeit der Zelle für jeden Ort zu jeder Vorhersagezeit ableiten. Allerdings ist diese Schätzung

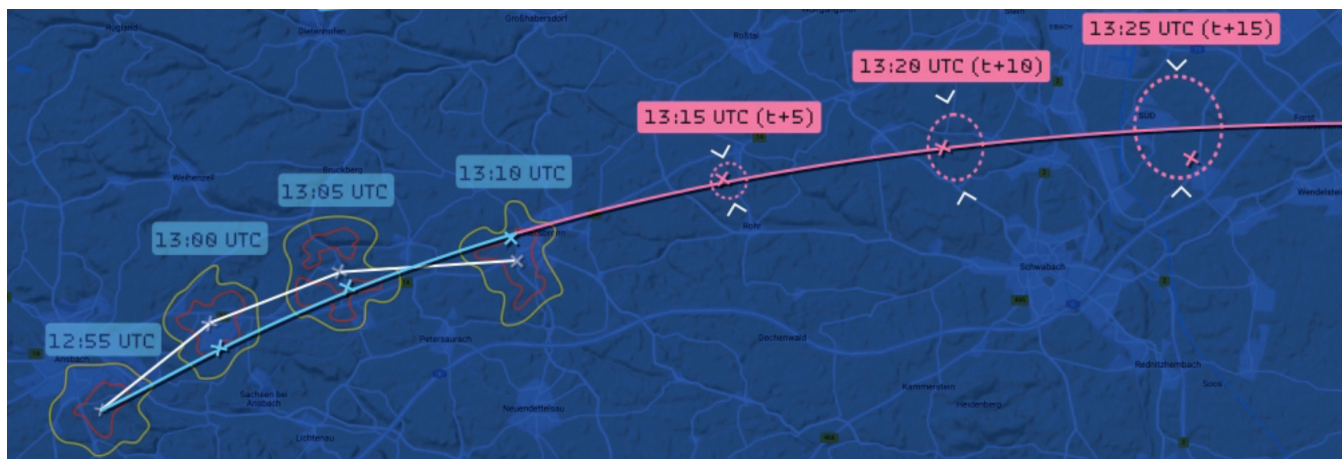


Abbildung 1-4: Prinzip von KONRAD3D: Probabilistische Nowcasting-Ortsvorhersage mit einer durch einen Kalman-Filter geglätteten, gekrümmten Zugbahn und Kalman-Schätzung der Ortsunsicherheit der Vorhersagen unter Annahme gaußverteilter Fehler. Weiß: detektierte Zugbahn in der unmittelbaren Vergangenheit. Die Umrandung in Gelb zeigt die detektierte Zelle, die Umrandung in Rot den Zellkern. Blau: Geglättete detektierte Zugbahn. Rosa: Vorhergesagte Zugbahn. Rosa gestrichelt: 1- $\sigma$ -Unsicherheitsbereich des Zentroiden (keine Zellumrisse). Siehe auch SOHN et al. (2023).



Aus unseren bisherigen Erfahrungen ergeben sich einige wissenschaftliche Fragestellungen:

- Gibt es besser passende, verfeinerte parametrische Ansätze als das einfache Parabelmodell, insbesondere für langlebige Systeme wie Superzellen oder Squall-Lines?
- Welche Abhängigkeiten von Umgebungsbedingungen bestehen, zum Beispiel aus der NWV?
- Wie schneiden im Vergleich nicht-parametrische Methoden ab, zum Beispiel die in Abschnitt 2.1.2 erwähnten KI-Verfahren, die Zelleigenschaften für die einzelnen Vorhersagezeitpunkte vorhersagen?

WILHELM et al. (2023) sind diese Fragestellungen in Bezug auf SINFONY schon angegangen. Aufbauend auf langjährigen Statistiken von Umgebungsparametern (COSMO-EU-Analysen) und Zelltrackings mit dem alten KONRAD-Verfahren konnten z. B. aus dem vielfältigen Zoo von Umgebungsparametern zwei Parameter (*Deep Layer Shear* und *Lifted Index*) identifiziert werden, mit dem sich die Lebensdauer und die maximale Zellfläche abschätzen lassen. Allerdings zeigte sich, dass auch schlicht die anfängliche Flankensteigung der Wachstumsrate mindestens genauso gut funktioniert. Eine Analyse der Anforderungen an eine mögliche neue Ansatzfunktion hat gezeigt, dass diese in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen bestimmte Asymmetrien aufweisen sollte.

Sollten generell solche Methoden zur Lebenszyklusvorhersage im NWC zufriedenstellend funktionieren, dann würden sie ein örtlich und zeitlich genaueres Bewarnen konvektiver Zellen ermöglichen, ab dem Zeitpunkt ihrer Entstehung. Erste Evaluierungen zeigen, dass dies für Einzelzellen durchaus gelingen kann, dass aber nach wie vor langlebige Superzellen oder auch Squall-Lines problematisch sein werden, wenn man reine NWC-Vorhersagen über mehrere Stunden betrachtet. Hierfür, aber auch für in naher Zukunft neu entstehende Zellen, setzen wir in SINFONY auf die Kombination mit unserer speziell angepassten NWV, die nachfolgend beschrieben wird.

### 7 Das neue DWD-Modell ICON-RUC

Das Modell ICON-RUC (RUC: *Rapid Update Cycle*) als Teil von SINFONY basiert auf dem *ICON Modeling Framework* und weist zwar Ähnlichkeiten zum ICON-D2 auf (gleiche Maschenweite von 2 km, gleiches Modellgebiet, Gitterstruktur und Randdatenversorgung durch das ICON-EU), wird aber trotzdem als eigenständiges Modell parallel zum ICON-D2 betrieben. Diese Trennung ermöglicht es, das ICON-RUC gezielt auf eine möglichst gute Niederschlags- und Radarreflektivitätsvorhersage (wichtig für Datenassimilation, simulierte KONRAD3D-Zell-Objekte und kombinierte SINFONY-Produkte) für die ersten 12 h Vorhersagezeit zu optimieren, ohne Rücksicht darauf nehmen zu müssen, dass gewisse Maßnahmen, die für diesen

vergleichsweise kurzen Horizont eine Verbesserung bringen, negative Auswirkungen auf die spätere Vorhersagequalität bis +48 h haben. Abbildung 1-6 gibt einen Überblick über die so erweiterte Modellkette des DWD. Die Beschränkung auf zunächst +12 h ermöglicht unter den gegebenen Rechnerressourcen eine vergleichsweise kurze Produktionszeit der stündlichen Vorhersagen von maximal 45 min nach Termin. Neben dem deterministischen Lauf gibt es auch das ICON-RUC-EPS mit derzeit 20 Mitgliedern, die seit Juni 2021 in einem täglichen experimentellen Testbetrieb in Echtzeit laufen. Das vierte SINFONY-Erklärvideo „NWV-Modell“ widmet sich dieser Thematik (SOHN et al. 2024).

Wir experimentieren auch mit Maschenweiten von 1 km und weniger über Deutschland (wie in Abbildung 1-6 angedeutet), aber die dadurch erzielte insgesamt geringe Qualitätsverbesserung rechtfertigt (noch) nicht den damit verbundenen stark erhöhten Rechenaufwand. Dafür sind weitere Verbesserungen an Modellkonfiguration und Physikparametrisierungen für diese Auflösung notwendig, an denen weiter gearbeitet wird.

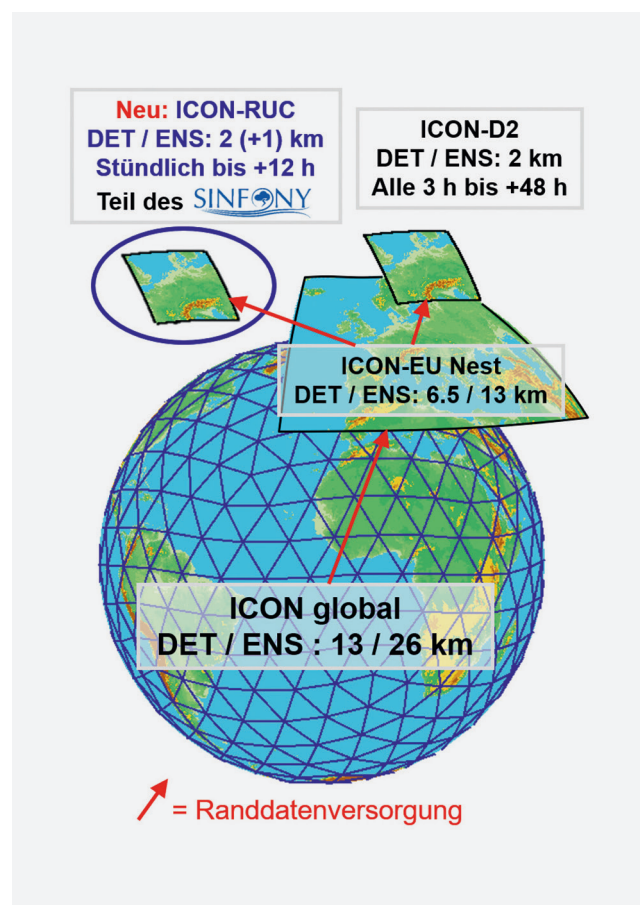


Abbildung 1-6: Schematische Darstellung der operationellen Modellkette des DWD mit Globalmodell ICON, ICON-EU Nest und ICON-D2. Das neue Modell ICON-RUC (*Rapid Update Cycle*), als zweites konvektionserlaubendes Regionalmodell, ist speziell für den Zeitbereich bis 12 h und neben Niederschlag auch für synthetische Radar-/Satellitendaten und konvektive Zellobjekte optimiert.

## 7.1 Datenassimilation und RUC-Design

Zusätzlich zu den „konventionellen“ Datenquellen werden stündlich 3D-Radarvolumenscans (Radialwind und Radarreflektivität des DWD-Radarverbands, bald auch aus umliegenden Ländern) und einige sichtbare und Infrarotkanäle des Meteosat SEVIRI-Instruments für bewölkte und wolkenfreie Pixel im Rahmen des KENDA-Systems (*Kilometer-scale ENsemble Data Assimilation*) mittels eines LETKF (*Localized Ensemble Transform Kalman Filter*) assimiliert. Dies haben wir parallel für die ICON-D2-Routine und für den ICON-RUC entwickelt, getestet und operationell eingeführt. Zusätzlich verwenden wir parallel dazu nach wie vor auch das traditionelle *Latent Heat Nudging* (LHN). Nähere Informationen finden sich in Beitrag 8 in diesem Heft. Wie dort genauer beschrieben wird, sind für die Assimilation von Radar- und Satellitendaten sogenannte Vorwärtsoperatoren zentral wichtig, die aus den Modellzustandsvariablen synthetische Beobachtungen simulieren, so als ob das Messgerät die simulierte Atmosphäre vermessen würde. Diese synthetischen Beobachtungen spielen in SINFONY auch bei den ICON-RUC-Vorhersagen eine wichtige Rolle, wenn es um die Erstellung der nahtlosen kombinierten Vorhersagen zusammen mit dem NWC geht oder um die Modellverifikation im Beobachtungsraum.

Von seinen stündlich vorliegenden Analysen starten wir beim ICON-RUC tatsächlich jede Stunde eine neue Vorhersage, während dies beim ICON-D2 von dessen stündlichen Analysen nur alle 3 h gemacht wird. Um die ICON-RUC-Vorhersagen möglichst schnell fertig zu haben, können wir nach einer vollen Stunde nicht so lange auf das Eintreffen der Messdaten wie beim ICON-D2 warten. Dadurch fließen beim RUC systematisch weniger Beobachtungen ein, was ein Nachteil ist. Um dies abzumildern, zweigen wir jeden Morgen um 3 UTC den ICON-RUC-Zyklus aus dem ICON-D2-Zyklus ab, im Sinne eines Zurücksetzens. Dies soll auch ein mögliches allmähliches „Auseinanderdriften“ der beiden Modelle verhindern.

Geforscht und gearbeitet wird auch an der zusätzlichen Assimilation von Blitzinformation, KONRAD3D-Zell-Objekten und polarimetrischer Radarinformation (TRÖMEL et al. 2024), um eventuell konvektive Zellen und ihre Eigenschaften noch besser erfassen zu können, sowie generell an weiteren Datenassimilationsmethoden wie der hybriden EnVAR (Kombination aus LETKF und variationeller Datenassimilation), sogenannten *Particle Filtern*, oder auch an ganz neuen KI-Methoden.

## 7.2 Modellphysik

Die Assimilation von Radardaten und wolkenbeeinflussten Satellitendaten sowie die kombinierten SINFONY-Radarprodukte erfordern eine realistische Simulation der entsprechenden Beobachtungsvariablen über die Vorwärtsoperatoren, die wiederum auf den simulierten Hydrometeor aufbauen. Letztere werden im Modell durch die Wolken-

mikrophysik-Parametrisierung bestimmt. Hier kommt es vor allem darauf an, die natürliche Variabilität an Hydrometeorarten, -größen und -fallgeschwindigkeiten abzudecken, die für die elektromagnetische Streurechnung und gleichzeitig für die Niederschlagsrate entscheidend sind. Für die Radarreflektivität ist neben der Partikelanzahldichte ja bekanntlich die Partikelgröße entscheidend (Rückstreuung  $\sim D^6$ ), ähnlich ist es auch für Satellitendaten bei Anwesenheit von Wolken (effektiver Radius). Das ICON-D2 verwendet ein sogenanntes 1-Momenten-Schema, bei dem es die fünf Hydrometeorarten Wolkentropfen, Wolkeneis, Regen, Schnee und Graupel gibt und pro Hydrometeorart nur eine prognostische Variable, die Massendichte („Wassergehalt“). Wir haben festgestellt, dass dieses Schema zwar recht gute Ergebnisse für Niederschlag am Boden liefert, aber dass gerade bei Konvektion oftmals die darüberliegenden Wolken und die damit verbundenen Reflektivitäten und Satellitendaten (Reflektanzen, Helligkeitstemperaturen) nicht realistisch genug simuliert werden, was zu systematischen Abweichungen bei diesen Größen führt. Insbesondere wird die Reflektivität in den Zentren konvektiver Zellen unterschätzt, wo in der Realität wenige, aber sehr große Hagelkörner zu sehr hohen Werten ( $> 50$  oder  $60$  dBZ) führen.

Beim ICON-RUC und seinem EPS wird daher das aufwändigere 2-Momenten-Schema nach SEIFERT und BEHENG (2006) und NOPPEL et al. (2010) eingesetzt, das eine zusätzliche Hagelklasse enthält und bei dem für jede Hydrometeorart auch die Anzahldichte als ein zweites Moment der Größenverteilungsfunktion prognostisch ist. Dies verleiht der mittleren Partikelgröße (Verhältnis aus Masse zu Anzahldichte) genügend Freiheitsgrade für eine realistischere Simulation bei unterschiedlichen Wolkentypen und Wetterlagen. Im Ergebnis erhalten wir auch realistischere simulierte Radarreflektivitäten und Satellitendaten. Darüberhinaus wird im Rahmen der Ensemble-Generierung an geeigneten Physik-Störungen (Parameterstörungen, stochastische Tendenzstörungen) gearbeitet.

Abbildung 1-7 zeigt wiederum anhand des Fallbeispiels aus Abbildung 1-1 verschiedene Member des ICON-RUC-EPS für 15 UTC aus der 1-h-Vorhersage von 14 UTC der Radarreflektivität (Komposit der  $0.5^\circ$ -Elevationen der simulierten DWD-Radare). Vergleicht man mit Abbildung 1-1, so erkennt man, dass die Bildung einer Linie aus Zellen im Norden von Baden-Württemberg in dieser jüngeren Vorhersage wesentlich besser zur Beobachtung passt, aber durchaus Unterschiede (*Spread*) zwischen den Ensemble-Memberelementen bestehen, die eine gewisse, für konvektive Zellen erwartbare, Vorhersageunsicherheit widerspiegeln. Die bessere Vorhersage kommt hier hauptsächlich durch die seit dem 12-UTC-Lauf aus Abbildung 1-1 erfolgten Datenassimilationsschritte um 13 und 14 UTC zustande. Dies verdeutlicht den großen Gewinn, den man für Warnanwendungen im Kurzzeitfristbereich schon allein durch den häufigeren Modellstart und eine schnellere zeitliche Verfügbarkeit der Vorhersageprodukte erreichen kann. Hinzu kommt noch eine Verringerung des *Bias* in den simulierten Beobachtungen, was wiederum diesen Beobachtungen mehr Wirkung in der

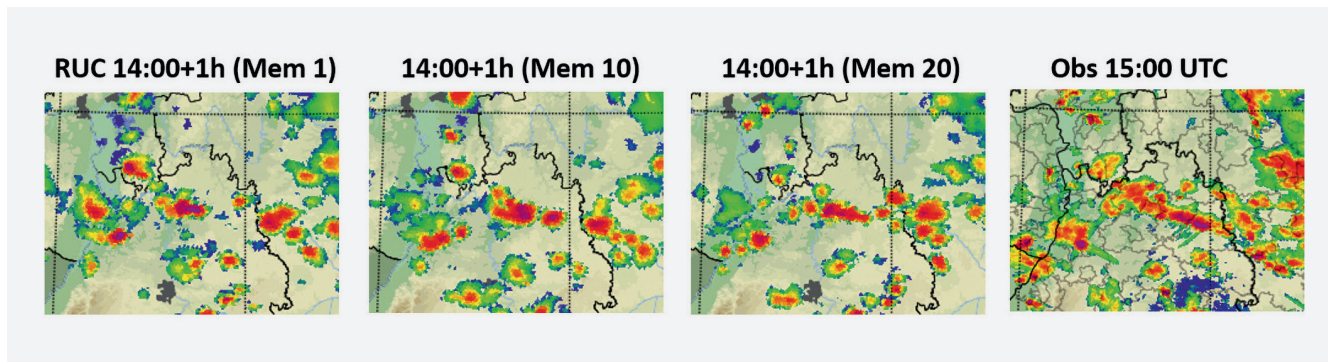


Abbildung 1-7: Einstündige Vorhersage der simulierten Radarreflektivität dreier Member des ICON-RUC-EPS (14-UTC-Lauf) für den Fall aus Abbildung 1-1. Rechts zum Vergleich die Beobachtung. Zu erkennen ist, dass die in den Beobachtungsdaten vorhandene konvektive Linie über dem Norden von Baden-Württemberg von den Members unterschiedlich, aber realitätsnaher als in Abbildung 1-1 simuliert wird und dadurch die Vorhersageunsicherheit abgeschätzt werden kann.

Datenassimilation beschert. Dies unterstreicht, dass ganz allgemein Entwicklungsarbeiten in Datenassimilation und Modellphysik – wie hier – Hand in Hand gehen sollten.

### 7.3 Ausgabe der Vorhersagen

Im Vergleich zum ICON-D2(-EPS) erfolgt die Ausgabe von Modellfeldern und Diagnostiken im ICON-RUC in höherer zeitlicher Frequenz (z. B. alle 15 min für 3D-Felder statt stündlich) und zusätzlich werden einige weitere konvektive Diagnostiken bereitgestellt. Ensemble-Produkte wie Überschreitungswahrscheinlichkeiten und Perzentile werden ebenfalls berechnet.

Darüberhinaus speichern wir für SINFONY vom deterministischen Lauf und allen Ensemblemitgliedern die 5-minütigen simulierten Radarvolumendaten (EMVORADO) aller DWD-Radarstandorte bis 12-h-Vorhersagezeit ab. Daraus leiten wir Radarkomposits und simulierte KONRAD3D-Zell-Objekte für Verifikation und die kombinierten Produkte ab, die nachfolgend beschrieben werden. Auch Niederschlagsgrößen am Boden werden für diese Zwecke alle 5 min abgespeichert.

## 8 Nahtlose Vorhersagen von der Beobachtung über das NWC in den ICON-RUC

Nowcasting-Vorhersagen werden alle 5 min aktualisiert und liegen nach wenigen Minuten vor, das ICON-RUC-EPS wird jede Stunde neu gerechnet und liegt 45 min nach Initialisierungstermin vor. Für die nahtlosen Vorhersagen gilt das Prinzip, dass die jeweils aktuellste NWC-Vorhersage mit der neuesten (aber schon „alten“) ICON-RUC-Vorhersage kombiniert wird und so prinzipiell alle 5 min aktualisiert werden kann. Hier muss aber die Praxis noch zeigen, welche Aktualisierungsraten tatsächlich sinnvoll und nützlich ist. Wir unterscheiden zwischen der flächenbasierten Kombination von Reflektivität und Niederschlag, entweder im Wahrscheinlichkeitsraum oder im Ensemble-raum, und Zell-Objekt-Kombination.

### 8.1 Im Wahrscheinlichkeitsraum

Im Wahrscheinlichkeitsraum leitet man zuerst getrennt für beide zu kombinierende Basisensembles die Überschreitungswahrscheinlichkeiten der zu kombinierenden Größe  $R$  für einen Schwellenwert  $R_0$ ,  $P_{NWC}(R > R_0; x, y, t)$  und  $P_{NWV}(R > R_0; x, y, t)$ , an jedem Gitterpunkt  $x, y$  und für jede Vorhersagezeit  $t$  ab, indem man die Anzahl der Ensemblemember mit Werten  $> R_0$  durch die Zahl der Member teilt. Dies entspricht generell der Definition von Wahrscheinlichkeiten im SINFONY-Kontext.

Die kombinierte Wahrscheinlichkeit  $P$  (Gleichung 1) ist dann eine Überblendung der beiden Wahrscheinlichkeiten für  $R > R_0$  mithilfe einer Wichtungsfunktion  $\alpha_{(t)}$ , im einfachsten Fall eine Linearkombination:

$$P(x, y, t) = \alpha_{(t)} P_{NWC}(R > R_0; x, y, t) + (1 - \alpha_{(t)}) P_{NWV}(R > R_0; x, y, t) \quad (1)$$

$\alpha$  ist 1 für  $t = 0$  und sinkt für  $t \rightarrow \infty$  auf 0 ab und kann auf verschiedene Arten definiert werden. Entweder man legt den Zeitverlauf aufgrund von Erfahrungswerten a priori fest (z. B. lineare Rampe), oder man nutzt abgespeicherte Vorhersagedaten aus einer Trainingsperiode in der Vergangenheit. Der zweite Weg ist vielversprechender. Wir entwickeln und testen zwei Ansätze:

- Benutzung eines geeigneten Ensemble-Verifikations-scores für Nowcasting und Numerische Wettervorhersage gegenüber den Beobachtungen als Funktion der Vorhersagezeit  $t$  und Bestimmung von  $\alpha_{(t)}$ , aus deren Verhältnis zueinander, aufbauend auf Ideen von KOBER et al. (2012). Die Berechnung erfolgt getrennt für verschiedene Schwellenwerte.
- Nutzung von KI-Methoden (z. B. Neuronale Netze) zur automatischen Optimierung des sogenannten *Reliability*-Diagramms bei der Wichtung als Funktion von  $t$  und ggf. weiteren Eingabegrößen. Dies erfolgt simultan für viele Schwellenwerte gleichzeitig und damit ist auch eine Kalibrierung der Kombination verbunden. Wir

haben hier zusammen mit der Universität Ulm die C3-Methode (*Consistent Calibrated Combination*, SCHAUMANN et al. 2021, REMPEL et al. 2022) entwickelt. Das Training wird automatisch über die jüngste Vergangenheit nachgeführt (*rolling origin update*).

Für den Warndienst sind im Allgemeinen mehrere Schwellenwerte relevant und die C3-Methode stellt die Konsistenz der Ergebnisse für verschiedene Schwellenwerte sicher, d. h. die Wahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmendem Schwellenwert monoton ab. Damit bekommt man eine numerische Repräsentierung der gesamten kumulierten Verteilungsfunktion.

Der Vorteil beider Methoden ist, dass die Kombination auf Basis eines Qualitätsmaßes erfolgt und somit hinsichtlich dieses Maßes optimal ist. Der Nachteil ist, dass zunächst Informationen verloren gehen, zum Beispiel über die räumliche Struktur der Niederschlagsfelder in den Mitgliedern (Szenarien). Für die Hochwasservorhersage ist das leider ungünstig, denn hier braucht man einzelne Szenarien der Niederschlagsmenge, um den Eintrag in die verschiedenen Flusseinzugsgebiete bestimmen zu können. Im Rahmen der C3-Methode arbeiten wir an der nachträglichen Rekonstruktion solcher Szenarien, die als Ensemble lokal mit der kombinierten Verteilungsfunktion konsistent sind und gleichzeitig jedes für sich aussieht „wie Wetter“. Dies ist aber noch in einem frühen Entwicklungsstadium.

Theoretisch könnte man hierfür auch einfach die Vorhersagefelder einzelner NWC-Member in einzelne NWV-Member überblenden, beispielsweise mithilfe einer a priori vorgegebenen zeitabhängigen Wichtungsfunktion, so wie es andere Wetterdienste für deterministische Vorhersagen schon versuchen oder tun. Aber dabei treten oftmals durch die typischen Orts- und Zeitfehler der Niederschlagsstrukturen in der NWV störende „Fading-in/Fading-out“-Effekte auf, und man erhielte so oftmals keine realistischen Szenarien im Übergangsbereich vom NWC. Damit ist gemeint, dass eine beobachtete und durch NWC verlagerte Struktur künstlich „verblasst“, während räumlich versetzt Strukturen aus der NWV eingeblendet werden. In geringerem Maße sind solche Probleme auch bei der Kombination im Wahrscheinlichkeitsraum vorhanden, aber dort werden sie durch die Statistik im Ensemble etwas ausgeglichen.

Entscheidend für die Verringerung dieser Störeffekte sind neben den Verbesserungen im NWC (Tendenzen, lokal ausscherende oder quasi-stationäre Strukturen) auch maßgeblich all unsere Maßnahmen in der NWV, die zur Verringerung des Ortsfehlers beitragen (Datenassimilation, Modellphysik, Erhöhung der Updatefrequenz).

## 8.2 Im Ensemble-Raum – INTENSE

Um den Bedarf mancher Anwendungen nach Szenarien schon jetzt decken zu können (Hochwasservorhersage, allgemeine Wetterseiten im Internet, Apps), sind wir derzeit tatsächlich noch auf Methoden des „memberweisen“ Über-

blendens angewiesen. Um hier nicht auf eine a-priori vorzugebende Wichtungsfunktion angewiesen zu sein, wurde von NERINI et al. (2019) das INTENSE-Verfahren (*INTEgration of ENSEMBLES of NWP and Extrapolation*) entwickelt, bei der im Prinzip das Gewicht  $\alpha$  nicht nur eine Funktion der Vorhersagezeit ist, sondern auch vom Ort und der Wetterlage bzw. der räumlichen Niederschlagsabdeckung abhängt.  $\alpha$  ergibt sich dabei implizit aus einer Datenassimilationsmethode (Ensemble Kalman Filter, EnKF). Am DWD haben wir INTENSE für Niederschlag und Reflektivität implementiert und in Abstimmung mit den Entwicklern der MeteoSchweiz weiter verbessert. Das Prinzip ist in Abbildung 1-8 skizziert. Jedes Ensemble-Member wird durch einen Punkt in einem abstrakten Phasenraum dargestellt, und in der Skizze ist der Cluster der NWC-Member (schwarz) zu Anfang der Vorhersage (links) deutlich getrennt vom Cluster der NWV-Member (rot). In einem fortlaufenden Zyklus aus abwechselnd einer kurzen NWC-First-Guess-Vorhersage (STEPS-DWD) über typischerweise  $\Delta t \approx 10$  min und eines EnKF-Korrekturschrittes werden die NWC-Member allmählich an die NWV-Member (ICON-RUC-EPS) herangezogen, was zum kombinierten Ensemble (blau) führt. Hierbei spielen die NWV-Member die Rolle einer Ensemble-„Beobachtung“ für die Datenassimilation auf dem NWC-Ensemble.

Im Prinzip wird hier zwar ad hoc NWC-Member N auf NWV-Member N gezogen, aber die resultierende Wichtungsfunktion ist lokal variabel und basiert auf den Kovarianzen der beiden Ensembles, letztlich also auf den beiden Ensemble-Spreads.

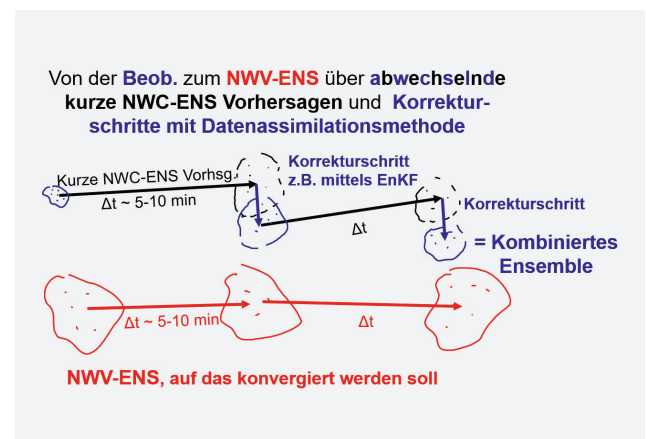


Abbildung 1-8: Prinzip der Kombination im Ensemble-Raum. Jeder Punkt repräsentiert ein Ensemble-Member in einem abstrakten Phasenraum. In dem Beispiel gibt es zu Anfang der Vorhersage (links) einen deutlichen Abstand der Beobachtung (blau, mit geringer Unsicherheit durch etwaige Messfehler) vom Cluster der NWV-Member (rot). Dieser Abstand wird durch alternierende Prädiktor-Korrektor-Schritte aus kurzen NWC-ENS-Vorhersagen (schwarzer Pfeil) und Korrekturschritten mittels einer Datenassimilationsmethode (blauer Pfeil) verringert (rechts). Die Abfolge aus Beobachtung und korrigierten NWC-Vorhersagen bildet das kombinierte Ensemble, das mit jedem Schritt näher an das NWV-ENS heranrückt. Hier bildet die NWV sozusagen die „Beobachtung“ für den Datenassimilationschritt.

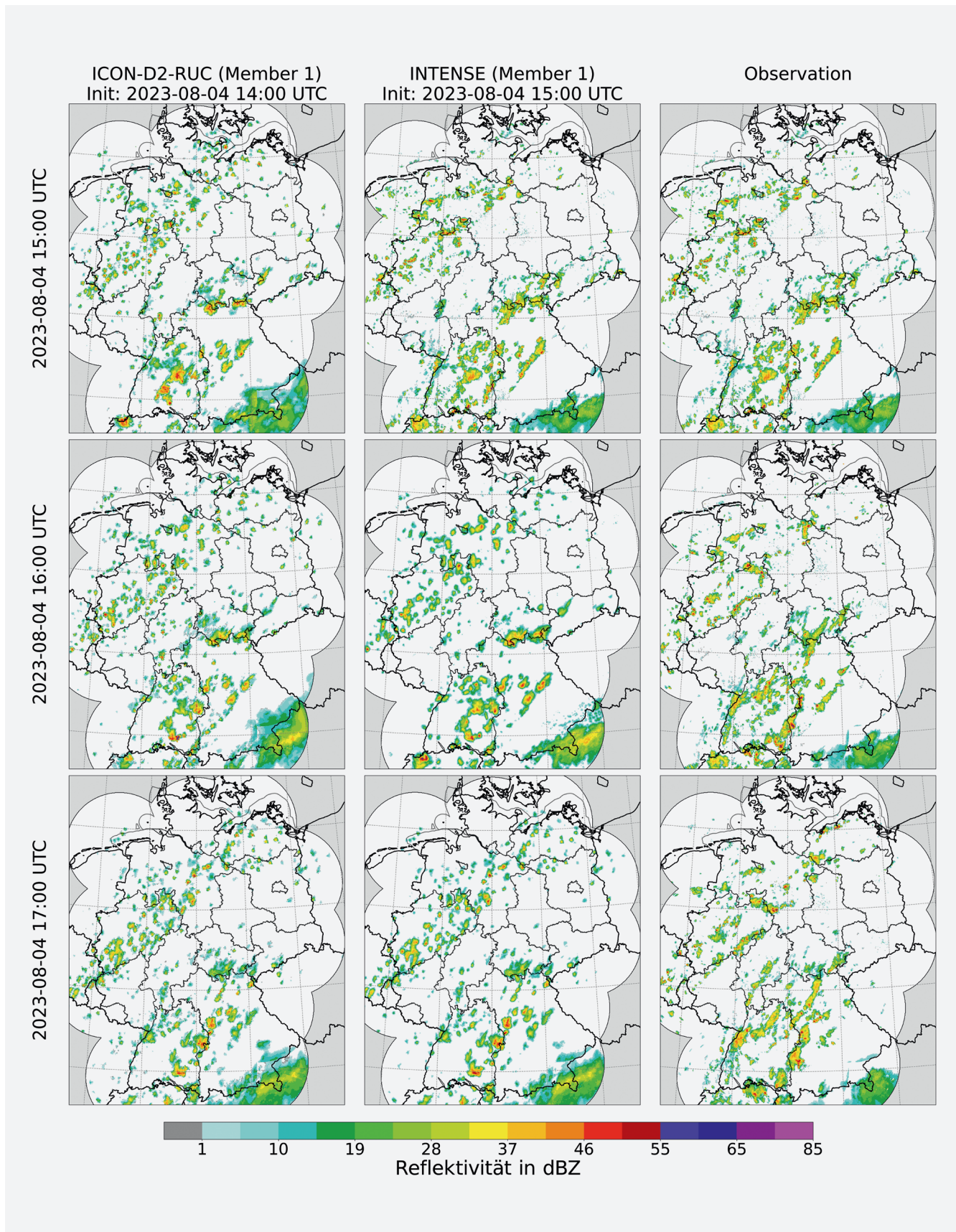


Abbildung 1-9: Beispiel für eine INTENSE-Vorhersage der Radarreflektivität (mittlere Spalte, nur ein Member gezeigt) ausgehend von 15 UTC für 15, 16 und 17 UTC (von oben nach unten) und zugehöriger Beobachtung in der rechten Spalte. Links ist beispielhaft ein Member des ICON-RUC-Ensembles von 14 UTC gezeigt, das in das INTENSE-Produkt eingeflossen ist. Zum Zeitpunkt der Berechnung der Kombination um kurz nach 15 UTC liegt der 15-UTC-Lauf des ICON-RUC noch nicht vor und es muss auf den 14-UTC-Lauf zurückgegriffen werden. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn INTENSE der Beobachtung entspricht und im Zeitverlauf in das ICON-RUC-Member übergeht.

Abbildung 1-9 vergleicht anhand eines Fallbeispiels die Zeitschritte +0, +1 und +2 h eines Members der INTENSE-Vorhersage (mittlere Spalte) mit der Beobachtung (rechts) und der 1 h vorher initialisierten ICON-RUC-EPS-Vorhersage des Members mit derselben Ordnungszahl, gegen den der INTENSE-Member konvergiert (links). Anfangs entspricht INTENSE genau der Beobachtung und geht mit der Zeit über in den ICON-RUC-Member, wobei der Übergang hier nach 2 h weitestgehend erfolgt ist.

Das Verfahren hat den Vorteil, dass es kein Training benötigt, aber als Nachteil kann wegen der *Spread*- (und nicht *Score*-)Bezogenheit nicht garantiert werden, dass der Übergang optimal erfolgt. In der Praxis kann man dem aber durch eine geeignete Konfiguration des Verfahrens recht nahe kommen. Störende „*Fading-in/Fading-out*“-Effekte können aber nach wie vor auftreten.

Abbildung 1-10 zeigt die vergleichende Reflektivitätsverifikation von STEPS-DWD, ICON-RUC-EPS und INTENSE mittels des sogenannten *Fractions Skill Scores* (FSS) für den Monat Juni 2022. Der FSS bewertet die Häufigkeit, mit der ein Schwellenwert (hier 37 dBZ) innerhalb einer Umgebung um einen Punkt (hier Box mit Seitenlänge 34 km)

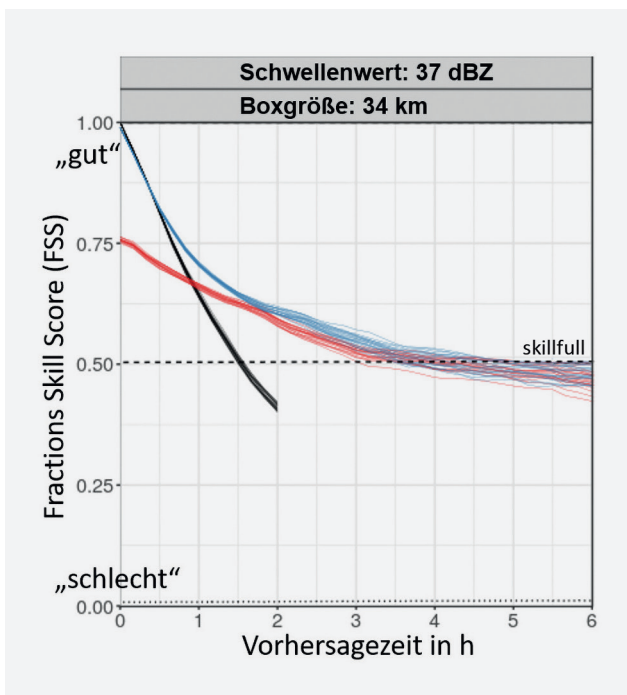


Abbildung 1-10: *Fractions Skill Score* als Funktion der Vorhersagezeit für die Bewertung der Reflektivitätsvorhersage für den Schwellenwert 37 dBZ jeweils innerhalb einer Box mit 34 km Seitenlänge von Ensemble-Memberelementen (jede dünne Linie ist ein Member) für Deutschland für Juni 2022. Schwarz: STEPS-DWD, rot: ICON-RUC-EPS, blau: INTENSE. Datenbasis: 2D-Komposit auf einem gemeinsamen Gitter mit 2 km Maschenweite. Zu erkennen ist, dass die STEPS-DWD-Member nach perfektem Start rasch in Qualität nachlassen und den ICON-RUC-EPS-Memberelementen bereits nach 1 h unterlegen sind. Die Kombination aus beiden (INTENSE-Member) weist im Übergangsbereich das beste Ergebnis auf.

überschritten wird, im Sinne des normierten quadratischen Fehlers im Häufigkeitsraum. Er variiert von 0 (schlecht) bis 1 (perfekte Vorhersage) und verzeiht Ortsfehler innerhalb der betrachteten Skala. Man berechnet den FSS gleichzeitig für viele Schwellenwerte und Skalen, aber qualitativ erhalten wir für diesen Fallmonat immer ein ähnliches Ergebnis: Wie in Abbildung 1-2 antizipiert, starten die STEPS-DWD-Member (dünne schwarze Linien, kaum zu unterscheiden) alle bei der perfekten Qualität, werden aber bereits innerhalb einer Stunde (!) durch das ICON-RUC-EPS (dünne rote Linien) geschlagen. Die kombinierten INTENSE-Member (blaue Linien) haben eine Qualität, die mindestens genauso gut, im Übergangsbereich sogar besser als die beiden Einzelverfahren ist.

### 8.3 Zell-Objekte – KONRAD3D-SINFONY

Um die Vorteile von Zell-Objekten für konvektive Warnungen auch für längere Vorhersagen zu erschließen, haben wir ein neues Konzept der nahtlosen Zell-Objekt-Kombination entwickelt (FEIGE et al. 2018) und einen entsprechenden Prototypen für KONRAD3D-EPS und ICON-RUC-EPS im täglichen Testbetrieb umgesetzt, genannt KONRAD3D-SINFONY.

Um die vorhergesagten Zell-Objekte im ICON-RUC-EPS zu bestimmen, detektieren und tracken wir die Zellen in den simulierten Radarvolumenscans mittels der KONRAD3D-Methoden, genauso wie in der Beobachtung, alle 5 min in jedem Member bis +12 h Vorhersagezeit. Das Vorgehen zur Kombination mit dem KONRAD3D-EPS basiert auf unserer Erfahrung (Fallstudien, Verifikation), dass Gewitterzellen und ihr Lebenszyklus im Kilometer-skaligen ICON-RUC-EPS oftmals recht realistisch vorhergesagt werden, aber im Allgemeinen nicht genau am richtigen Ort. Die Treffgenauigkeit wird trotzdem nach ungefähr derselben Vorhersagezeit wie bei INTENSE besser als die des KONRAD3D-EPS, wenn man sie anhand eines gewichteten Scores aus Beiträgen durch Ortsfehler, Zellflächenfehler und Intensitätsfehler bewertet. In den verschiedenen Ensemble-Memberelementen treten oftmals Zellen verstreut innerhalb einer gewissen größeren Region auf, aber mit flächenmäßig geringem Überlapp und daher punktuell mathematisch kleinen Auftrittswahrscheinlichkeiten. Daraus kann man ablesen, dass das Auftreten solcher Zellen irgendwo innerhalb des größeren Gebiets recht wahrscheinlich, der genaue Ort aber unsicher ist. Genau diese Informationen sind auch bis +12 h für den Warndienst durchaus brauchbar.

Bei der Kombination in KONRAD3D-SINFONY werden folgende zwei Zell-Typen unterschieden:

- **Zellen, die zur Analysezeit schon vorhanden sind:** KONRAD3D-EPS und RUC-EPS-Zellen werden bruchfrei kombiniert und liefern detaillierte Auskünfte über das zu erwartende weitere Zellverhalten. Dabei findet für die RUC-Zellen zuerst eine Vorfilterung statt, bei der zum Beobachtungszeitpunkt für jede beobachtete

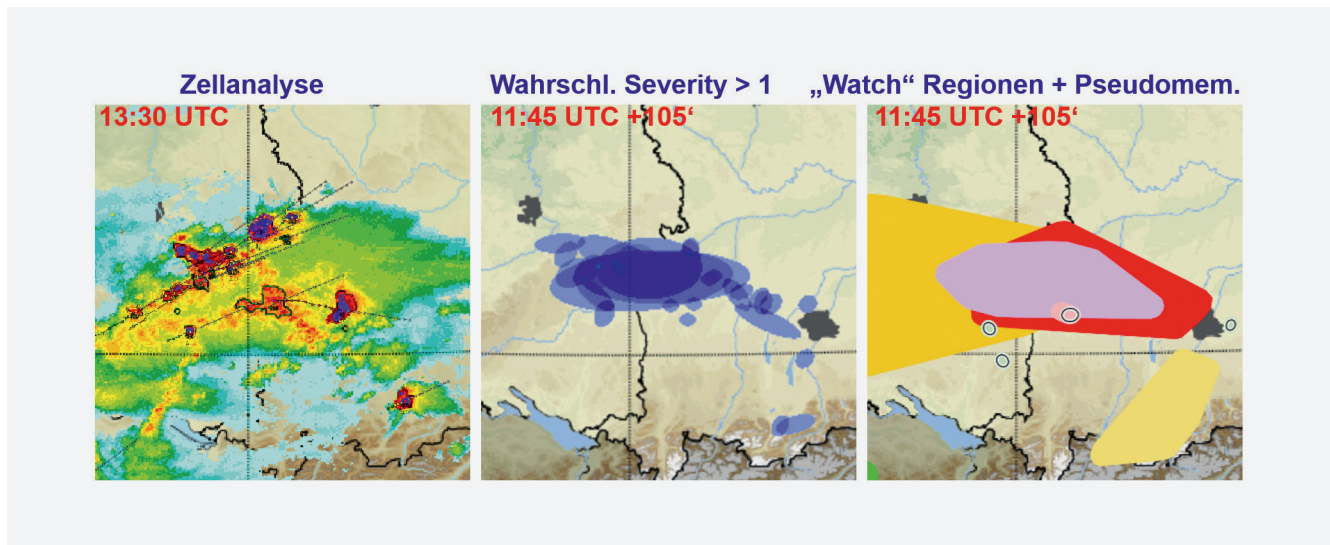


Abbildung 1-11: Beispiel für die Visualisierungskonzepte von KONRAD3D-SINFONY (Mitte und rechts) und zum Vergleich die tatsächlich eingetretenen analysierten KONRAD3D-Zellen (links) am 8.6.2024 13:30 UTC im Schwäbischen Donautal und Alpenvorland. Die in den Mitgliedern der Basisensembles vorhergesagten Zellen werden einerseits als überlappende Ellipsen und daraus berechnete Wahrscheinlichkeiten dargestellt (Mitte) und andererseits geclustert und jeder Cluster durch seine konvexe Hülle („Watch“-Region) repräsentiert (rechts), wobei für Zellen, die schon zur Analysezeit vorhanden waren, auch ein Pseudomember gezeigt ist. Die Farben entsprechen dem Schweregrad: grün = 0 (schwach), gelb = 1, rot = 2, violett = 3 (extrem).

Zelle einzeln mittels *Clustering* die aus allen RUC-Mitgliedern „ähnlichsten“ und nicht allzu weit entfernten ( $\leq \approx 50$  km) simulierten Zellen herausgefiltert werden. Für diese Zellen wird eine ad-hoc-Ortskorrektur durchgeführt, durch räumliche Verschiebung der Modellzellen und ihrer Vorhersagetrajektorien um den Versatzvektor zum Beobachtungszeitpunkt. Die restlichen Zellen werden verworfen.

- Zellen, die erst während der Vorhersage entstehen:**  
Bei diesen Zellen sind keine Informationen aus dem KONRAD3D-EPS vorhanden, es sind hier nur RUC-Zellen nutzbar. Hier werden alle Zellen aus allen RUC-Ensemble-Mitgliedern verwendet, um potentielle Entstehungsgebiete und die dort zu erwartenden Zelleigenschaften durch räumliches *Clustering* einzugrenzen („Watch“-Gebiete).

Im Ergebnis entstehen *Cluster* von Vorhersagetrajektorien für bereits beobachtete Zellen und andere *Cluster*, die erst zu späteren Vorhersagezeitpunkten dazukommen und die für jeden Zeitpunkt die „Watch“-Gebiete darstellen.

Für die grafische Darstellung verwenden wir zwei verschiedene Konzepte. Zum einen stellen wir Überschreitungswahrscheinlichkeiten für den Zellschweregrad dar, die aus dem Überlapp der als flächengleiche Ellipsen repräsentierten Zellen oberhalb des Schwellenwertes berechnet werden. Diese Darstellung ist intuitiv einfach, hat aber den Nachteil, dass aufgrund der begrenzten Memberzahl vermutlich nicht immer der gesamte potentiell gefährdete Bereich abgedeckt wird. Auch gehen Detailinformationen über die einzelnen Zelleigenschaften (Höhe, VIL, VII, Zellmasse, Rotation, Blitzaktivität) verloren.

In einer anderen Darstellung versuchen wir, diese Informationen zu behalten, aber innerhalb eines *Clusters* extrem zu verdichten und trotzdem schnell erfassbar zu machen. Zur Repräsentierung eines *Clusters* zu einer bestimmten Vorhersagezeit verwenden wir die konvexe Hülle aller Zellflächen („Watch“-Region) des *Clusters* und ermitteln den sogenannten Pseudomember, das ist diejenige Zelle, die am ähnlichsten zu allen anderen Zellen im *Cluster* ist und somit die anderen am besten repräsentiert. Das Konzept des Pseudomembers stammt aus den USA (JOHNSON et al. 2020) und wurde ursprünglich für Verifikation entwickelt. Wir wenden es auch zur Visualisierung an.

KONRAD3D-SINFONY ist in einer Erstversion seit Mitte 2023 im täglichen Testbetrieb. Schon rein technisch ist die Echtzeit-Produktion eine große Herausforderung, vor allem Detektion und Tracking der simulierten Zellen in allen RUC-Mitgliedern alle 5 min bis 12 h. Eine erste kleine Evaluierung hat klar gezeigt, dass inhaltlich noch Verbesserungsbedarf besteht, bevor an einen operationellen Betrieb zu denken ist.

Ein Beispiel für diese beiden Visualisierungsarten findet sich in Abbildung 1-11. Am 8.6.2024 sind um 13:30 UTC neben anderen Zellen auch zwei heftige Hagelzellen im schwäbischen Donautal und südlich davon aufgetreten (linkes Bild). Die ausgehend von 11:45 UTC zum dargestellten Zeitpunkt +105 min vorhergesagten Zellen stammen hauptsächlich aus den Mitgliedern des RUC-EPS, hier aus der 10-UTC-Vorhersage (die jüngste, aus der die synthetischen Zellen in unserem täglichen Testbetrieb um 11:45 UTC verfügbar waren). Die KONRAD3D-EPS-Zellen hatten da schon ihr meist zu kurz vorhergesagtes Lebensende erreicht. Im mittleren Plot sind die Wahrscheinlichkeiten für Zellen mit Schweregrad  $> 1$  („stark“

oder „extrem“) gezeigt, wobei Farbe und Transparenz die aus dem Überlapp berechnete Wahrscheinlichkeit anzeigen. Man erkennt, dass die tatsächlich aufgetretenen starken und extremen Zellen vom RUC-Ensemble erfasst (blau = niedrige Wahrscheinlichkeit) und auch als KONRAD3D-Zellen erkannt wurden. Rechts sieht man die *Cluster* der „Watch“-Regionen und die Pseudomember. Die Farbe zeigt den zu erwartenden Schweregrad (lila = extrem) und die Farbhelligkeit, ob die Wahrscheinlichkeitsstufe dafür niedrig, mittel oder hoch ist.

Derzeit sind *Clustering* und Pseudomember noch nicht optimal konfiguriert. Wir müssen eine bessere Balance zwischen Reduktion und Behalten von Information (Anzahl/Größe der *Cluster*, wieviele Pseudomember pro *Cluster* werden gezeigt) finden und eine gewisse Sprunghaftigkeit von Vorhersage zu Vorhersage verringern. Das Konzept ist aber hochinteressant für unseren jetzigen und für den zukünftig mehr und mehr automatisierten Warnprozess.

## 9 Übersicht SINFONY-Systeme und adressierte Nutzerkreise

Nachdem alle Teilsysteme von SINFONY vorgestellt wurden, gibt die Abbildung 1-12 einen zusammenfassenden Überblick und verknüpft die einzelnen Komponenten mit den Nutzergruppen, für die sie gedacht sind. Jede Komponente ist für mindestens eine Nutzergruppe interessant. Die Vorhersageparameter, die nicht durch das NWC und die kombinierten Produkte abgedeckt sind (z. B. Wind, Temperatur, Feuchte), müssen gänzlich dem RUC entnommen werden. Um auch hier einen nahtlosen Übergang von den (lückenhaften) Beobachtungen in die RUC-Vorhersage zu erreichen, müssen zukünftig noch andere Verfahren entwickelt und implementiert werden. In Gebieten ohne entsprechende Beobachtungen wird es aber nach wie vor nur die RUC-Vorhersagen als beste Schätzung geben können. Zukünftige neue flächendeckende Beobachtungssysteme wie beispielsweise die neue Europäische Satellitengeneration könnten hier in Zukunft eine Verbesserung bringen.

## 10 Status und Ausblick

Mit der Entwicklung, Implementierung und fortlaufenden Konsolidierung von SINFONY in den letzten Jahren (Projekt „SINFONY-Forschung“) ist die Grundlage für weitere Verbesserungen und Ergänzungen in der Zukunft gelegt. Alle Komponenten sind technisch echtzeitfähig. Manche Komponenten wie KONRAD3D, ICON-RUC und INTENSE sind auch inhaltlich schon so konsolidiert, dass sie operationalisiert werden konnten. Die anderen folgen schrittweise je nach inhaltlicher Reife in den nächsten Jahren. Nutzende und Kunden wurden und werden schon frühzeitig im Entwicklungsprozess eingebunden, sowohl in der Konzeptphase neuer Entwicklungen als auch durch fortlaufende Evaluierungen während der Konsolidierungsphase. Dieser Austausch hilft dabei, gegenseitiges Verständnis und wechselseitige Akzeptanz zu wecken und wird auch in Zukunft fortgeführt und im Rahmen neuer Projekte gestärkt, z. B. zusammen mit den Hochwasservorhersagezentralen im Rahmen von IDEA-S4S (Italia – DEutschlAnd Science-4-Services network in weather and climate) für das Co-Design, angelaufen in 2023/24.

Insgesamt hat sich das Konzept aus Abschnitt 5 als zwar sehr ambitioniert, aber tragfähig und letztlich für den DWD umsetzbar und nützlich erwiesen. Insbesondere haben in den ersten beiden Vorhersagestunden nach wie vor die Ensemble-Nowcasting-Verfahren für Niederschlag, Reflektivität und Zell-Objekte ihren Nutzen und Berechtigung, wenn es darum geht, die sehr dynamischen, nichtlinearen und schwer vorhersagbaren Entwicklungsprozesse bei kleinräumigen Extremereignissen hochfrequent im Blick zu behalten und die Brücke von der Beobachtung in die NWV zu schlagen. Denn trotz neuer Datenquellen entspricht in der NWV die Analyse nach wie vor nicht exakt der Beobachtung und die Rechenzeiten sind nach wie vor zu groß, um beispielsweise alle 5 min neue NWV-Vorhersagen machen zu können.

Auch inhaltlich verträgt unsere NWV noch nicht die dazu notwendige Datenassimilation im 5-min-Rhythmus. Bei-

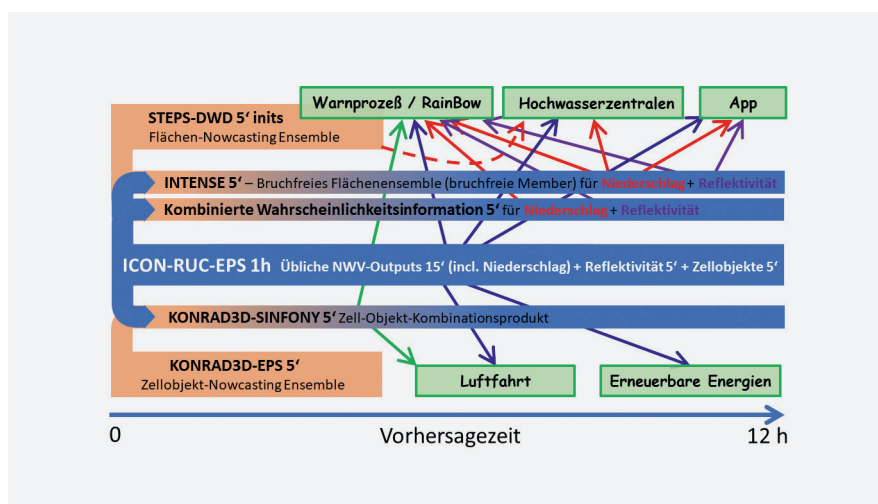


Abbildung 1-12: Schematische Darstellung der verschiedenen SINFONY-Basisverfahren und der kombinierten Vorhersageprodukte sowie die damit adressierten Anwendergruppen (grün). „RainBow“ ist ein neues DWD-internes Projekt zur Modernisierung des Warnprozesses und steht für „Risikobasierte, Anwendungsorientierte, Individualisierbare Bereitstellung Optimierter Warninformationen“. Orange dargestellt sind NWC-Verfahren, in Blau NWV-Verfahren. Farbübergänge symbolisieren die nahtlose bruchfreie Kombination. Die Zeitangaben 5' und 1 h beziehen sich auf die Aktualisierungsraten der Vorhersagen.

spielsweise bestehen Probleme mit nichtlinearer Physik und indirekten Beobachtungen im Kontext unserer linearen Datenassimilationsverfahren, indem ein „zu starkes“ ständiges Heranziehen an die Beobachtungen zur Verletzung gewisser physikalischer Balancen der prognostischen Felder und zu *Spinup/-down* führt, was sich letztlich sogar negativ auf die Qualität der Vorhersagen auswirken kann.

Um das Projekt „SINFONY-Forschung“ nicht zu überfrachten und einem zu großen Risiko des Scheiterns auszusetzen, hat man sich bisher auf die ersten 12 h und die Optimierung auf die besonders problematischen sommerlichen konvektiven Ereignisse beschränkt. Es ist aber klar, dass der Bedarf für solche nahtlosen Vorhersagen breiter ist. In Zukunft werden wir daher an Optimierungen auch für andere Wetterlagen und -phänomene (stratiforme und winterliche Lagen, Nebel, andere Wetterparameter etc.) arbeiten und den Zeithorizont über 12 h hinaus ausdehnen. Dafür werden auch Satellitendaten in das SINFONY-System integriert. Hinsichtlich Niederschlag gibt es außerdem nach wie vor Verbesserungsbedarf an unserer radarbasierten quantitativen Niederschlagsabschätzung, die die Basis für alle Niederschlagsvorhersagen ist, egal mit welchem Verfahren.

Eine andere spannende Frage wird in Zukunft sein, inwieweit SINFONY von neuen, datengetriebenen und effizienten KI-Vorhersagemethoden profitieren können wird, die, trainiert mit umfangreichen Reanalysedatensätzen, auf globaler Skala schon erfolgreich entwickelt und eingesetzt werden. Das hängt davon ab, inwieweit sie sich auf die regionale Skala und kleinräumige, seltene und stark nicht-lineare Extremereignisse anwenden lassen, inklusive der Schätzung der aktuellen Vorhersageunsicherheit.

## Literatur

- BOWLER, N.E., PIERCE, C.E., SEED, A.W., 2006: STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **132**, 2127–2155, <https://doi.org/10.1256/qj.04.100>.
- FEIGE, K., POSADA, R., BLAHAK, U., 2018: Developing a concept to visualize object-based weather forecasting ensembles. In: *Workshop on Visualisation in Environmental Sciences (EnvirVis)*, RINK, K., ZECKZER, D., BUJACK, R., JÄNICKE, S. (Hrsg.). The Eurographics Association, 19–25, <https://doi.org/10.2312/envirvis.20181133>.
- FORESTI, L., REYNIERS, M., SEED, A., DELOBBE, L., 2016: Development and verification of a real-time stochastic precipitation nowcasting system for urban hydrology in Belgium. *Hydrology and Earth System Sciences* **20**, 505–527, <https://doi.org/10.5194/hess-20-505-2016>.
- JOHNSON, A., WANG, X., WANG, Y., REINHART, A., CLARK, A.J., JIRAK, I.L., 2020: Neighborhood- and object-based probabilistic verification of the OU MAP ensemble forecasts during 2017 and 2018 Hazardous Weather Testbeds. *Weather and Forecasting* **35**, 169–191, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0060.1>.
- KOBER, K., CRAIG, G.C., KEIL, C., DÖRNBRACK, A., 2012: Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **138**, 755–768, <https://doi.org/10.1002/qj.939>.
- KUNZ, M., BLAHAK, U., HANDWERKER, J., SCHMIDBERGER, M., PUNGE, H.J., MOHR, S., FLUCK, E., BEDKA, K.M., 2018: The severe hailstorm in southwest Germany on 28 July 2013: characteristics, impacts and meteorological conditions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **144**, 231–250, <https://doi.org/10.1002/qj.3197>.
- LEINONEN, J., HAMANN, U., GERMANN, U., MECIKALSKI, J.R., 2022: Nowcasting thunderstorm hazards using machine learning: The impact of data sources on performance. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **22**, 577–597, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-577-2022>.
- LEINONEN, J., HAMANN, U., SIDERIS, I.V., GERMANN, U., 2023: Thunderstorm nowcasting with deep learning: A multi-hazard data fusion model. *Geophysical Research Letters* **50**, <https://doi.org/10.1029/2022GL101626>.
- NERINI, D., FORESTI, L., LEUENBERGER, D., ROBERT, S., GERMANN, U., 2019: A reduced-space ensemble Kalman filter approach for flow-dependent integration of radar extrapolation nowcasts and NWP precipitation ensembles. *Monthly Weather Review* **147**, 987–1006, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0258.1>.
- NOPPEL, H., BLAHAK, U., SEIFERT, A., BEHENG, K.D., 2010: Simulations of a hailstorm and the impact of CCN using an advanced two-moment cloud microphysical scheme. *Atmospheric Research* **96**, 286–301, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.09.008>.
- PULKKINEN, S., NERINI, D., PÉREZ HORTAL, A.A., VELASCO-FORERO, C., SEED, A., GERMANN, U., FORESTI, L., 2019: Pysteps: An open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1. 0). *Geoscientific Model Development* **12**, 4185–4219, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4185-2019>.
- REINOSO-RONDINEL, R., REMPEL, M., SCHULTZE, M., TRÖMEL, S., 2022: Nationwide radar-based precipitation nowcasting – A localization filtering approach and its application for Germany. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **15**, 1670–1691, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3144342>.
- REMPEL, M., SCHAUMANN, P., HESS, R., SCHMIDT, V., BLAHAK, U., 2022: Adaptive blending of probabilistic precipitation forecasts with emphasis on calibration and temporal forecast consistency. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* **1**, <https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0020.1>.
- SCHAUMANN, P., HESS, R., REMPEL, M.,

- BLAHAK, U., SCHMIDT, V., 2021: A calibrated and consistent combination of probabilistic forecasts for the exceedance of several precipitation thresholds using neural networks. *Weather and Forecasting* **36**, 1079–1096, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0188.1>.
- SEED, A.W., 2003: A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **42**, 381–388, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0381:ADASSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0381:ADASSA>2.0.CO;2).
- SEIFERT, A., BEHENG, K.D., 2006: A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part I: Model description. *Meteorology and Atmospheric Physics* **92**, 45–66, <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0112-4>.
- SOHN, P., BLAHAK, U., REMPEL, M., KELLER, J., FRANK, J., 2021: SINFONY E-Learning Kapitel 1 – Problemstellung und Einführung. URL: [www.dwd.de/sinfony](http://www.dwd.de/sinfony) → „SINFONY E-Learning“ → „Kapitel 1“, Abruf: 25.07.2024.
- SOHN, P., BLAHAK, U., REMPEL, M., KELLER, J., FRANK, J., 2022: SINFONY E-Learning Kapitel 2 – Der SINFONY-Ansatz und Co-Design. URL: [www.dwd.de/sinfony](http://www.dwd.de/sinfony) → „SINFONY E-Learning“ → „Kapitel 2“, Abruf: 25.07.2024.
- SOHN, P., BLAHAK, U., REMPEL, M., KELLER, J., FRANK, J., 2023: SINFONY E-Learning Kapitel 3 – Nowcasting. URL: [www.dwd.de/sinfony](http://www.dwd.de/sinfony) → „SINFONY E-Learning“ → „Kapitel 3“, Abruf: 25.07.2024.
- SOHN, P., BLAHAK, U., REMPEL, M., KELLER, J., FRANK, J., 2024: SINFONY E-Learning Kapitel 4 – NWV-Modell. URL: [www.dwd.de/sinfony](http://www.dwd.de/sinfony) → „SINFONY E-Learning“ → „Kapitel 4“, in *Erstellung*.
- TROMEL, S., BLAHAK, U., EVARISTO, R., MENDROK, J., NEEF, L., PEJICIC, V., SCHARBACH, T., SHRESTHA, P., SIMMER, C., 2024: Fusion of radar polarimetry and atmospheric modelling. In: *Advances in Weather Radar: Precipitation science, scattering and processing algorithms*, volume 2, BRINGI, V., MISHRA, K.V., THURAI, M. (Hrsg.). The Institution of Engineering and Technology, ISBN: 978-1-83953-625-0.
- WAPLER, K., 2021: Mesocyclonic and non-mesocyclonic convective storms in Germany: Storm characteristics and life-cycle. *Atmospheric Research* **248**, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105186>.
- WILHELM, J., WAPLER, K., BLAHAK, U., POTTHAST, R., KUNZ, M., 2023: Statistical relevance of meteorological ambient conditions and cell attributes for nowcasting the life cycle of convective storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **149**, 2252–2280, <https://doi.org/10.1002/qj.4505>.

## Kontakt

DR. ULRICH BLAHAK  
Deutscher Wetterdienst  
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung  
Projektleiter SINFONY-Forschung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
[ulrich.blahak@dwd.de](mailto:ulrich.blahak@dwd.de)

Hinweis: Der Autor steht stellvertretend für zahlreiche Mitarbeitende im Projekt „Sinfony-Forschung“ sowie unzählige „Friends“ aus den verschiedenen Geschäftsbereichen des DWD, die alle zum Erfolg der Arbeiten beitragen oder beigetragen haben und die hier in loser Reihenfolge genannt werden:

Julia Keller, Roland Potthast, Alberto De Lozar, Christian Welzbacher, Manuel Werner, Vanessa Fundel, Kathleen Helmert, Marcus Paulat, Robert Feger, Liselotte Bach, Michael Hoff, Martin Rempel, Lisa Neef, Kathrin Feige, Markus Schultze, Sven Ulbrich, Matthias Zacharuk, Kobra Khosravian, Jana Mendrok, Mareike Burba, Leonhard Scheck, Christian Berndt, Gregor Pante, Maike Ahlgrimm, Annett Strauß, Philipp Zschenderlein, Elisabeth Bauernschuberth, Kathrin Wapler, Ulrich Friedrich, Arne Spitzer, Lukas Josipovic, Nora Strotjohann, Thomas Deppisch, Matthias Gottschalk, Tobias Bergmann, Cornelius Hald, Malte Schmid, Jan Bondy, Andreas Brechtel, Michael Debertshäuser, Sophie Löbel, Nikolaos Antonoglou, Axel Seifert, Klaus Stephan, Michael Denhard, Felix Fundel, Christoph Schraff, Julia Frank, Matthias Jerg, Günther Zängl, Stephanie Hollborn, Linda Schlemmer, Susanne Theis, Reinhold Hess, Thomas Hanisch, Helmut Frank, Andreas Höfer, Markus Zeindl, Alexander Hartmann, Marcus Werner, Peter Sohn, Björn Breitenbach, Armin Rauhte-Schöch, Katharina Lengfeld, Ewelina Walawender, Christian Herold, Marcus Beyer, Helge Tuschy, Christina Speicher, Adrian Leyser

M. FRECH, M. SCHAPER, B. ROHRDANTZ, M. BOSCACCI, M. HAPPENHOFER

# 2

## Das polarimetrische Wetterradar: Messprinzip und Betrieb

### Polarimetric Weather Radar: Measuring Principle and Operation

#### Zusammenfassung

Radardaten aus einem Verbund von Wetterradarsystemen sind das Rückgrat für eine Vielzahl von Anwendungen in Wetterdiensten. Damit Radardaten mit geforderter Qualität und Verfügbarkeit bereitstehen, muss die Hardware eines Dualpolarisations (DP)-Radars definierte Anforderungen erfüllen. Der technische Zustand wird rund um die Uhr überwacht und mithilfe der operationell gemessenen Daten die absolute Kalibrierung der DP-Radare, die Positioniergenauigkeit und die Qualität der Dualpolarisationsdaten sichergestellt. Die Atmosphäre wird alle fünf Minuten dreidimensional abgetastet und sobald ein Antennenlauf komplett erfasst ist, erfolgt die Übertragung und zentrale Verarbeitung. Eine besondere Herausforderung ist die Behandlung von nicht-meteorologischen Echos in den Daten, z. B. durch Windkraftanlagen oder WLAN-Sender.

#### Summary

Radar data from a network of weather radar systems are the backbone for a multitude of applications in weather services. In order to provide radar data with required quality and availability, the hardware of a dual polarization weather radar system must meet defined requirements. The technical status is monitored 24/7, and operationally measured data is used to ensure the absolute calibration of the dual-polarization system, the positioning accuracy, and the quality of the dual-polarization data. The atmosphere is scanned three-dimensionally every 5 minutes. Once a sweep is completely acquired, it is transmitted and processed centrally. A particular challenge is the treatment of non-meteorological echoes in the data, e.g. from wind turbines or WLAN transmitters.

#### 1 Einleitung

Für die flächendeckende dreidimensionale Erfassung des Niederschlags werden Wetterradarsysteme verwendet. Mithilfe dieser Fernerkundungssysteme kann der Niederschlag mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung in einem Radius in der Größenordnung von 100 km dreidimensional erfasst werden. Die Kenntnis der vertikalen Struktur von Niederschlagsereignissen ist insbesondere für die Charakterisierung von Gewitterzellen wichtig. Darüber hinaus kann ein Wetterradar auch die Windgeschwindigkeit messen. Es ist daher offensichtlich, dass diese Systeme essenzielle Daten bereitstellen, ohne die automatische und lokalisierte Warnvorschläge vor Wettergefahren in Echtzeit nicht möglich wären. Dualpolarisations-Wetterradarsysteme (DP-Radare) werden mittlerweile in fast allen europäischen Ländern genutzt. Diese Systeme wurden etwa ab dem Jahr 2004 eingeführt. Sie erlauben eine deutlich verbesserte Klassifikation der Hydrometeore und ermöglichen eine genauere quantitative Niederschlagsbestimmung und neue Datenqualitätssicherungsverfahren. Durchgesetzt haben sich dabei Systeme, die den Mikrowellenpuls gleichzeitig mit einer horizontalen (H) und vertikalen (V) linearen Polarisation abgeben (*simultaneous*

*transmit and receive*, kurz STAR-Mode). In Europa kommen mehrheitlich C-Band-Geräte (5 GHz,  $\approx 5$  cm Wellenlänge) zum Einsatz, die je nach Anforderung mit X-Band-Systemen ( $\approx 3$  cm Wellenlänge) und S-Band-Systemen ( $\approx 10$  cm Wellenlänge) komplementiert werden. X-Band-Systeme werden typischerweise zur Füllung von Lücken in der Abdeckung genutzt. S-Band-Systeme werden dort eingesetzt, wo intensive Niederschläge regelmäßig vorkommen, da mit dieser Wellenlänge Dämpfungseffekte kleiner sind. Es gibt eine umfangreiche Literaturliste über die detaillierte Funktionsweise eines DP-Radars und den neuen Möglichkeiten zur Charakterisierung des Niederschlags (BRINGI und CHANDRASEKAR 2001; FABRY 2015; RYZHKOV und ZRNIĆ 2019; SELTMANN 2021). Daher gehen wir in diesem Beitrag nur auf die wesentliche Funktionsweise eines DP-Radars ein, um dann das grundsätzliche Systemdesign eines Radarverbunds sowie die von einem DP-Radar erzeugten Daten und die Überwachung der Datenqualität vorzustellen.

Eine wichtige Anforderung an ein Wetterradar ist die möglichst lückenlose und bodennahe Abtastung der Atmosphäre. Die Reichweite eines Radars wird durch die Dämpfung des Radarpulses entlang seines Weges begrenzt, die

abhängig von der verwendeten Wellenlänge ist. Die Radarantenne muss meist etwas angehoben werden, um Bodensechos zu vermeiden, sodass die Erfassung des Niederschlags in weiter entfernten Gebieten nicht mehr bodennah sein kann. Gleichzeitig macht sich dann schon die Krümmung der Erde bemerkbar. Daher kann nur mit einem Verbund aus Radaren eine bodennahe Erfassung des Niederschlags in der Fläche realisiert werden. Radarsysteme müssen im 24/7-Betrieb kontinuierlich mit einer Verfügbarkeit von über 98 % Daten liefern. Ein 24/7-Betrieb ist aus meteorologischer Sicht sinnvoll, da nutzbare Daten auch in Situationen ohne Niederschlag erfasst werden (Doppler-Windmessungen) und die vollständige Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Wetterereignissen eine wichtige Anforderung ist. Um diesen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, werden die Systeme vollständig aus der Ferne gesteuert und überwacht. Alle wesentlichen Komponenten eines Radarsystems werden mithilfe von BITE-Meldungen (BITE = *built in test equipment*) überwacht. Eine analoge BITE-Meldung ist beispielsweise die Messung der Sendeleistung des Radarsenders. Mit einer Auflösung auf einer Zeitskala von Sekunden stehen BITE-Meldungen zur Verfügung, sodass der Radarservice schnell und frühzeitig Fehler erkennen und eine Fehlerbeseitigung initiieren kann. Damit Folgeverfahren die polarimetrischen Radardaten („Radarmomente“) sinnvoll nutzen können, müssen die gemessenen Radarmomente in der geforderten Qualität bereitgestellt werden. Ein Folgeverfahren wäre hier zum Beispiel die Hydrometeorklassifikation, in der auf Basis der Radarmessungen der Niederschlagstyp ermittelt wird. Um die Datenqualität zu gewährleisten, kommen sogenannte datenbasierte Monitoringverfahren zum Einsatz, mit denen die Datenqualität in Echtzeit evaluiert und geprüft werden kann (FIGUERAS I VENTURA et al. 2012; FRECH und HUBBERT 2020; FRECH et al. 2019; GABELLA et al. 2016; HOLLEMAN et al. 2010; HUUSKONEN und HOLLEMAN 2007; LOUF und PROTAT 2023). Datenbasiert bedeutet, dass die Radarmessung selbst genutzt wird, um zum Beispiel die absolute Kalibrierung zu überwachen. Für die Bewertung der absoluten Kalibrierung kann das „Selbstkonsistenz“-Verfahren (RYZHKOV und ZRNIC 2019) oder die Bewertung von Radarmessungen genutzt werden, bei denen die Rückstreuungseigenschaften bekannt sind. Der genau bestimmbare Ort und die Emissionen im Mikrowellenbereich machen die Sonne dabei zu einer der wichtigsten Quellen für die datenbasierten Monitoringverfahren (HOLLEMAN et al. 2010; HUUSKONEN und HOLLEMAN 2007). Mithilfe der Sonne können neben der Radardatenqualität auch wichtige Komponenten eines Radarsystems (z.B. die Antennenpositionierung) über die gesamte Lebensdauer eines Radarsystems (typischerweise  $\approx 20$  Jahre) kontinuierlich überwacht werden.

Werden Daten aus einem Verbund von Radaren gewonnen, erfolgt die Verarbeitung der Daten zu Produkten in einer zentralen Instanz. Die gemeinsame und einheitliche Verarbeitung ermöglicht die Nutzung der objektiv besten Datenqualität für ein Raumvolumen, insbesondere wenn dieses von mehreren Radaren erfasst wird. Werden Radardaten

zentral verarbeitet, müssen diese innerhalb eines definierten Zeitfensters garantiert angeliefert werden.

In Abschnitt 2 wird zunächst das Wetterradarsystem mit seinen wesentlichen Komponenten und seinem Betrieb eingeführt. In den Abschnitten 3 und 4 folgt eine Beschreibung der Signalverarbeitung und die Vorstellung der wichtigsten Radarmomente. Um die Verfügbarkeit und Qualität der Daten sicherzustellen, kommen Monitoringverfahren zum Einsatz, die in Abschnitt 5 beschrieben werden. Abschnitt 6 beleuchtet die Herausforderungen im Zusammenhang mit Radarmessungen, bevor dieser Beitrag mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick endet.

## 2 Das Wetterradarsystem

Moderne Wetterradarsysteme sind je nach Anwendungsfall unterschiedlich aufgebaut, sodass es sowohl in Größe als auch Konstruktion verschiedenste Varianten gibt. Wetterradare werden meist erhöht auf Türmen, Bergen oder hohen Gebäuden aufgebaut, um eine gute und freie horizontale Sicht bis in große Entfernungen zu ermöglichen. Dabei kommen sowohl Stahlgittermast- als auch Betontürme zum Einsatz, die typischerweise Höhen im Bereich von 35 bis 50 Meter haben. Die wichtigsten Komponenten eines Radars sind in Abbildung 2-1 gezeigt, zur Veranschaulichung dient Abbildung 2-2 mit dem Forschungsradar am Observatorium.

Der Sender ist unterhalb des Antennenstandfußes positioniert, entweder direkt unterhalb der Antenne in einem Betriebsraum oder am Fuß des Turms. Als Sender kommt ein Magnetron, also ein klassischer Röhrenverstärker, zum Einsatz. Magnetrons sind freischwingend, ermöglichen

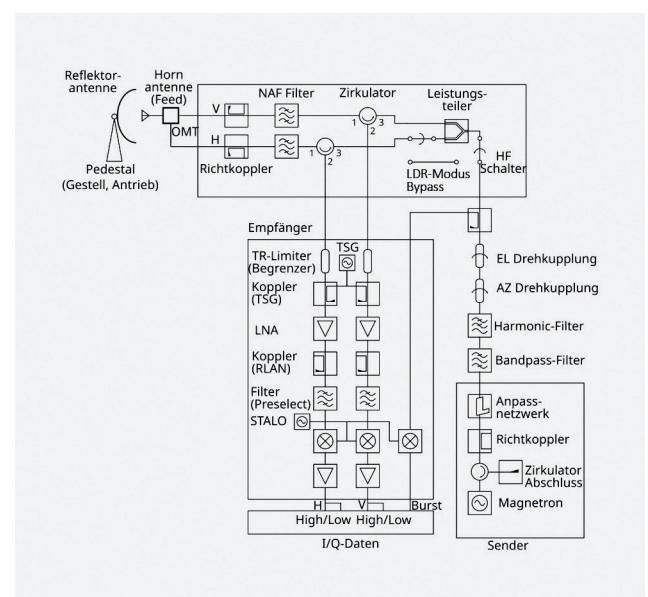


Abbildung 2-1: Übersicht der wichtigsten Komponenten und Signalwege eines Magnetron-Dualpolarisations-Radars im Sende- und Empfangszweig.

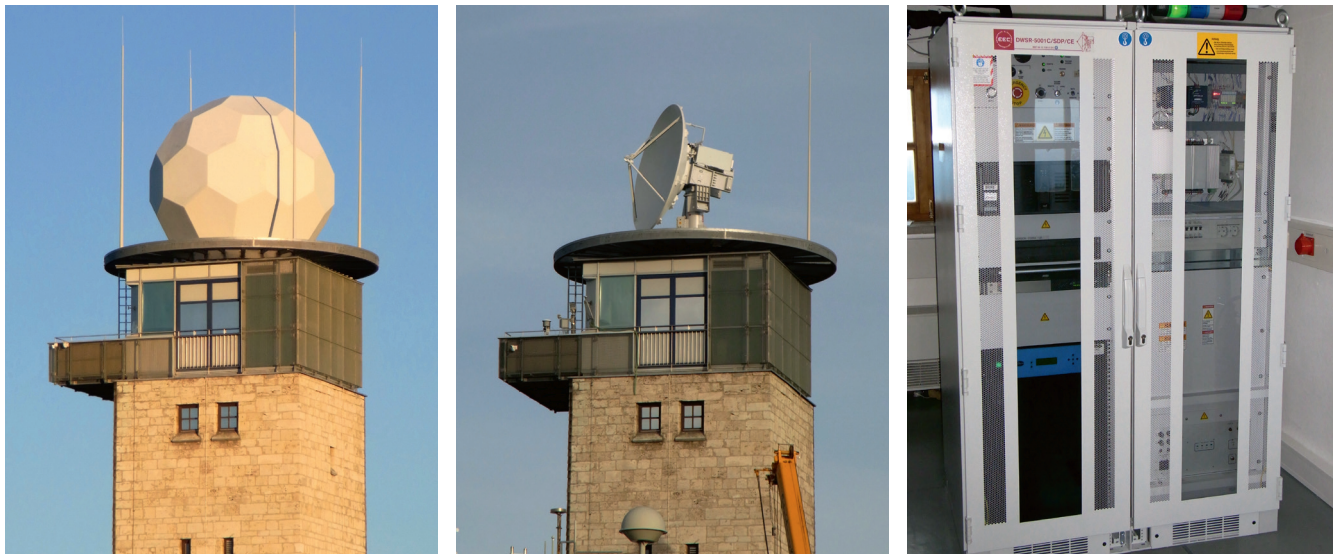


Abbildung 2-2: Links: Das Dualpol-Wetterradar am Observatorium Hohenpeißenberg mit Radom. Mitte: Dasselbe Radar ohne Radom. Es ist das Pedestal mit Antenne und Empfängerbox zu sehen. Rechts: Sender, Radarsteuerung und Signalprozessor befinden sich in einem Schrank, der sich im Betriebsraum unterhalb der Antenne befindet.

kurze Pulse und hohe Spitzenleistungen (beim DWD 500 kW). Dieser Sendertyp ist in Europa aktuell Standard. Alternativ werden international auch Klystrons, Wanderfeldröhren (*travelling wave tube*, TWT) und zunehmend Halbleiterverstärker (*solid state power amplifier*, SSPA) eingesetzt. Da nur ein einzelner Sender vorhanden ist, muss das Signal in H- und V-Kanal mittels eines Hohlleiters (*Power-Divider*) geteilt werden, um den „STAR-Mode“ zu ermöglichen. Hochfrequenz (HF)-Schalter ermöglichen zudem, die gesamte Sendeleistung nur im H-Kanal zu senden (*linear depolarization ratio*, kurz LDR-Mode).

Das Radarsignal in H und V wird über einen Hohlleiter getrennt auf die Antenne zum Sendehorn geführt. Dort bringt der *Orthomode Transducer* (OMT) das H- und V-Signal zusammen, um den Sendepuls mit der Antenne gerichtet in die Atmosphäre zu schicken. Das Rückstreusignal wird dann ebenfalls durch den OMT in den H- und V-Anteil aufgeteilt. Der Hohlleiter wird durch einen Zirkulator erneut in Sende- und Empfangspfad getrennt. Ein langer Empfangspfad erhöht die Verluste und senkt dadurch die Sensitivität, sodass kurze Wege einen Vorteil bieten. Hohlleiterzüge, die durch den Antennenstandfuß führen, müssen aufgrund der Drehmechanik mit einer oder mehreren Hohlleiter-Drehkupplungen (*Rotary Joint*) ausgestattet sein. Ergänzend befinden sich im Hohlleiter Filter, die unerwünschte Nebenausstrahlungen außerhalb des Sendefrequenzbandes minimieren. Außerdem sind an verschiedenen Stellen Koppler integriert, die eine Systemanalyse zu Monitoring-Zwecken ermöglichen. Beispielsweise speist der DWD mit einem Signalgenerator regelmäßig ein Testsignal am oberen *Cross-Guide-Koppler* direkt hinter dem Feedhorn ein.

Die Antenne dient der Bündelung der elektromagnetischen Wellen, wodurch diese stark in einer Raumrichtung fokussiert werden („ein hoher Gewinn“). Dadurch wird die Emp-

findlichkeit des Radars in der Raumrichtung erhöht und es kann eine genaue Zuordnung der Richtung durch die kleine Strahlbreite erfolgen. Die Größe der Antenne hängt im Wesentlichen vom Antennentyp und den Anforderungen an Strahlbreite sowie der verwendeten Frequenz ab. Typischerweise werden zentral gespeiste Reflektorantennen („Antennenschüssel“) verwendet, die bei einer Strahlbreite von 1° einen Durchmesser von über 4 m aufweisen. Die Antenne ist auf dem sogenannten Pedestal montiert. Der untere Teil des Antennenstandfußes ist feststehend und mit dem Gebäude verbunden, während sich der obere Teil durch die Antriebe in Azimut und Elevation frei bewegen lässt. Die Richtung der Antenne wird durch den Azimut (horizontaler Rotationswinkel) und die Elevation (vertikaler Kippwinkel) definiert. Winkelencoder bestimmen die exakte Position, in die das System gerade ausgerichtet ist. Eine hohe Präzision ist notwendig, um die Richtung der aufgenommenen Daten exakt zuordnen zu können (FRECH et al. 2019). Die Kombination aus Reflektor, Sendehorn und Streukörper im Nahbereich der Antenne (z.B. Radom, Streben, Blitzschutz) führen zur Ausprägung der Richtcharakteristik der Antenne. Die entstehenden Haupt- und Nebenkeulen tragen somit maßgeblich zur Gesamtqualität der Radardaten bei (FRECH et al. 2013).

Der DWD verwendet in seinen Radaren eine sogenannte *Receiver-over-Elevation*-Anordnung. In dieser ist der Empfänger und ein Teil der Hohlleiterkomponenten auf dem drehenden Teil des Antennenstandfußes auf der Rückseite der Antenne montiert. Der Vorteil dieser Anordnung liegt in den niedrigeren Empfangsverlusten durch kurze Hohlleiterwege.

In den Empfangszweigen hinter dem Zirkulator ist zunächst ein *Transmitting-Receiving-Limiter* (TR-Limiter) eingebaut, der die Kanäle vor Schäden durch das Sende-

signal schützt. Im Anschluss werden die Empfangssignale rauscharm verstärkt und mittels eines stabilen Oszillators (*stable local oscillator*, STALO) und Mischers auf eine Zwischenfrequenz umgesetzt. Dort werden sie von einem *Intermediate-Frequency-Digitizer* (IFD) für die Weiterverarbeitung digitalisiert. Die resultierenden digitalisierten I/Q-Daten werden in Echtzeit zum Signalprozessor übertragen, wo die Radarmomente bestimmt werden.

Zur Aufrechterhaltung eines stabilen Betriebes ist eine konstante Überwachung und eine regelmäßige Wartung der Hardware notwendig. Zur Überwachung kann das herstellerseitige BITE-System verwendet werden. Die Daten werden in einem visuellen Monitoringsystem aufbereitet (z.B. *Grafana*) und eine automatische Alarmierung bei der Überschreitung von Grenzwerten ausgelöst. Für Wartung und Instandhaltung hat der DWD erfahrenes Personal, das für Einsätze vor Ort und aus der Ferne bereitsteht.

### 3 Dreidimensionales Abtasten der Atmosphäre

Radarnetzwerke werden so geplant und umgesetzt, dass eine möglichst lückenlose und gute bodennahe Abdeckung erzielt wird. Dies wird am Beispiel des DWD-Radarverbunds in Abbildung 2-3 (links) gezeigt (siehe auch Beitrag 3 in diesem Heft). Obwohl das gesamte Bundesgebiet mit Radarmessungen gut erfasst wird, gibt es, zum Teil bedingt durch die Orographie, erhebliche Lücken bei der Erfassung von Gebieten im bodennahen Bereich. Dies wird deutlich, wenn man die Bereiche betrachtet, in denen Radarmessungen unterhalb 2 km vorliegen (Abbildung 2-3, rechts). Dies muss bei der Interpretation von Radardaten grundsätzlich immer berücksichtigt werden, insbesondere wenn Niederschlagsmengen am Boden aus Radarmessungen bestimmt werden.

Für die Charakterisierung eines Gewitters ist die dreidimensionale Abtastung der Atmosphäre durch ein Wetterradar unabdingbar, um zum Beispiel das Entwicklungs-

stadium einer Zelle zu bewerten. Die Zeitskala von konvektiven Ereignissen liegt im Minutenbereich. Hydrologische Anwendungen erfordern eine möglichst genaue bodennahe Radarmessung ohne Störechos durch Orographie. Die Güte der Radarmomente wiederum ist abhängig von der Anzahl der Pulse, die für ein Radarstrahl zur Verfügung stehen. Aus diesen Randbedingungen wird klar, dass die Definition des Scannings immer ein Kompromiss darstellen wird, um unterschiedliche Nutzeranforderungen zu berücksichtigen und gleichzeitig eine ausreichende Datenqualität zu garantieren. Als Standard hat sich ein fünfminütiger Scanzzyklus etabliert, der rund um die Uhr zur Verfügung steht. Es gibt keine wetterlagenabhängige Adaption des Scannings. Beim DWD setzt sich das Scanning aus einem terrainfolgenden Niederschlagsscan, einem aus 10 Elevationen zusammengesetzten Volumenscan und einem Profilerscan auf 90° Elevation (*Birdbath-Scan*) zusammen. Die Elevationsfolge des terrainfolgenden Niederschlagsscan am Radar Memmingen ist in Abbildung 2-4 gezeigt.

Bei der Meteoschweiz werden ebenfalls alle 5 Minuten Radardaten bereitgestellt (Volumenscan bestehend aus 20 Elevationen, siehe (GERMANN et al. 2022)) und bei Austrocontrol alle 2,5 Minuten ein Halbscan mit jeweils 8 Elevationen.

### 4 Radardaten

Entlang der Blickrichtung der Radarantenne werden Mikrowellenpulse horizontal und vertikal polarisiert in die Atmosphäre gesendet. Der gesendete Puls bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre. Ein Teil der Pulsleistung in der jeweiligen Polarisationssebene wird an Niederschlagspartikeln zurückgestreut und durch die Radarantenne empfangen. Die gemessenen analogen Rückstreusignale im H- und V-Kanal werden im IFD digitalisiert und dann als Zeitreihen im Signalprozessor verarbeitet. Aus der Laufzeit des Pulses wird die Entfernung des

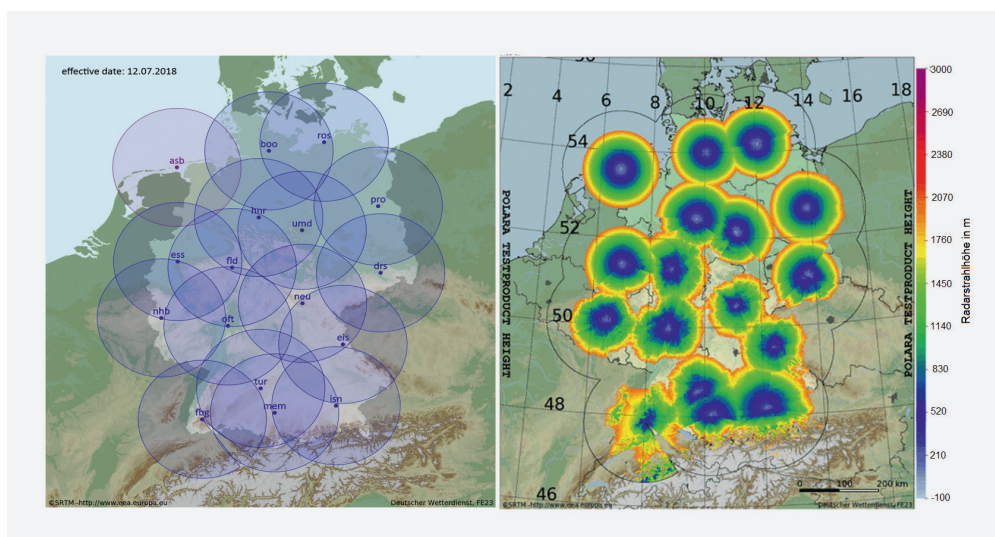


Abbildung 2-3: Links: Radarabdeckung in Deutschland durch 17 Radarsysteme, wobei die Erfassungsbereiche jeweils 150 km betragen. Rechts: Darstellung der Verfügbarkeit von Radarmessungen bis zu einer Höhe von 2000 m über Grund für den terrainfolgenden Niederschlagsscan des DWD.

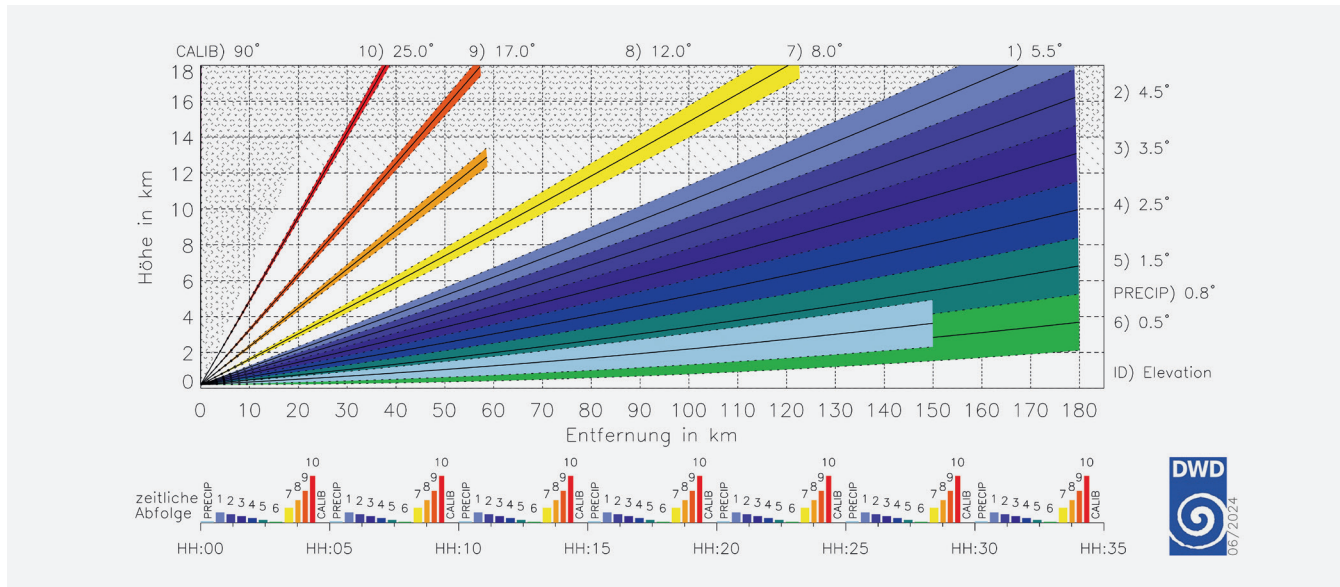


Abbildung 2-4: Prinzip der beim DWD eingesetzten Radar-Scan-Strategie (seit Dezember 2012). Alle 5 Minuten wird ein terrainfolgender Niederschlagsscan („PRECIP“, hellblauer Strahl), ein Volumenscan bestehend aus 10 Elevationen (von 5,5° blau bis 25° rot) sowie zur Kalibrierung („CALIB“) ein *Birdbath*-Scan auf 90° Elevation durchgeführt. Die zu den jeweiligen Elevationen gehörenden Erfassungsbereiche sind auf der x-Achse aufgetragen. In der unteren Reihe ist die zeitliche Sequenz dargestellt (Grafik: P. Tracksdorf, DWD).

Rückstreuesignals zum Radar bestimmt. Die Radargleichung (Gleichung 1) stellt dann den quantitativen Bezug zur gemessenen Rückstreuleistung  $P$  und den Niederschlagsteilchen im korrespondierenden Pulsvolumen her (z.B. DOVIK und ZRNIC 1993; SELTMANN 2021), aus der die effektive Radarreflektivität  $Z_e$  abgeleitet wird:

$$Z_e = 10 \log_{10} P_r + 20 \log_{10} (r) + 10 \log_{10} (C) \quad (1)$$

$C$  ist die sogenannte Radarkonstante, die alle Eigenschaften der Radarhardware (Sendeleistung, Empfangsverluste, Antenneneigenschaften usw.) beinhaltet, und  $r$  beschreibt die *Range*, die  $Z_e$  zugeordnet wird. In einem Dualpol-Radar wird diese Gleichung für jeweils den H- und V-Kanal bestimmt. In der Radargleichung werden die Rückstreuungseigenschaften einer flüssigen Tropfengrößenverteilung angenommen.

Die Pulse werden in sogenannten Radarstrahlen zusammengefasst, die standardmäßig 1° breit sind. Die räumliche Abtastung orientiert sich im Normalfall an der Pulslänge (typischerweise 250 m), jedoch wird oft auch ein sogenanntes Überabtasten mit einer feineren Abtastung verwendet (beim DWD z.B. standardmäßig 25 m). Cluttersignale (Störechos) lassen sich damit besser aus den Daten entfernen. Die Radarmomente werden mit einer sogenannten *Rangebin*-Auflösung von 250–500 m abgegeben (DWD, Austrocontrol 250 m, Meteoschweiz 500 m). Die Anzahl der Pulse eines *Rays* ist abhängig von der Drehgeschwindigkeit und der Pulswiederholfrequenz (*pulse repetition frequency*, PRF). Mit typischen Konfigurationen (12°/s Antennen-Drehgeschwindigkeit und einer PRF von 1000 Hz) stehen in der Größenordnung 50 Pulse für jeweils den hori-

zontalen und vertikalen Empfangszweig zur Verfügung, mit denen der Signalprozessor aus den Zeitreihen die polarimetrischen Radarmomente bestimmt. Bei der Berechnung der Momente sind verschiedene Verfahren möglich. Hier sei auf SELTMANN (2021) verwiesen, in der eine kompakte Darstellung über die unterschiedlichen Verarbeitungsmethoden zu finden ist. Im Allgemeinen werden Kombinationen von verschiedenen Auto- und Kreuzkorrelationen verwendet, um aus den digitalisierten Zeitreihen die polarimetrischen Radarmomente zu bestimmen.

Die Radarmessungen kommen in vielen unterschiedlichen Anwendungen zum Einsatz, die verschiedene Anforderungen an die Radarsignalverarbeitungstufen stellen. Daher können vom Signalprozessor die Momente in unterschiedlichen Verarbeitungsstufen abgegeben werden:

- Ungefiltert: Radarmomente, die aus den Zeitreihen ohne Anwendung eines Clutterfilters berechnet werden.
- Gefiltert: Radarmomente mit Clutterfilter und zusätzlicher Qualitätssicherung. Es werden *Rangebins* verworfen, wenn Schwellwerte von Qualitätsmomenten, die die Signalgüte beschreiben, überschritten oder unterschritten werden.
- Dopplermomente, die entfaltet oder nicht entfaltet sind. Der eindeutig bestimmbare Dopplergeschwindigkeitsbereich ist abhängig von der PRF (HENGSTEBECK et al. 2018). Indem die PRF von *Ray* zu *Ray* wechselt, beispielsweise alternierend zwischen 800 und 1200 Hz, wird eine höhere Eindeutigkeit der Geschwindigkeitsmessung in einem Bereich (in diesem Fall von  $\pm 32$  m/s) erreicht.

- Qualitätsmomente, die für die Bewertung der Qualität von Radarmomenten herangezogen werden.

Der hier genannte Clutterfilter ist ein Doppler-Clutterfilter. Werden die Zeitreihen spektral verarbeitet (was Standard ist), kann der Echo-Anteil von stationärem Clutter (z.B. Fernsehturm, Gebäude) von dem Wettersignal getrennt werden. Hier macht man sich die Tatsache zu Nutzen, dass sich diese Ziele nicht bewegen.

Ist die Atmosphäre um  $360^\circ$  im Azimut abgetastet, werden die *Rays* in einem sogenannten *Sweep* abgespeichert und zur Weiterverarbeitung an die Nutzer übertragen. Bei den europäischen Wetterdiensten hat sich als Ausgabeformat das ODIM-Format etabliert, das auf dem HDF5-Standard aufbaut (MICHELSON et al. 2021). Die Radarmomente werden als *Multi-Moment-Single-Sweep*-Datensatz mit einer

Auflösung von 8 oder 16 Bit übertragen. In Tabelle 2-1 sind die wichtigsten Radarmomente zusammengefasst, die vom Radarstandort abgegeben werden.

Um die Radarmessungen sinnvoll und vor allem quantitativ interpretieren zu können, sind eine Reihe von Algorithmen notwendig, mit denen zunächst die Messungen charakterisiert, klassifiziert und gegebenenfalls korrigiert werden. Dies ist Teil der Radardatenqualitätssicherung. Eine Übersicht von Phänomenen, die bei der Interpretation von Radarmessungen berücksichtigt werden müssen, wird in Abbildung 2-5 gezeigt. Um die Niederschlagsmenge zu bestimmen, muss der Niederschlagstyp herausgefunden werden. Betrachtet man Messungen mit konvektivem Niederschlag ( $Z > 40$  dBZ), muss die Wegdämpfung der Mikrowelle ermittelt und korrigiert werden. Hier nutzt man sogenannte Selbstkonsistenzbeziehungen. Dabei wird mithilfe der

Tabelle 2-1: Auswahl von Radar- und Qualitätsmomenten eines STAR-Mode-Radars, die im Signalprozessor berechnet werden. Für die Definitionen wird auf die zitierte Literatur verwiesen. Mit „U“ gekennzeichnet sind die Momente aus dem ungefilterten Verarbeitungszweig im Signalprozessor.

Radarmomente	Beschreibung	Genauigkeitsanforderung
(U) $Z_h$ , (U) $Z_v$	Radarreflektivität (horizontaler, $h$ ; vertikaler, $v$ , Kanal) (dBZ)	$\pm 1$ dB
(U) $Z_{DR}$	Differentielle Reflektivität $Z_h - Z_v$ (dB). Indiz für die Form des Niederschlags. Sphärisches Teilchen $Z_{DR} = 0$ dB, ellipsoide Teilchen je nach Ausrichtung $Z_{DR} < 0$ , $Z_{DR} > 0$ .	$\pm 0,2$ dB
(U) $\rho_{hv}$	Kreuzkorrelationskoeffizient $\rho_{hv}$ Werte $< 0,9$ : Hinweis auf Mischung verschiedener Hydrometeore (z.B. Hagel und Regen) Werte $< 0,7$ : nicht-meteorologische Ziele	$> 0,99$ für stratiformen, kleintropfigen Regen, $\pm 0,005$
(U) $\Phi_{DP}$	differentielle Phase ( $^\circ$ ) zwischen H- und V-Kanal. Quantifiziert die Dämpfung der Mikrowellen und ermöglicht eine Dämpfungskorrektur.	$\pm 0,5^\circ$
$K_{DP}$	spezifische differentielle Phase (deg/m), die aus $\Phi_{DP}$ abgeleitet wird. Indikator für die Konzentration von Tropfen und damit der zu erwartenden Niederschlagsintensität.	
(U) $V_h$ , (U) $V_v$	Dopplergeschwindigkeit in Strahlrichtung (m/s)	$\pm 0,5$ m/s
(U) $W_h$ , (U) $W_v$	Spektrale Breite (m/s) Maß für die Turbulenz im Pulsvolumen	
Qualitätsmomente		
$SQI_h$ , $SQI_v$	<i>Signal quality index</i>	Wertebereich [0, 1]
$CCOR_h$ , $CCOR_v$	Clutter-Power (dB)	Wertebereich [-50 – 0 dB]
$SNR_h$ , $SNR_v$	Signal-Rausch-Verhältnis (dB)	
$CPA_h$ , $CPA_v$	Clutter-Phasen-Ausrichtung ( ); Identifikation von stationären Clutter	

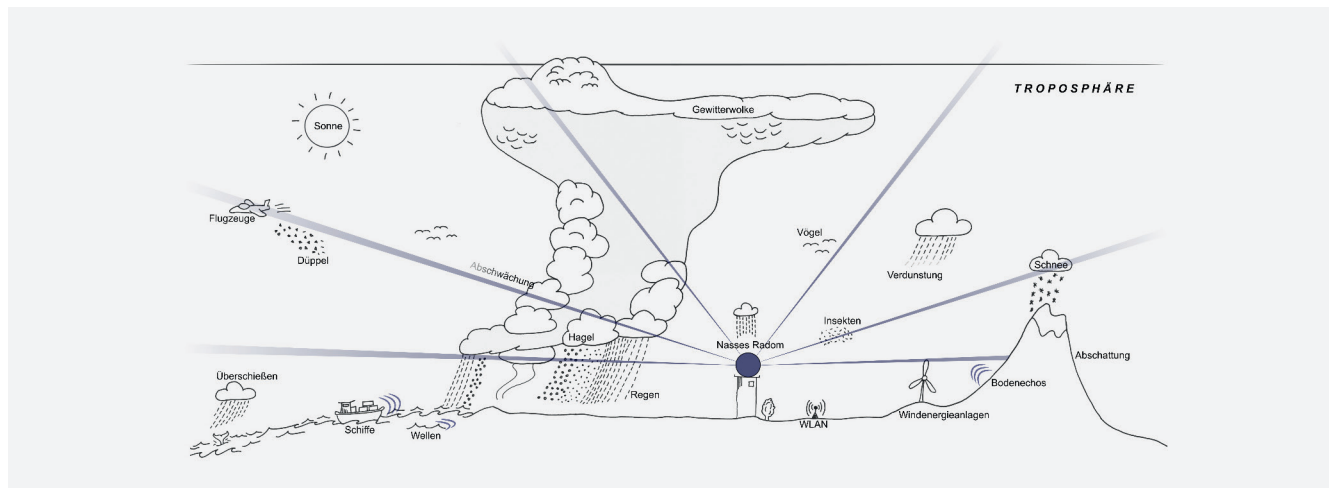


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung von möglichen Fehlerquellen bei Radarmessungen. Neben Niederschlag und anderen meteorologischen Phänomenen werden vom Wetterradar auch andere Ziele (wie Berge, Schiffe, Vögel etc.) erfasst, die zu Störechos führen und nachträglich entfernt werden müssen (Skizze: N. Rathmann, DWD, angelehnt an einen Cartoon von M. Peura, FMI).

gemessenen differentiellen Phase der Dämpfungsteil quantifiziert, um die Radarreflektivität zu korrigieren (RYZHKOV und ZRNIC 2019). Darüber hinaus erfasst das Wetterradar eine Reihe von zusätzlichen Zielen, die vor einer meteorologischen Interpretation der Daten ebenfalls identifiziert und je nach Anwendung entfernt werden müssen. Dies können zum Beispiel Schiffe, Gebäude, Berge, Windenergieanlagen, Vögel, Insekten und Döppel (*Chaff*) sein. Die oben genannten Schritte erfolgen im Normalfall immer in einer zentralen Datenverarbeitung, in der die Daten aller Radare parallel verarbeitet und aufbereitet werden. In einer zentralen Qualitätssicherung können dann auch sehr einfach zusätzliche Datenquellen (Satellitendaten, Bodenmessungen, thermodynamische Informationen aus einem Vorhersagemodell usw.) genutzt werden, mit der die Qualität der Radarmessung zusätzlich verbessert werden kann (GERMANN et al. 2022; WERNER 2014).

## 5 Die Sicherung der Radardatenqualität im Betrieb

Wetterradare müssen kontinuierlich Daten über ihre gesamte Lebensdauer (typischerweise 20 Jahre) in einem 24/7-Betrieb liefern. Gerade bei kritischen Wettersituationen müssen Radare mit einer hohen zeitlichen Verfügbarkeit Daten in hoher Qualität zur Verfügung stellen. Wichtig ist dabei auch die Homogenität der Datenqualität im gesamten RadarNetzwerk. Datenbasierte Verfahren zur Sicherstellung der Datenqualität (inklusive der Positioniergenauigkeit der Antenne) sind mittlerweile Standard (FIGUERAS I VENTURA et al. 2012; FRECH und HUBBERT 2020; FRECH et al. 2019; GABELLA et al. 2016; HOLLEMAN et al. 2010; HUUSKONEN und HOLLEMAN 2007; LOUF und PROTAT 2023). Die dabei zum Einsatz kommenden Verfahren sind automatisiert und liefern kontinuierlich Informationen über den Zustand der Datenqualität. Meist kommen folgende Verfahren zum Einsatz:

### 5.1 Evaluierung des Sonnensignals in Radarmessungen

Die Sonne emittiert Energie im C-Band und diese Energie kann mit einem Wetterradar gemessen werden. Das *Dominion Radio Astrophysical Observatory* (DRAO; TAPPING 2013) in Kanada stellt mehrmals am Tag hochgenaue Energieflussmessungen zur Verfügung. Damit steht eine unabhängige Referenzmessung zur Verfügung, mit der die Kalibrierung des Empfangszweigs des Radars möglich wird (HOLLEMAN et al. 2010). Eine Übereinstimmung von  $\pm 1$  dB kann damit erreicht werden. Gleichzeitig kann die Position der Sonne hochgenau bestimmt werden, sodass der Azimut und die Elevation der Sonne aus der Radarmessung mit der zu erwartenden Position der Sonne verglichen werden kann. Ein Unterschied in den Winkeln entspricht dann dem Positionierfehler der Antenne (FRECH et al. 2019; HUUSKONEN und HOLLEMAN 2007). Eine Positionierung der Antenne besser  $\pm 0,1^\circ$  kann damit erzielt werden. Entscheidend dabei ist, dass diese Bewertung der Radardaten im laufenden Betrieb gemacht werden kann, da die Sonne oft genug während des operationellen Abtastens der Atmosphäre erfasst wird (die Zahl schwankt je nach Jahreszeit und Scandefinition; beim DWD ca. 30 Sonnenbegegnungen am Tag).

### 5.2 $Z_{DR}$ -Offset aus dem Birdbath-Scan

Die beiden Empfangskanäle im Radar sind in ihren Hochfrequenzeigenschaften nie perfekt identisch. Daher muss die differentielle Reflektivität kalibriert werden, um diesen Unterschied auszugleichen. Der dafür notwendige Offset wird aus dem sogenannten *Birdbath-Scan* bestimmt. Die Antenne befindet sich dabei auf einer Elevation von  $90^\circ$ . Die Reflektivität in H und V von fallendem Niederschlag muss dabei im Mittel identisch sein, sodass  $Z_{DR} = Z_h - Z_v = 0$  dB ist. Ist  $Z_{DR}$  ungleich Null, definiert dies den Offset, der abgezogen werden muss, damit  $Z_{DR} = 0$  dB ist.

### 5.3 1-Punkt-Kalibrierung mit einem Testsignal-generator (TSG)

Mit der Einspeisung eines definierten Testsignals in die beiden Empfangskanäle wird die Kalibrierung und damit die Empfindlichkeit dBZ0 des Empfangskanals geprüft und mit der gültigen Systemempfindlichkeit verglichen. Dieser Test wird oft automatisiert als Teil des Scannings durchgeführt.

### 5.4 BITE-Parameter

Alle Radarsysteme stellen kontinuierlich umfangreiche BITE-Parameterdatensätze zur Verfügung, mit denen der Zustand aller Komponenten eines Radars überwacht wird. Zum einen erlauben BITE-Werte Ereignisse im System zu identifizieren und zu bewerten. Gleichzeitig kann durch Trends in BITE-Parametern ein Problem frühzeitig erkannt und geplante vorbeugende Wartungsmaßnahmen initiiert werden, bevor es zu einem Systemausfall kommt. Beim DWD werden BITE-Daten alle 5 Minuten in die Radarbetriebszentrale übertragen und in eine Datenbank importiert. Für die webbasierte Visualisierung wird dort als Frontend *Grafana* verwendet. Standardisierte BITE-Dashboards für alle 17 Radarsysteme geben einen Überblick über den Zustand des Radarsystems.

### 5.5 Radar-Radar-Vergleich

Der Vergleich von Radarreflektivitäten verschiedener Radare in einem Erfassungsbereich mit gleicher Entfernung und Höhe wird zur Überprüfung der Datenkonsistenz der Systeme untereinander verwendet. Entsprechend der räumlichen Verteilung der Radarsysteme finden sich Bereiche, die gleichzeitig von zwei oder mehreren Radaren erfasst werden. Findet man nun im Mittel einen systematischen Unterschied, kann dies auf ein Kalibrierproblem eines Radars hinweisen.

### 5.6 Clutter-Ziel-Überwachung

Die Stabilität und Kohärenz des Radarsenders wird mithilfe von eindeutigen Festzielen, wie beispielsweise ein Fernsehturm, in der Nähe des Radars (ca. 2–40 km) überwacht (GABELLA 2018). Dabei werden die Messungen aus dem Scanning selbst verwendet oder es wird ein dezidiertes Scan durchgeführt, bei dem die Antenne direkt auf das Ziel ausgerichtet wird.

## 6 Herausforderungen

Die Qualität und die lückenlose Verfügbarkeit von Messungen werden durch eine Reihe von Herausforderungen erschwert:

Zum einen gibt es zunehmende Störungen durch Funkdienste, die im Radarfrequenzband arbeiten (SCHAPER et al. 2022). Obwohl das Wetterradar im C-Band primärer

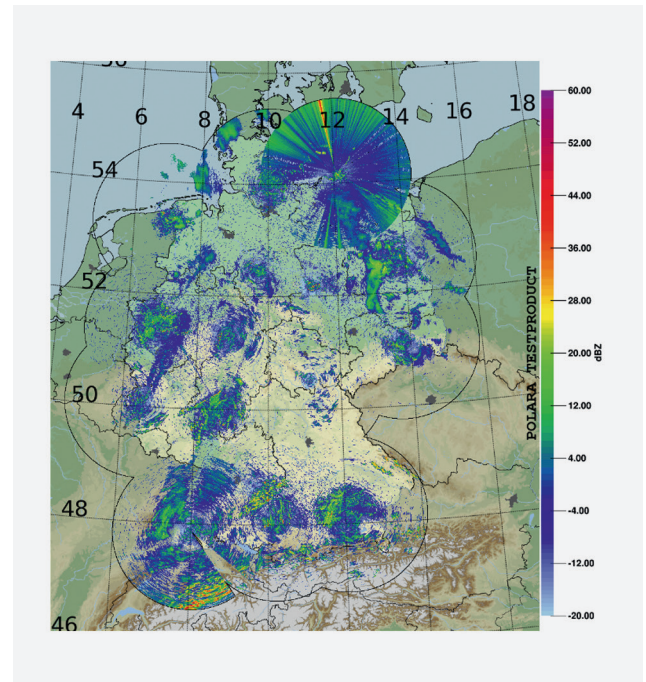


Abbildung 2-6: WLAN-Störungen in den Daten vom Radar Rostock (Beispiel vom 11.04.2017). Ursache war wahrscheinlich ein Kreuzfahrtschiff im Hafen Rostock.

Nutzer ist, dürfen WLAN-Router im 5-GHz-Band betrieben werden. Dies ist erlaubt, wenn über das DFS-Verfahren (*dynamic frequency selection*) vom Router automatisch sichergestellt wird, dass kein Radar in der Nähe sendet. Nichtkonforme und fehlerhaft betriebene Router sorgen jedoch immer wieder für signifikante Störungen, die meist zu speichenartigen Mustern führen. Abbildung 2-6 zeigt ein Beispiel für ein starkes Störereignis, das über die Radarantennen-Nebenkeulen über einen großen Azimutbereich sichtbar wird. Die Erkennung von Störern im Signalprozessor funktioniert gut, jedoch gibt es bisher keine Filtermethoden, mit denen der Störer von einem Wettersignal separiert werden kann. Für die Beseitigung der Störung ist die nationale Netzagentur (in Deutschland die BNetzA) zuständig. Das Verfahren ist jedoch sehr zeitaufwändig, da immer eine Messung durch die Frequenzbehörde für die Identifikation des Störers vor Ort notwendig ist. Daher kann es Wochen dauern, bis ein Störer eliminiert wird. Bei der AustroControl und beim DWD wurden mittlerweile WLAN-Empfänger zur Identifikation von Störern in den Radarempfänger eingebaut, um die Frequenzbehörden bei ihrer Arbeit zu unterstützen. Mit der zu erwartenden Zunahme von funkbasierten Anwendungen (insbesondere im Bereich der Automobilindustrie) ist mit zunehmenden Problemen zu rechnen, wenn nicht regulatorisch eingegriffen wird.

Ein weiteres Problem sind Störungen der Radarmessung durch Windkraftanlagen vor allem in der näheren Umgebung von Radaren (wie zum Beispiel beim Radar Ummendorf, siehe Abbildung 2-7). Filtermethoden, mit denen Störerechos aus Radarmessungen identifiziert und eliminiert



Abbildung 2-7: Radar Ummendorf (UMD) mit Windkraftanlagen im Hintergrund. Windkraftanlagen können zu Störechos führen, die bei sich drehenden Rotorblättern bisher nicht herausgefiltert werden können (Foto: B. Lange, DWD).

werden, und gleichzeitig das Wettersignal erhalten bleibt, funktionieren bei sich drehenden Rotorblättern bisher nicht. Kann eine Windkraftanlage identifiziert werden, muss das kontaminierte Radarbin verworfen werden. Dadurch entstehen insbesondere bodennah Lücken in den Radardaten (Abbildung 2-8). Bei Windparks werden diese Lücken entsprechend groß. Durch den Ausbau von regenerativen Energien ist daher mit zunehmenden Störungen zu rechnen.

### 7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die Grundprinzipien der Radartechnik und der Signalverarbeitung von Dualpolarisations-Radaren eingeführt. Diese Messtechnik ist mittlerweile in Europa zum Standard geworden. Um die Verfügbarkeit und Güte von Wetterradarmessungen zu gewährleisten, wurden mit der Einführung der Dualpolarisations-Wetterradare eine Reihe von automatisierten Monitoringverfahren entwickelt. Mit diesen Verfahren sind die Wetterdienste in der Lage, jederzeit den Zustand der Messgeräte und die Datenqualität zu überwachen. Diese Verfahren werden kontinuierlich weiterentwickelt und angepasst. Technologisch wird mit hoher Wahrscheinlichkeit in der nächsten Radargeneration der Magneton-Sender durch einen Halbleiter-Sender abgelöst werden.

Es ist unbestritten, dass Wetterradare essenzielle Messinstrumente für die Daseinsfürsorge sind. Um den Herausforderungen von Störechos zu begegnen, die die Qualität und Verfügbarkeit reduzieren, versucht man regulatorisch den Betrieb der Radare weiter abzusichern. Gleichzeitig wird weiter an innovativen Verfahren gearbeitet, die Signalverarbeitung weiter zu verbessern, um Störungen soweit wie möglich zu eliminieren. Klar ist aber auch: Verfahren, die die Qualität der Radarmessung versuchen zu verbessern, können nie die Radarmessung perfekt rekonstruieren, die man ohne eine Störung gemessen hätte. Und damit kann auch die Güte von Folgeverfahren nur so gut werden, wie es die Qualität der Eingangsdaten zulässt.

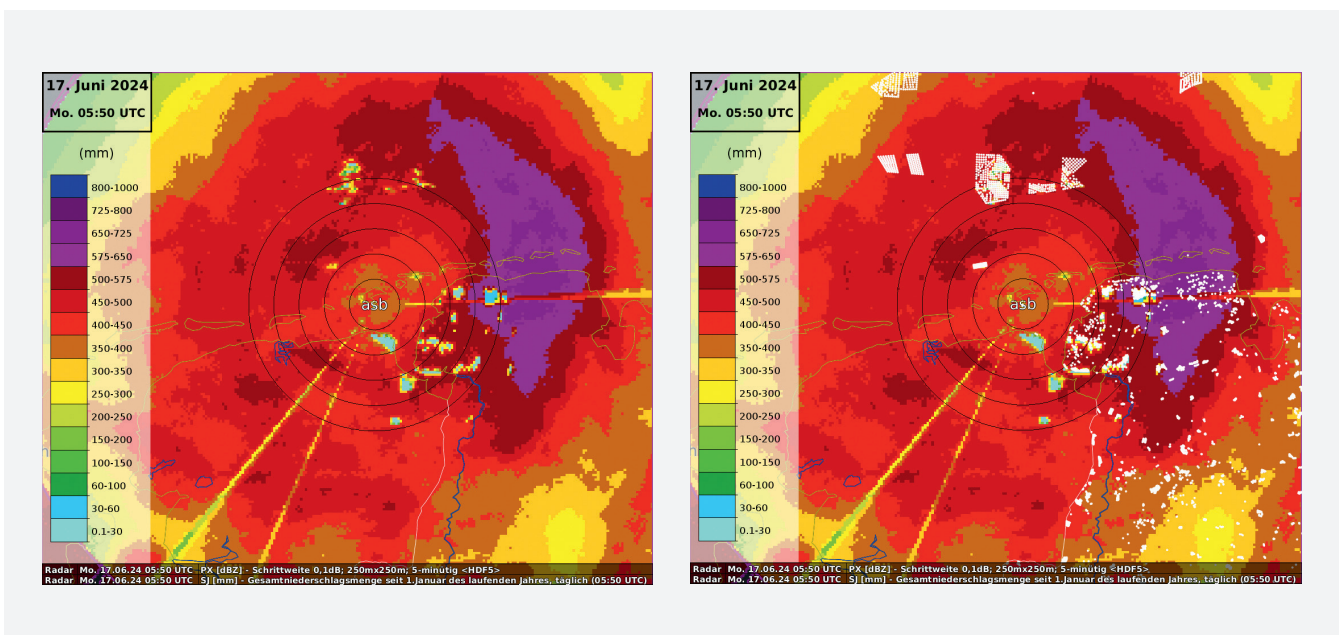


Abbildung 2-8: Beispiel des Einflusses von Windenergieanlagen auf die aus Radardaten abgeleitete Niederschlagssumme. Links: Akkumulierte bodennahe Niederschlagssumme seit Jahresbeginn (1.1.–17.6.2024, Radar Borkum). Rechts: Zusätzliche Markierung von Windparks (weiße Punkte), die mit deutlich reduzierten Niederschlagssummen im linken Bild korrespondieren. Speichen ergeben sich durch Hindernisse im Radarnahbereich, sodass der Radarstrahl teilweise blockiert wird. Windkraftanlagen in den Niederlanden sind nicht eingetragen.

## Literatur

- BRINGI, V.N., CHANDRASEKAR, V., 2001: Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. *Cambridge University Press*, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541094>.
- DOVIK, R.J., ZRNIC, D.S., 1993: Doppler Radar and Weather Observations. 2. Auflage, *Academic Press*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-221422-6.50013-9>.
- FABRY, F., 2015: Radar Meteorology: Principles and Practice. *Cambridge University Press*, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107707405>.
- FIGUERAS I VENTURA, J., BOUMAHMOUD, A.A., FRADON, B., DUPUY, P., TABARY, P., 2012: Long-term monitoring of French polarimetric radar data quality and evaluation of several polarimetric quantitative precipitation estimators in ideal conditions for operational implementation at C-band. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **138**, 2212–2228, <https://doi.org/10.1002/qj.1934>.
- FRECH, M., HUBBERT, J., 2020: Monitoring the differential reflectivity and receiver calibration of the German polarimetric weather radar network. *Atmospheric Measurement Techniques* **13**, 1051–1069, <https://doi.org/10.5194/amt-13-1051-2020>.
- FRECH, M., MAMMEN, T., LANGE, B., 2019: Pointing accuracy of an operational polarimetric weather radar. *Remote Sensing* **11**, <https://doi.org/10.3390/rs11091115>.
- FRECH, M., LANGE, B., MAMMEN, T., SELTMANN, J., MOREHEAD, C., ROWAN, J., 2013: Influence of a radome on antenna performance. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **30**, 313–324, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00033.1>.
- GABELLA, M., 2018: On the use of Bright Scatterers for monitoring doppler, dual-polarization weather radars. *Remote Sensing* **10**, <https://doi.org/10.3390/rs10071007>.
- GABELLA, M., BOSCACCI, M., SARTORI, M., GERMANN, U., 2016: Calibration accuracy of the dual-polarization receivers of the C-band swiss weather radar network. *Atmosphere* **7**, <https://doi.org/10.3390/atmos7060076>.
- GERMANN, U., BOSCACCI, M., CLEMENTI, L., GABELLA, M., HERING, A., SARTORI, M., SIDERIS, I.V., CALPINI, B., 2022: Weather Radar in Complex Orography. *Remote Sensing* **14**, <https://doi.org/10.3390/rs14030503>.
- HENGSTEBECK, T., WAPLER, K., HEIZENREDER, D., JOE, P., 2018: Radar network-based detection of mesocyclones at the German Weather Service. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **35**, 299–321, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0230.1>.
- HOLLEMAN, I., HUUSKONEN, A., KURRI, M., BEEKHUIS, H., 2010: Operational monitoring of weather radar receiving chain using the sun. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **27**, 159–166, <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1213.1>.
- HUUSKONEN, A., HOLLEMAN, I., 2007: Determining weather radar antenna pointing using signals detected from the sun at low antenna elevations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **24**, 476–483, <https://doi.org/10.1175/JTECH1978.1>.
- LOUF, V., PROTAT, A., 2023: Real-Time Monitoring of Weather Radar Network Calibration and Antenna Pointing. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **40**, 823–844, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-22-0118.1>.
- MICHELSON, D., LEWANDOWSKI, R., SZEWCZYKOWSKI, M., BEEKHUIS, H., HAASE, G., MAMMEN, T., JOHNSON, D., 2021: EUMETNET OPERA weather radar information model for implementation with the HDF5 file format Version 2.4. *EUMETNET OPERA 5 Work Package OD8*. URL: [https://www.eumetnet.eu/wp-content/uploads/2021/07/ODIM\\_H5\\_v2.4.pdf](https://www.eumetnet.eu/wp-content/uploads/2021/07/ODIM_H5_v2.4.pdf), Abruf: 27.07.2024.
- RYZHKOV, A.V., ZRNIC, D.A.S., 2019: Radar polarimetry for weather observations. *Springer International Publishing*, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05093-1>.
- SCHAPER, M., FRECH, M., MICHAELIS, D., HALD, C., ROHRDANTZ, B., 2022: Radio frequency interference detection and mitigation in the DWD C-band weather radar network. *Atmospheric Measurement Techniques* **15**, 6625–6642, <https://doi.org/10.5194/amt-15-6625-2022>.
- SELTSMANN, J.E.E., 2021: Weather Radar. In: Springer Handbook of Atmospheric Measurements. FOKEN, T. (Hrsg.), *Springer International Publishing*, 841–900, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_30).
- TAPPING, K., 2013: The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). *Space Weather* **11**, 394–406, <https://doi.org/10.1002/swe.20064>.
- WERNER, M., 2014: A New Radar Data Post-Processing Quality Control Workflow for the DWD Weather Radar Network. *Extended Abstracts, Eighth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology, Garmisch Patenkirchen, Germany, ERAD, 4.4*, URL: [http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/079\\_Werner.pdf](http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/079_Werner.pdf), Abruf: 24.07.2024.

## Kontakt

DR. MICHAEL FRECH  
Deutscher Wetterdienst  
Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg  
Albin-Schwaiger Weg 10  
82383 Hohenpeißenberg  
[michael.frech@dwd.de](mailto:michael.frech@dwd.de)

MAXIMILIAN SCHAPER  
Deutscher Wetterdienst  
Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg  
Albin-Schwaiger Weg 10  
82383 Hohenpeißenberg  
[maximilian.schaper@dwd.de](mailto:maximilian.schaper@dwd.de)

BENJAMIN ROHRDANTZ  
Deutscher Wetterdienst  
Service und Logistik Nord  
Frahmredder 95  
22393 Hamburg  
benjamin.rohrdantz@dwd.de

MARCO BOSCACCI  
Ufficio Federale Di Meteorologia e Climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz  
marco.boscacci@meteoswiss.ch

DR. MARCO HAPPENHOFER  
Austro Control GmbH  
Schnirchgasse 17  
1030 Wien  
Österreich  
marco.happenhofer@austrocontrol.at

# 3

M. MOTT, M. SCHULTZE

## Kompositerstellung und Verlagerung

### Compositing and Forecasts

#### **Zusammenfassung**

Die Nutzung eines Radar-Komposits im Gegensatz zur isolierten Nutzung der einzelnen Anteile bietet eine Reihe von Vorteilen. Statt die einzelnen Messungen gleichen Typs separat betrachten zu müssen, können durch die Kombination der Informationen sämtliche relevanten Daten auf einen Blick erfasst werden. Durch die kohärente und übersichtliche Darstellung wird es leichter, Muster, Trends und großräumige Veränderungen zu erkennen, was eine effiziente Analyse und Interpretation ermöglicht. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit, Bereiche einzelner Messungen eines Standorts durch Beiträge von anderen Standorten zu ersetzen. Hierdurch können eventuelle Lücken oder Fehler durch gestörte Daten behoben werden und somit die Qualität des Komposits verbessert werden. Die Bewegung von Niederschlagsstrukturen kann durch den Vergleich von zeitlich aufeinanderfolgenden Komposits automatisiert abgeschätzt werden. Die Vorhersage des aktuellsten Komposits erfolgt basierend auf der zuvor abgeschätzten Bewegung des Niederschlages als rein advektiver Prozess. Dynamische Prozesse wie Verstärkung und Abschwächung werden nicht berücksichtigt. Daher nimmt die Güte der Vorhersage mit zunehmender Vorhersagezeit typischerweise stark ab und ergänzt so die numerische Wettervorhersage vor allem in den ersten ein bis zwei Stunden. Die Stärke eines solchen Nowcasting-Ansatzes liegt in der schnellen Verfügbarkeit bei hoher Aktualisierungsrate. Ausgehend vom jeweils aktuellsten Analysekomposit wird so eine bruchfreie flächenhafte Vorhersage des kurzfristigen Niederschlagsgeschehens ermöglicht. Die Methoden zur Kompositerstellung und Verlagerung werden sowohl für Radarreflektivität, als auch für abgeleitete Größen wie Niederschlagstyp und Niederschlagsrate angewendet. Die erzeugten Produkte unterstützen unter anderem den Wettervorhersage- und Warndienst des DWD und werden als Eingangsdaten für die Hochwasservorhersage verwendet.

#### **Summary**

Using a radar composite as opposed to using the individual parts in isolation offers a number of advantages. Instead of having to look at several individual products or measurements separately, all relevant data can be captured at a glance by combining the information. The coherent and clear presentation makes it easier to recognize patterns, trends and large-scale changes, which enables efficient analysis and interpretation. Another important aspect is the possibility of replacing areas of individual measurements from a location with contributions from other locations. This allows any gaps or errors caused by corrupted data to be corrected, thus improving the quality of the composite. The movement of precipitation structures can be estimated automatically by comparing successive composites. The prediction of the most recent composite is based on the previously estimated movement of precipitation as a purely advective process. Dynamic processes such as amplification and weakening are not taken into account. Therefore, the quality of the forecast typically decreases strongly with increasing forecast time, thus complementing the numerical weather forecast especially in the first one to two hours. The strength of such a nowcasting approach lies in its rapid availability at a high update frequency. Starting from the most up-to-date analysis composite, a seamless areal forecast of the short-term development of precipitation is thus made possible. The methods for composite generation and displacement are applied for radar reflectivity as well as for derived variables such as precipitation type and precipitation rate. The generated products support, among others, the DWD's weather forecast and warning decision process and are used as input data for flood forecasting.

## 1 Historie, Gegenwart und Zukunft

Radarkomposits sind Produkte, die durch das Zusammenfügen von mehreren Teilen gleicher Struktur, wie z. B. Messungen der einzelnen Radarstandorte oder deren weiterverarbeitete Produkte, entstehen, um eine umfassendere und ganzheitlichere Darstellung zu ermöglichen. Die Technik der Erstellung von zusammengesetzten meteorologischen Produkten hat eine lange Geschichte und hat sich im Laufe der Zeit stetig weiterentwickelt. Bereits kurz nach den Anfängen des Motorflugs zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden erste Wolkenbilder von Hand zusammengestellt. Damals waren diese Verfahren noch recht rudimentär, aber sie legten den Grundstein für die heutige Technologie.

Erste technische Ansätze zur kurzfristigen Vorhersage von Niederschlagsfeldern werden in der Literatur bereits seit den 70er Jahren beschrieben. Zusammenhängende Radarverbünde, die eine flächige Kompositdarstellung des Niederschlags ermöglichen, gab es zu der Zeit noch nicht. Stattdessen wurden aufeinanderfolgende Bilder von einzelnen Radaren genutzt, um die Bewegung des Niederschlags abzuschätzen und damit die Verlagerung für die nächsten Stunden vorherzusagen. Trotz der sehr begrenzten Rechenkapazitäten wurden diese Verfahren teilweise bereits in Echtzeit betrieben und im Vorhersagedienst genutzt (BELLON und AUSTIN 1978). Auch wenn sich die Komplexität der Verfahren und die raumzeitliche Auflösung der Produkte im Laufe der Zeit deutlich erhöht hat, werden die damaligen Grundkonzepte bis in die Gegenwart angewendet.

Heutzutage werden Radardaten aus verschiedenen Quellen gesammelt und mithilfe von Computern zu Kompositprodukten zusammengeführt. Die Erstellung solcher Produkte hat zu bedeutenden Fortschritten in der Wettervorhersage, der Klimaforschung, der Luftfahrt und vielen anderen Bereichen geführt, da komplexe Wetterphänomene besser verstanden und prognostiziert werden können. Der Einsatz von Computern ermöglicht hierbei effiziente Berechnung wiederkehrender Aufgaben, wie beispielsweise geographische Bezüge oder physikalische Gegebenheiten.

Die enormen Fortschritte in der numerischen Wettervorhersage (NWV) gerade auch im Bereich der Niederschlagsvorhersage ermöglichen es heutzutage die Vorhersage mittels Verlagerung üblicherweise auf die ersten 2 h ab Analysezeitpunkt zu begrenzen. Die Integration von Entwicklungstendenzen mittels Methoden des maschinellen Lernens (ML) in bestehende Algorithmen sind Gegenstand aktueller Forschung (FORESTI et al. 2019). Zunehmend werden sogar vollständig auf ML basierende Systeme getestet (ZHANG et al. 2023). Viele Wetterdienste entwickeln seit einigen Jahren Verfahren zur Quantifizierung von inhärenten Vorhersageunsicherheiten im Nowcasting und der nahtlosen Kombination mit den Niederschlagsvorhersagen der NWV. Im DWD wird innerhalb des SINFONY-Projekts intensiv an dieser Thematik gearbeitet und die

operationelle Einführung der entwickelten Verfahren ist in Sichtweite. Mehr Informationen finden sich in Beitrag 1 dieses Heftes.

Ein entscheidender Faktor für die zukünftige Weiterentwicklung der Verfahren und Produkte ist die kontinuierliche Verbesserung der Rechenleistung, was neue Möglichkeiten und Potenziale eröffnet um in Zukunft noch genauere und zuverlässigere meteorologische Informationen bereitzustellen. Zum Beispiel kann damit die Auflösung verbessert oder die geographische Abdeckung vergrößert werden. Frei verfügbare Softwarebibliotheken ermöglichen zunehmend die Anwendung von Methoden des ML. Dabei werden integrierte Systeme, die verschiedenen Datenarten miteinander kombinieren und anwendungsorientierte Fragestellungen adressieren, zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen. All dies wird zu detaillierteren und umfassenderen meteorologischen Informationen führen, die bei der Bewältigung extremer Wetterereignisse auch im Kontext der Herausforderungen des Klimawandels unterstützen.

## 2 Kernkomponenten der Kompositerstellung

Die Erstellung eines Kompositprodukts folgt im Wesentlichen dem Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe-Prinzip (EVA). In diesem Beitrag wird auf die Komponenten der Ein- und Ausgabe der Daten nicht eingegangen. Die Komponente der Verarbeitung setzt sich aus mehreren Teilbereichen zusammen, wobei der Kernprozess der Kompositerstellung unabhängig von der Messgröße in die zwei Hauptphasen Wertaufhebung (*Sampling*) und Wertauswahl (*Value Retrieval*) unterteilt werden kann.

### 2.1 Projektion

Meteorologische Kompositprodukte sind eng mit einer geographischen Referenzierung verbunden. Um die dreidimensionale Oberfläche der Erde auf eine zweidimensionale Karte abzubilden, wird eine geographische Projektion verwendet. Es ist unvermeidbar, dass dabei Verzerrungen auftreten, da es nicht möglich ist, alle Aspekte (wie Winkel-, Flächen- oder Längentreue) der Erdoberfläche gleichzeitig und korrekt auf einer Karte darzustellen. Die Wahl einer bestimmten Projektion ist daher stets ein Kompromiss, um ein bestimmtes Gebiet optimal abzubilden.

Für die projizierten Radarprodukte des Deutschen Wetterdienstes wurde die polar-stereographische Projektion ausgewählt (siehe Abbildung 3-1). Diese Projektion weist geringe Verzerrungen im Bereich des wahren Maßstabs auf und ist zudem winkeltreu, also eine konforme Projektion. Dies bedeutet, dass die Winkel auf der Karte den tatsächlichen Winkeln auf der Erdoberfläche entsprechen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Projektion weder flächentreu noch längentreu ist. Das heißt, dass weder die Größe von Flächen noch die relativen Abstände zwischen zwei Punkten auf der projizierten Karte mit denen auf der Erdoberfläche übereinstimmen. Die entstehenden Verzerrungen nehmen

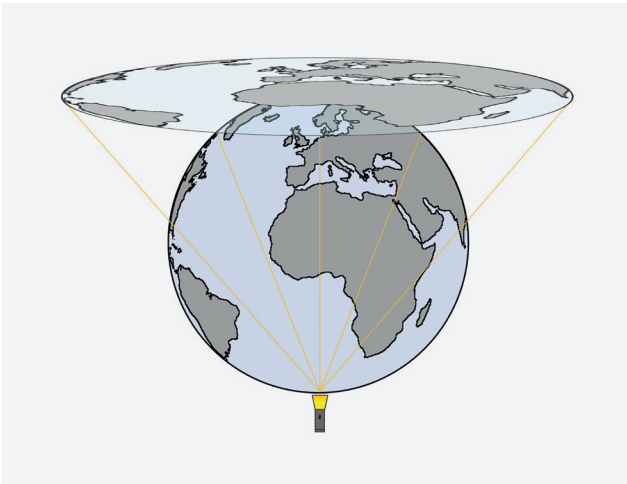


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der polar-stereographischen Projektion.

mit der Entfernung vom Punkt des wahren Maßstabs zu. Es ist wichtig, dies bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen.

Um die Verzerrungen deutlich zu machen und Missverständnisse zu vermeiden, wird bei Entfernungen in meteorologischen Kompositprodukten häufig der Zusatz „in der Projektion“ verwendet. Dies kennzeichnet, dass die gemessenen oder dargestellten Entfernungen auf der Karte nicht unmittelbar den tatsächlichen Entfernungen auf der Erdoberfläche entsprechen, sondern eine Abbildung der Projektion sind.

Obwohl es möglich ist, die erforderlichen Methoden zur Projektion selbst zu implementieren, bietet sich die Nutzung einer bereits verfügbaren Softwarebibliothek (*Application Programming Interfaces*, API) an, die unter freizügigen Lizenzmodellen wie z.B. der MIT-Lizenz verfügbar ist. Hierdurch können Kosten eingespart werden und die Vorteile, die durch kollaborative Entwicklung entstehen (wie die schnelle Fehlerbehebung und Implementierung neuer Funktionen im Kontext einer kontinuierlichen Weiterentwicklung) im eigenen Projekt genutzt werden. Dies spart nicht nur Entwicklungszeit, sondern auch Ressourcen. Darüber hinaus haben diese Bibliotheken oft eine breite Benutzerbasis, was zu einem intensiven Austausch von Wissen, Erfahrungen und Verbesserungen führt. Eine bekannte Bibliothek in diesem Zusammenhang ist PROJ (PROJ Contributors 2024), die zum Beispiel in QGIS (QGIS Contributors 2022) verwendet wird.

## 2.2 Erdmodell

Das Erdmodell, das für die Projektion verwendet wird, basiert auf dem WGS84-Ellipsoid. WGS steht für das *World Geodetic System*, das im Jahr 1984 von der amerikanischen *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA) und der *Defense Mapping Agency* (DMA) entwickelt wurde. Das Ziel war es, ein Referenzellipsoid zu schaffen, welches der

tatsächlichen Form der Erde so nahe wie möglich kommt. Hierzu wurde der Polradius im Vergleich zum Äquatorradius geringfügig kleiner gewählt um dadurch eine leicht abgeflachte Form des Ellipsoiden zu erreichen.

Zum Einsatz kommt WGS84 in vielen verschiedenen geodätischen Mess- und Berechnungssystemen, zum Beispiel in der Luftfahrt, bei Landvermessungen sowie beim *Global Positioning System* (GPS) und gewährleistet als einheitliche Referenz in verschiedenen Anwendungen eine konsistente und präzise geodätische Datenerfassung und -verarbeitung.

## 2.3 Geographisches Raster

Unter Zuhilfenahme eines Erdmodells und einer Projektion ist es möglich, ein Gebiet der Erde in ein Raster aufzuteilen. Das Raster bestimmt die Auflösung und somit die Anzahl der verwendeten Pixel. Die Wahl der Auflösung eines Kompositprodukts hängt von verschiedenen Faktoren ab. Eine höhere Auflösung bis hin zur Auflösung der Eingangsdaten ermöglicht eine detailliertere Darstellung und Genauigkeit, was besonders bei der Analyse von kleinen und lokalen Wetterphänomenen von Vorteil ist. Der somit entstehende Wunsch nach durchweg hohen Auflösungen erfordert allerdings auch eine höhere Rechenleistung und gleichzeitig mehr Speicherplatz, sowohl bei der Erzeugung der Produkte wie auch bei der weiteren Verarbeitung in nachgelagerten Systemen. Daher ist es wichtig, die erforderlichen Ressourcen und die spezifischen Anforderungen des Anwendungsbereichs abzuwägen.

Derzeit gibt es für Radarkompositprodukte des Deutschen Wetterdienstes mehrere definierte Gebiete, wobei im Weiteren nur auf ein nationales und ein internationales Gebiet eingegangen wird (siehe Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: Das für Radarkompositprodukte definierte nationale Gebiet (roter Rahmen), eingebettet im internationalen Gebiet.

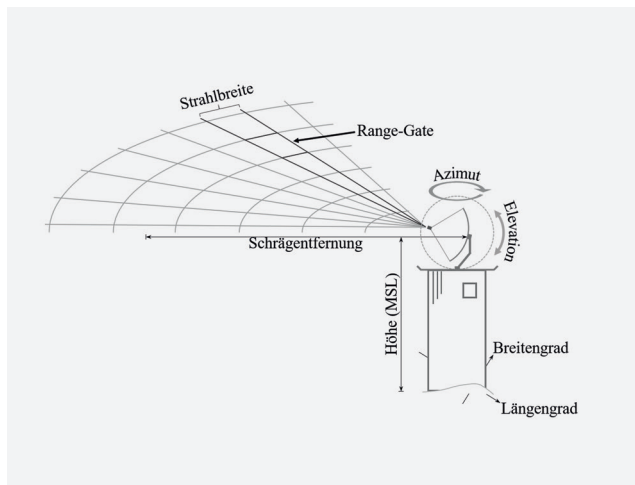


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Radarscans mit Eingangs- und Metadaten.

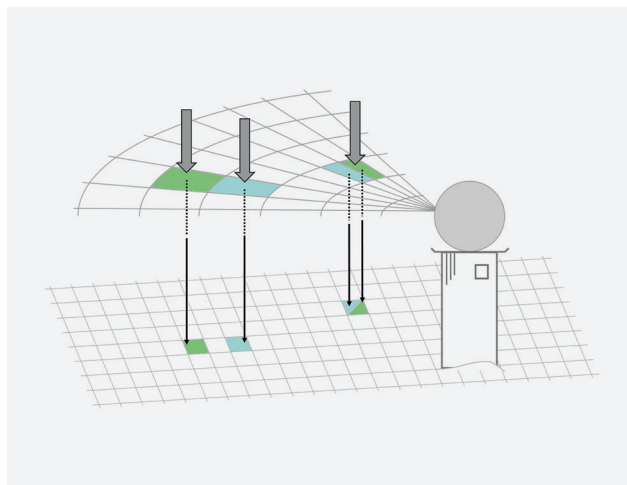


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des *Push-Samplings*, bei dem die Eingangsdaten auf das Zielgitter „gedrückt“ werden.

Das nationale Gebiet wird in den Auflösungen 250 m x 250 m und 1 km x 1 km angeboten, während für das internationale Gebiet ausschließlich die Auflösung 1 km x 1 km verfügbar ist. Bei der Definition der Gebiete wurde darauf geachtet, dass die Ecken der zugrundeliegenden Pixel übereinander liegen. Dadurch ist es möglich, Pixel oder Vielfache von Pixeln direkt miteinander zu vergleichen, ohne den Umweg über eine inverse Projektion, also geographische Koordinaten, nehmen zu müssen. Dies erleichtert den Vergleich und spart sowohl Rechenressourcen als auch Zeit.

## 2.4 Eingangsdaten

Wenn im weiteren Verlauf von „Eingangsdaten“ gesprochen wird, handelt es sich um die Messdaten der Radarstandorte bzw. der daraus abgeleiteten Produkte.

Die Messwerte werden zusammen mit Angaben zu Elevation, Azimut, Schrägentfernung und Zeit abgelegt. Die erfassten Daten werden mit Informationen zum Radarstandort wie zum Beispiel geographische Koordinate, Höhe der Antennenmitte über dem Meeresspiegel (MSL) und Strahlbreiten angereichert. In Abbildung 3-3 ist ein solcher Scan schematisch dargestellt.

Hinsichtlich der aufgezeichneten Messwerte gibt es zusätzlich spezielle Werte, die Zustände beschreiben. Hier sind die Zustände *No-Echo* und *No-Data* zu nennen. Der Zustand *No-Echo* bedeutet, dass an dieser Stelle zwar gemessen wurde aber die Messung unterhalb des abtastbaren Wertebereichs lag. Dagegen zeigt *No-Data* an, dass an der betroffenen Stelle nicht gemessen wurde.

## 2.5 Sampling

Das *Sampling* überträgt die Eingangsdaten, die in polaren Koordinaten vorliegen (also Winkel und Schrägentfernung relativ zum Radarstandort) in das Zielraster. Davon ausgenommen sind nur die *Range-Gates*, die eine *No-Data-*

Markierung aufweisen. Übertragen werden nicht nur die eigentlichen Nutzdaten, sondern auch zusätzliche Metadaten zum Radarstandort, die für die spätere Auswertungen notwendig oder hilfreich sind.

Die Wahl der Methode, mit der das *Sampling* angewendet wird, hängt von der Perspektive ab, aus der die Daten übertragen werden. Es gibt drei unterschiedliche Methoden, die sich in diesem Aspekt unterscheiden. Unabhängig von der gewählten Methode haben sie jedoch gemeinsam, dass der Datenwert eines *Range-Gates* als repräsentativ für sein Volumen betrachtet wird und keine exakte Abbildung der geometrischen Form erfolgt. Diese Vereinfachung reduziert den Aufwand der Berechnungen bei der Übertragung der Daten in das Zielraster erheblich bei gleichzeitig geringen Genauigkeitseinbußen.

### 2.5.1 Push-Sampling

Das *Push-Sampling* (dargestellt in Abbildung 3-4) ist die älteste Methode, bei der von den Eingangsdaten ausgegangen wird und diese in das Zielraster übertragen („gedrückt“) werden. Das Verfahren hat den Vorteil, dass es sehr einfach zu implementieren ist und die Anzahl der Rechenoperationen direkt von der Anzahl der Datenpunkte in den Eingangsdaten abhängt. Für jeden Mittelpunkt eines *Range-Gates* der Eingangsdaten wird das Pixel im Zielraster ermittelt und die Information dahin übertragen.

Es wird für jeden Strahl und jedes *Range-Gate* der Eingangsdaten unter Berücksichtigung des Azimuts, der Elevation, der Schrägentfernung und der Antennenhöhe der Abstand des auf die Erdoberfläche gefällten *Range-Gates* zum Radarstandort bestimmt. Dieser Abstand wird unter Berücksichtigung der geographischen Koordinaten des Radarstandorts verwendet um die geographische Koordinate des *Range-Gates* zu berechnen. Für diese Koordinate wird dann Zeile und Spalte im Raster berechnet und der Wert des *Range-Gates* an diese Stelle übertragen.

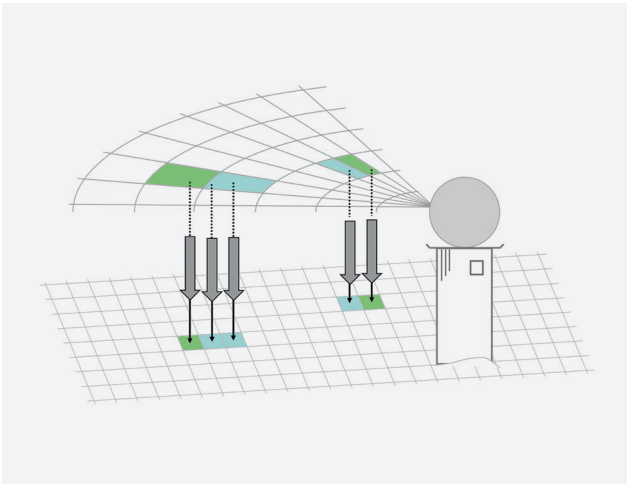


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des *Pull-Samplings*, bei dem die Eingangsdaten auf das Zielgitter „gezogen“ werden.

Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass nicht alle Pixel im Zielraster belegt werden. Insbesondere in größerer Entfernung vom Radar wird ein *Range-Gate* nur genau einem Pixel im Zielraster zugewiesen, wodurch Pixel im Zwischenbereich unbelegt bleiben. Dieser Nachteil kann durch nachträgliche Interpolationsverfahren oder andere *Postprocessing*-Techniken gemildert werden, um eine glattere und kontinuierlichere Darstellung zu erzielen. Im Gegensatz dazu werden je nach Auflösung des Zielrasters nahe am Radar mehrere *Range-Gates* einem einzelnen Pixel zugewiesen. Die dadurch vorhandene höhere Informationsdichte kann in der weiteren Verarbeitung genutzt werden.

### 2.5.2 Pull-Sampling

Das *Pull-Sampling* (dargestellt in Abbildung 3-5) arbeitet aus der Perspektive des Zielgitters und überträgt („zieht“) die Eingangsdaten auf dieses. Dazu wird zunächst der Bereich der Eingangsdaten im Zielgitter berechnet und anschließend nur auf diesem Ausschnitt gearbeitet.

Für jedes Pixel des Ausschnitts wird dessen geographische Koordinate ermittelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Mittelpunkt des Pixels repräsentativ für dessen Fläche ist. Die geographische Koordinate des Pixels wird anschließend in Bezug zum Radarstandort gesetzt und damit die Entfernung und der Winkel auf der Erdoberfläche berechnet. Anschließend wird aus den Eingangsdaten der Strahl ausgewählt, der am besten zu dem zuvor ermittelten Winkel passt (*Nearest-Neighbor-Mapping*). Mit der Entfernung auf der Erdoberfläche und der Elevation des Strahls kann die Schrägentfernung und somit das *Range-Gate* bestimmt werden, dessen Wert anschließend in das Raster übertragen wird.

Das *Pull-Sampling* ist ein füllendes Verfahren. Alle Pixel im Ausschnitt werden garantiert mit einem Wert belegt, sofern die entsprechenden *Range-Gates* in den Eingangsdaten

keine *No-Data*-Markierung aufweisen. Die füllende Eigenschaft ist in größerer Entfernung vom Radar von Vorteil. Allerdings geht die nahe am Radar verfügbare hohe Informationsdichte verloren, da auch dort einem Pixel nur genau ein *Range-Gate* zugewiesen wird. Die Anzahl der Rechenoperationen dieses Verfahrens hängt direkt von der Auflösung des Zielgitters ab.

### 2.5.3 Push-Pull-Sampling

Das *Push-Pull-Sampling* ist eine Weiterentwicklung und kombiniert die Vorzüge beider zuvor genannten Verfahren. Es wird zunächst das *Push-Sampling* ausgeführt und dabei protokolliert welche Pixel im Raster den Wert eines *Range-Gates* zugewiesen bekommen haben. Im Anschluss daran findet ein *Pull-Sampling* statt, welches nur für jene Pixel ausgeführt wird, die zuvor keinen Wert zugewiesen bekommen haben. Somit bleibt die nahe am Radar verfügbare hohe Informationsdichte erhalten bei gleichzeitiger Füllung der Pixel in größerer Entfernung vom Radar. Von Nachteil ist der höhere Rechenaufwand und die damit verbundene längere Rechenzeit sowie die größere Menge an Speicher, die durch die Kontrollstrukturen benötigt wird.

## 2.6 Werteauswahl

Nachdem alle Eingangsdaten auf das Raster übertragen wurden, kann es vorkommen, dass für ein Pixel mehr als ein Wert vorliegt. Dies ist häufig im Überlappungsbereich des Radarverbunds der Fall, sobald mehrere Eingangsdaten (z. B. verschiedene Elevationen) eines Radars verarbeitet wurden oder das verwendete *Sampling* (z. B. *Push* oder *Push-Pull*) nahe am Radar mehrere *Range-Gates* einem Pixel zugeordnet hat.

Die für ein Pixel zur Verfügung stehenden Werte liegen nach dem *Sampling* zunächst gleichberechtigt vor und unterliegen keiner Sortierung. Ihre Position im Speicher wird nur durch die zeitliche Abfolge des Dateneingangs bzw. der Verarbeitung festgelegt. In Abbildung 3-6 ist die Werteauswahl der Maximum-Methode exemplarisch dargestellt. Neben den Reflektivitätswerten stehen weitere statische Metadaten zum Radarstandort wie geographische Position und Höhe der Antennenmitte als auch dynamische aus der Messung stammende Informationen wie Elevationswinkel und Azimut zur Verfügung. Durch geodätische Berechnung lassen sich daraus weitere Informationen wie beispielsweise die Höhe des Datenwerts über Meereshöhe ableiten.

Damit die Auswahl nicht von der Reihenfolge der Einbringung abhängt und deterministisch ist, gibt es für solche Fälle mehrere konfigurierbare Möglichkeiten, die sich nach dem Einsatzzweck des Komposits richten.

In Abbildung 3-7 wurden die Niederschlagsmessungen eines Zeitschnitts des gesamten DWD-Radarverbunds mit seinen 17 Radarstandorten mittels des *Pull-Samplings* verarbeitet. Die Anzahl der für ein Pixel verfügbaren Werte wurde farblich kodiert und so sind Bereiche mit keiner, einer

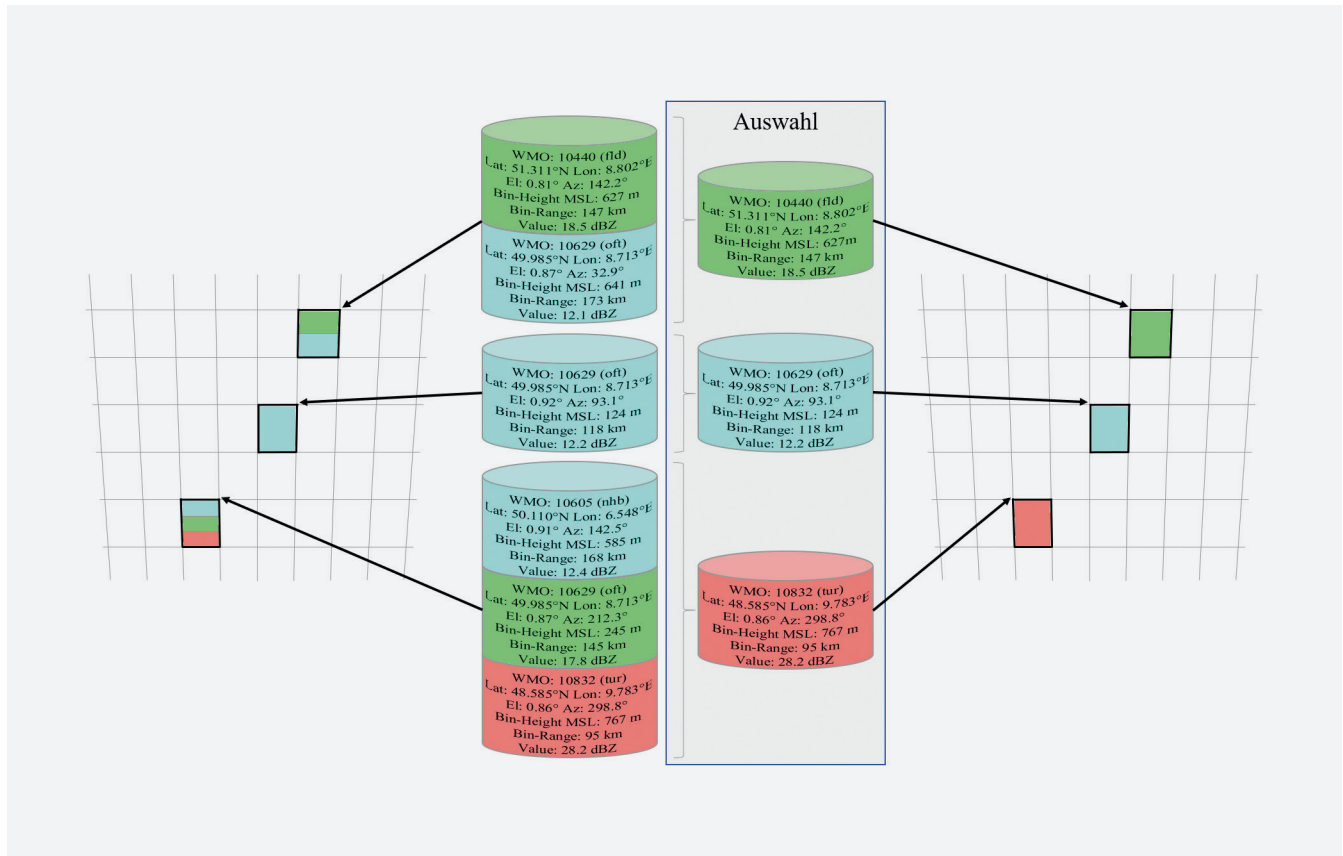


Abbildung 3-6: Exemplarische Darstellung der Werteauswahl, hier für die Maximum-Methode.

oder mehrfacher Überlappung zu erkennen. Exemplarisch sei hier die Maximum- und die Qualitätsmethode erklärt.

### 2.6.1 Maximum-Methode

Die Maximum-Methode wird verwendet, um unter mehreren Beiträgen denjenigen auszuwählen, der den höchsten Datenwert aufweist. Dies ist zum Beispiel dann von Interesse, wenn aus meteorologischer Sicht besser etwas mehr als zu wenig gewarnt werden soll. Das Verfahren hat neben einem vergleichsweise niedrigen Aufwand bei der Rechenleistung den Nachteil, dass Störungen in den Eingangsdaten, die üblicherweise höhere Intensitäten aufweisen, hervorgehoben werden.

### 2.6.2 Qualitätsmethode

Die Qualitätsmethode kommt zum Einsatz, wenn für die Beiträge neben deren Wert auch Qualitätsinformationen (z.B. ein Qualitätsindex aus einer Vorprozessierung, Höhe oder Entfernung des Messwerts in Bezug zum Radarstandort) vorhanden sind. Eine solche Vorprozessierung markiert gestörte Radarbeiträge (z.B. Speichen- und/oder Ringartefakte) und nimmt damit einen direkten Einfluss auf die spätere Werteauswahl, die mehrstufig ausgeführt sein kann. In erster Instanz wird beispielsweise der Datenwert mit der höchsten Qualität ausgewählt. Gibt es mehrere Datenwerte mit gleich hoher Qualität, kann dann zum

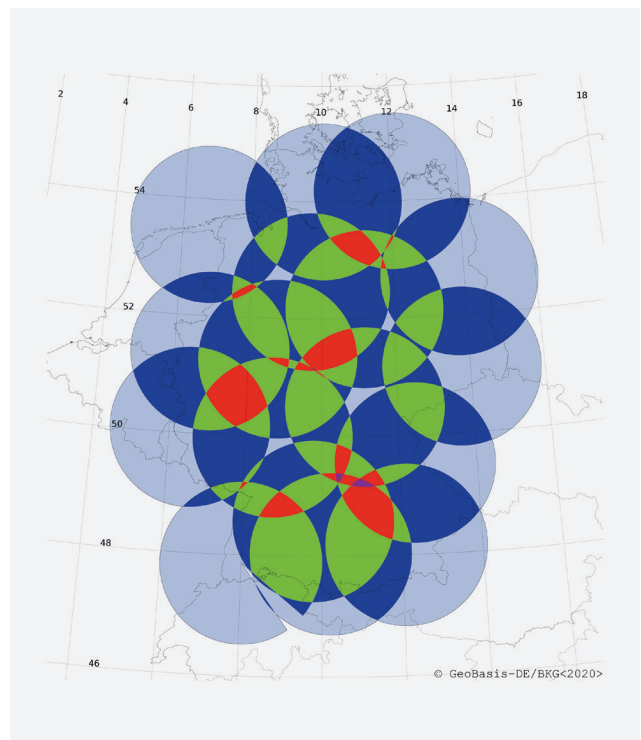


Abbildung 3-7: Überlappungsbereiche der 17 Niederschlags-scans im Radarverbund mittels der Pull-Samplings. Die Farben zeigen die für ein Pixel verfügbaren Werte (von hellblau – keine Überlappung, über dunkelblau und grün mit zwei bzw. drei Überlappungen bis rot und lila mit vier- bzw. fünffacher Überlappung).

Beispiel der Datenwert ausgewählt werden, der aus einer niedrigeren Höhe stammt. Sollten sich auch hier mehrere Datenwerte finden, kann das Verfahren entsprechend erweitert werden.

### 3 Verlagerung

Die denkbar einfachste Vorhersage liegt in der Persistenzvorhersage. Hierbei wird angenommen, dass die aktuelle Beobachtung auch zukünftig für einen gewissen Zeitraum gilt. Während dieser Ansatz in einigen Bereichen solide Ergebnisse erzielt, ist eine solche Vorhersage aufgrund der hohen zeitlichen Variabilität für Niederschlag nur auf extrem kurzen Zeitskalen sinnvoll.

Für die beobachtungsbasierte kurzfristige Vorhersage von Niederschlag wird daher weltweit seit Jahrzehnten auf das Konzept der sogenannten Lagrangeschen Persistenz zurückgegriffen. Dabei ändert sich die Intensität des Niederschlags zwar lokal, bleibt aber entlang der vorhergesagten Trajektorie konstant. Niederschlagsgebiete werden also lediglich advehiert, sodass in diesem Zusammenhang auch häufig der Begriff „Verlagerung“ verwendet wird. Dynamische Prozesse wie Verstärkung und Abschwächung werden in diesem Verfahren nicht berücksichtigt, sodass die Güte der Vorhersage mit zunehmender Vorhersagezeit rasch abnimmt. Typischerweise lassen sich dabei Niederschlagsstrukturen großer räumlicher Skala, wie sie zum Beispiel im Bereich von Fronten auftreten, besser vorher-sagen als kleinräumige Strukturen wie konvektive Zellen. Dieses Wissen um die skalenabhängige Vorhersagbarkeit (GERMANN und ZAWADZKI 2002) wird im SINFONY-Projekt genutzt, um Unsicherheiten der Vorhersage abzuschätzen. Details hierzu finden sich in Beitrag 1 (Abschnitt 5.1) in diesem Heft.

In der operationellen Produktionskette des DWD werden derzeit Vorhersagen für Komposits der Radarreflektivität, der Niederschlagsart und der Niederschlagsrate mittels Verlagerung erzeugt. Der Vorhersagehorizont umfasst dabei einen Zeitraum von 2 h und eine Aktualisierung erfolgt hierbei für jedes neue Komposit entsprechend des Radarscanzyklus alle 5 min. Die Prozedur der Verlagerung kann in die zwei aufeinanderfolgenden Schritte der Bewegungsschätzung und der Advektion unterteilt werden.

#### 3.1 Bewegungsschätzung

Ziel der Bewegungsschätzung ist die Bestimmung eines 2-dimensionalen Bewegungsvektors an jedem Pixel des Komposits. Dieses sogenannte Flussfeld soll die aktuelle Bewegung von Niederschlagsstrukturen bestmöglich beschreiben. In der Literatur werden diverse Ansätze beschrieben und wir können an dieser Stelle nur einen kurzen Überblick geben und auf die im DWD verwendeten Methoden eingehen. Eine erweiterte Übersicht mit weiterführenden Literaturhinweisen geben zum Beispiel AYZEL et al. (2019).

Ein möglicher Ansatz sind korrelationsbasierte Methoden. Solche Ansätze sind schon lange im Einsatz und wurden früher auch im DWD genutzt. Hierbei werden typischerweise Teilausschnitte des Komposits um einen zentralen Pixel betrachtet. Die Daten in einem Teilausschnitt werden dann verglichen mit jenen Daten, die im folgenden Zeitschritt in dem um einen bestimmten Vektor verschobenen Teilausschnitt vorliegen. Es werden unterschiedliche Verschiebevektoren ausprobiert und der Vektor, beim dem zwischen den Teilausschnitten die größte Korrelation oder die größte Übereinstimmung eines anderen Vergleichskriteriums vorliegt, wird als der Bewegungsvektor des Pixels angesehen. Auf diese Weise wird für jedes Pixel innerhalb des Komposits ein Bewegungsvektor bestimmt.

#### 3.1.1 Optischer Fluss

Heutzutage basieren viele Verfahren zur Bewegungsschätzung auf einer Technik, die als „Optischer Fluss“ bezeichnet wird und ihren Ursprung in der Bild- bzw. Videoanalyse hat. Ursprünglich wurde der Begriff „Optischer Fluss“ für die scheinbare Bewegung von Objekten aus Sicht eines sich bewegenden Beobachters bzw. einer sich bewegenden Kamera verwendet. Inzwischen wird Optischer Fluss häufig als Oberbegriff für eine Gruppe von Algorithmen angesehen, die Bewegungen aus der Abfolge von Bildsequenzen ableiten. Im Alltag werden diese Verfahren zum Beispiel in Fahrassistenzsystemen von Fahrzeugen, wie Spurhalteassistenten, eingesetzt.

Die Grundannahme fast aller Verfahren zur Bestimmung des Optischen Flusses ist die sogenannte Konstanz der Helligkeit. Diese besagt, dass Unterschiede in der zeitlichen Abfolge von Bildern rein als räumliche Verschiebung betrachtet werden können, und keine sonstigen Änderungen der Helligkeit auftreten. Die entsprechende Gleichung (*optical flow constraint equation*) hat mit dem 2-dimensionalen Optischen Fluss zwei Unbekannte und kann daher nicht direkt gelöst werden. Lediglich die Komponente des Optischen Flusses in Richtung des lokalen Intensitätsgradienten kann bestimmt werden, was als „Aperturproblem“ bezeichnet wird. Die vollständige Bestimmung des Optischen Flusses erfordert daher Zusatzbedingungen. Hierfür wurden in den letzten Jahrzehnten diverse Verfahren entwickelt.

Diese Verfahren lassen sich unter anderem in *Sparse-* und *Dense-*Methoden einteilen. Die Methoden der ersten Gruppe konzentrieren sich auf die Berechnung der Bewegung an ausgewählten Punkten im Bild. *Sparse-*Methoden benötigen vergleichsweise wenig Rechenleistung, da nur eine begrenzte Anzahl von ausgewählten Punkten verfolgt wird. Dies macht sie ideal für Szenarien, in denen nur bestimmte Merkmale von Interesse sind, wie zum Beispiel die Bewegung von Fahrzeugen. Ein Beispiel für eine *Sparse-*Methode ist das Verfahren nach LUCAS und KANADE (1981). Im Gegensatz dazu bieten *Dense-*Methoden eine detailliertere Analyse, da die Bewegung für jedes Pixel im Bild berechnet wird. Diese Ansätze eignen sich daher gut

für Anwendungen, die eine flächige Bewegungsanalyse erfordern, wie zum Beispiel die Schätzung der Bewegung aus aufeinanderfolgenden Radarkompositen.

Ein bekannter Ansatz aus der Gruppe der *Dense*-Methoden ist das Verfahren nach HORN und SCHUNCK (1981). Neben der grundlegenden Annahme über die Konstanz der Helligkeit wird vorausgesetzt, dass der Optische Fluss, der die Bewegung von Pixeln zwischen zwei Bildern beschreibt, eine gewisse Glattheit aufweist. Dies hilft, Rauschen zu reduzieren und eine konsistente Schätzung der Bewegung zu gewährleisten. Mathematisch wird der Ansatz als globale Kostenfunktion formuliert, bei dem beide genannten Annahmen jeweils als ein Term berücksichtigt werden. Der Term, der die Glattheit des Optischen Flusses beschreibt, wird zumeist als Regularisierungsterm bezeichnet. Die Gewichtung dieses Terms stellt einen *Trade-off* zwischen der Datenanpassung und der Glattheit des Bewegungsfeldes dar. Gesucht wird das Bewegungsfeld, welches das Minimum der oben genannten globalen Kostenfunktion darstellt. Dies wird mithilfe eines iterativen Verfahrens numerisch bestimmt. Im DWD verwenden wir eine weiterentwickelte Form des originalen Ansatzes nach ZACH et al. (2007) und SÁNCHEZ et al. (2013), der unter anderem durch eine modifizierte Formulierung des Regularisierungsterms gekennzeichnet ist. Dieser Algorithmus erhält unter anderem Diskontinuitäten im Bewegungsfeld, ist weniger sensitiv auf Rauschen in den Eingangsdaten und ermöglicht außerdem die Anwendung eines performanten numerischen Schemas.

Die beschriebenen Methoden zur Bestimmung des Optischen Flusses sind unter anderem in der Open-Source Softwarebibliothek OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) verfügbar. Diese enthält eine Vielzahl von Funktionalitäten aus dem Bereich der Computer-Vision und Bildverarbeitung und ermöglicht eine effiziente operationelle Nutzung.

### 3.1.2 Postprozessierung

Die grundsätzliche Annahme der Konstanz der Helligkeit gilt bei der Schätzung der Bewegung nicht in allen Fällen. Zwei typische Beispiele hierfür sind das Verdecken eines Objekts im darauffolgenden Bild durch ein anderes Objekt und das Erscheinen beziehungsweise Verschwinden von Objekten am Bildrand. Im Falle von Radarkompositen ist das zum Beispiel Niederschlag, der in den Abdeckungsbereich des Radarverbundes hinein- beziehungsweise hinauszieht. Die Bewegungsschätzung in diesen Bereichen kann hierdurch negativ beeinflusst werden. Anders als in der klassischen Bildverarbeitung, wo sich Objekte im Bild bewegen aber ihr Erscheinungsbild unverändert bleibt, verändern sich Niederschlagsgebiete zwischen aufeinanderfolgenden Radarmessungen. Dieser Aspekt wird berücksichtigt, indem bei der Bewegungsschätzung der Regularisierungsterm stärker gewichtet wird. Insbesondere bei sich schnell verändernden Niederschlagsstrukturen, zum Beispiel bei Konvektion, können dennoch Artefakte im

Bewegungsfeld entstehen. Die Postprozessierung umfasst daher die Schritte der automatischen Erkennung von Pixeln mit unzuverlässiger Bewegungsinformation und das Ersetzen dieser mit plausiblen Werten.

Die Erkennung umfasst sowohl statische, als auch dynamische Kriterien. Die Bewegung für Pixel im Komposit außerhalb der Radarabdeckung, im Übergangsbereich und innerhalb der Radarabdeckung, wo aber kein Niederschlag detektiert wurde, wird pauschal als unzuverlässig eingestuft. Bei der zweifachen Anwendung des Verfahrens zur Bestimmung des Optischen Flusses, in chronologischer und umgekehrter Reihenfolge der eingehenden Radarkompositen, sollte die Addition der für jedes Pixel geschätzten Bewegungsvektoren näherungsweise Null ergeben. Wird hier an einem Pixel ein fest definierter Wert überschritten, so wird auch die Bewegung an diesem Pixel mit Niederschlag als unzuverlässig markiert.

Das Ersetzen von unzuverlässigen Bewegungsinformationen erfolgt mittels eines räumlichen Interpolationsverfahrens. Um eine geringe Rechenzeit zu ermöglichen, greifen wir hier auf das vergleichsweise einfache, aber für diesen Anwendungsfall hinreichend genaue Verfahren der „Inversen Distanzgewichtung“ zurück. Hierbei wird für jedes betroffene Pixel der Bewegungsvektor als gewichtetes Mittel von verlässlichen Bewegungsvektoren in der Umgebung bestimmt. Dieser Ansatz ermöglicht es, auch in Gebieten abseits von Niederschlag räumlich konsistente Bewegungsfelder zu schätzen. Mit zunehmendem Abstand zum Niederschlag wird diese interpolierte Bewegung glatter und geht immer mehr in die räumlich gemittelte Bewegung über. Als Erweiterung, insbesondere für das internationale Gebiet (siehe Abschnitt 2.3), wird auch die Kombination mit abgeleiteten Bewegungsinformationen aus Satellitendaten getestet, aber an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Um eine robuste Schätzung der Bewegung im Sinne einer guten räumlichen und zeitlichen Repräsentativität zu ermöglichen, wird vor der Advektion nochmals eine Glättung des Bewegungsfeldes vorgenommen. Hierfür werden die bis hierher bestimmten Bewegungsfelder der letzten Zeitschritte herangezogen und für jedes Pixel gemittelt. Abschließend werden die Bewegungsfelder räumlich gemittelt. Dadurch werden einerseits zwar lokale Bewegungen reduziert, andererseits können dadurch Artefakte während der Advektion verhindert werden. Niederschlag, der sich durch ein von der mittleren Bewegung abweichendes Verhalten auszeichnet, wie beispielweise ausscherende Superzellen oder quasi-stationäre Strukturen, lassen sich mit dieser Vorgehensweise nicht adäquat in ihrer Bewegung vorhersagen. Hier sind objektbasierte Ansätze (siehe auch Beitrag 6 in diesem Heft) deutlich besser geeignet.

### 3.2 Advektion

Ausgangspunkt für die Advektion ist das zuvor bestimmte Feld der Bewegungsvektoren. Im Allgemeinen bleibt dieses während der gesamten Vorhersage konstant. Die Wahl des

Advektionsschemas sollte sich an den spezifischen Anforderungen, zum Beispiel in Bezug auf Rechenzeit, aber auch an den Charakteristika des Anwendungsgebietes orientieren. Das wichtigste Kriterium hierbei ist, dass Form und Intensität von beobachteten Niederschlagsstrukturen während der Verlagerung möglichst gut erhalten bleiben und keine Deformationen oder Artefakte auftreten. Eine gute Übersicht über die gängigsten Methoden und die entsprechenden Vor- und Nachteile geben zum Beispiel GERMANN und ZAWADZKI (2002). Wir beschränken uns an dieser Stelle auf eine Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte.

Grundsätzlich kann bei der Advektion zwischen Vorwärts- und Rückwärtsschema unterschieden werden. Bei einem Vorwärtsschema wird der Wert eines Startpixels stromabwärts verlagert und einem Zielpixel zugeordnet (*Push*). Im Gegensatz dazu wird beim Rückwärtsschema für ein Zielpixel das stromaufwärts liegende Startpixel bestimmt und dessen Wert übernommen (*Pull*). Typischerweise wird bei beiden Ansätzen nicht der Mittelpunkt eines Pixels direkt getroffen, sodass eine entsprechende Zuordnung auf ein oder mehrere Pixel erforderlich ist. Anders als beim Rückwärtsschema, bei dem per Definition für jedes Zielpixel ein Wert bestimmt wird, ist dies beim Vorwärtsschema bei divergenten Bewegungsvektoren nicht immer der Fall. Hier können Pixel unbelegt bleiben, die dann mit Informationen aus der Umgebung explizit interpoliert werden müssen. Beim Rückwärtsschema findet in solchen Situationen automatisch eine implizite Interpolation statt. Beide Formen der Interpolation führen im Verlauf zu einer zunehmenden Glättung der Vorhersage und daher zu einer gewissen Reduktion von kleinräumigen Strukturen. Diese Form der numerischen Diffusion ist bei Vorhersagen bis +2 h vergleichsweise gering und geht in der allgemeinen Vorhersageunsicherheit unter.

Für das Vorwärts- und Rückwärtsschema lassen sich wiederum zwei verschiedene Formen von Advektionsschritten definieren. Beim ersten Ansatz wird mit einem konstanten Verlagerungsvektor gearbeitet. Dieser wird aus dem Bewegungsvektor am Startpixel (Vorwärtsschema) beziehungsweise Zielpixel (Rückwärtsschema) bestimmt und für den aktuellen Vorhersageschritt entsprechend skaliert. Beim Rückwärtsschema findet hier zusätzlich eine 180°-Drehung des Bewegungsvektors statt. Die zeitlich aufeinanderfolgenden Vorhersageschritte sind verfahrenstechnisch also unabhängig voneinander, da immer am selben Ausgangspunkt gestartet wird. Durch die Verwendung eines konstanten Verlagerungsvektors, der lediglich entsprechend des Vorhersageschritts skaliert wird, können Rotationen in der Vorhersage nicht abgebildet werden. Dies wird durch das Semi-Lagrangesche-Schema als zweiten Ansatz ermöglicht. Hierbei wird die Trajektorie eines Pixels iterativ für jeden Vorhersageschritt bestimmt, indem den Stromlinien entweder stromabwärts (Vorwärtsschema) beziehungsweise stromaufwärts (Rückwärtsschema) gefolgt wird.

Im DWD verwenden wir in der operationellen Prozesskette derzeit ein Vorwärtsschema mit konstantem Verlagerungs-

vektor. Das Hauptargument für ein solches Setup liegt darin, dass nur in diesem der vier vorgestellten Modi für die Vorhersage der Bewegungsvektor am Ort des Niederschlags verwendet wird und damit maßgeblich für die Advektion ist. Dieser Vorteil lässt sich im Vergleich mit den anderen Methoden bei der metrischen Verifikation, als auch an bestimmten Einzelfällen erkennen. Ein Beispiel hierfür ist eine Wettersituation mit einer von Westen herankommenden schnell ziehenden Kaltfront und einem präfrontal niederschlagfreien Bereich. Hier kann die Dynamik der Bewegung mit einem Vorwärtsschema mit konstantem Verlagerungsvektor recht gut abgebildet werden, während die anderen Ansätze auf Bewegungsinformationen in Gebieten stromabwärts und damit außerhalb des Niederschlages zurückgreifen. Diese Bewegung ist durch die Interpolation (vgl. Abschnitt 3.1.2) typischerweise abgeschwächt, sodass als Folge das Voranschreiten des Niederschlags in der Vorhersage unterschätzt wird.

Ein Nachteil des Vorwärtsschemas mit konstantem Verlagerungsvektor ist die fehlende Möglichkeit, Rotationen in den Vorhersagen abzubilden. Dies hat üblicherweise wenig Auswirkungen, da synoptische Strukturen meist einen großen Rotationsradius besitzen und der sich daraus ergebende Advektionsfehler bei Vorhersagen bis +2 h wenig relevant ist. Von größerer praktischer Relevanz sind mögliche Deformationen und Artefakte, die insbesondere bei längeren Vorhersagezeiten entstehen können. Trotz der vergleichsweise rigorosen räumlichen Glättung des maßgeblichen Bewegungsfeldes wachsen anfänglich kleine Divergenzen im Verlauf immer weiter an, sodass durch unbelegte Pixel zunehmend Lücken entstehen, die interpoliert werden müssen. Wir nutzen hierfür ein iteratives Interpolationsverfahren, das solche Lücken detektiert und von außen nach innen mit validen Daten aus der Umgebung füllt. In Ausnahmefällen gelingt diese Interpolation nicht adäquat, sodass Artefakte nicht immer ausgeschlossen werden können. In Abbildung 3-8 ist ein beispielhaftes Analysekomposit der Reflektivität mit dazugehörigen Bewegungsvektoren und der Vorhersage für +2 h dargestellt.

### 3.3 Aktuelle Weiterentwicklung

Eine interessante Weiterentwicklung für das Rückwärtsschema mit Semi-Lagrangescher-Advektion diskutieren RYU et al. (2020). Hier wird unter anderem mit einem zeitlich veränderlichen Feld der Bewegungsvektoren gearbeitet. Grundidee ist die Anwendung der Burgers-Gleichung mit Viskosität, als Spezialform der Navier-Stokes-Gleichungen, die in diesem Kontext die Advektion des Bewegungsvektorfeldes mit sich selbst beschreibt. Mit solch einem Ansatz lässt sich der oben diskutierte Vorteil des Vorwärtsschemas mit konstantem Verlagerungsvektor mit den Vorteilen des Rückwärtsschemas mit Semi-Lagrangescher-Advektion kombinieren. Außerdem führt die zeitliche Integration der Burgers-Gleichung durch den enthaltene Viskositätsterm zu einer zunehmenden Glättung, sodass die Verwendung von initial weniger glatten Bewegungsvektoren möglich ist. Dieses Verfahren ist numerisch im Vergleich deutlich

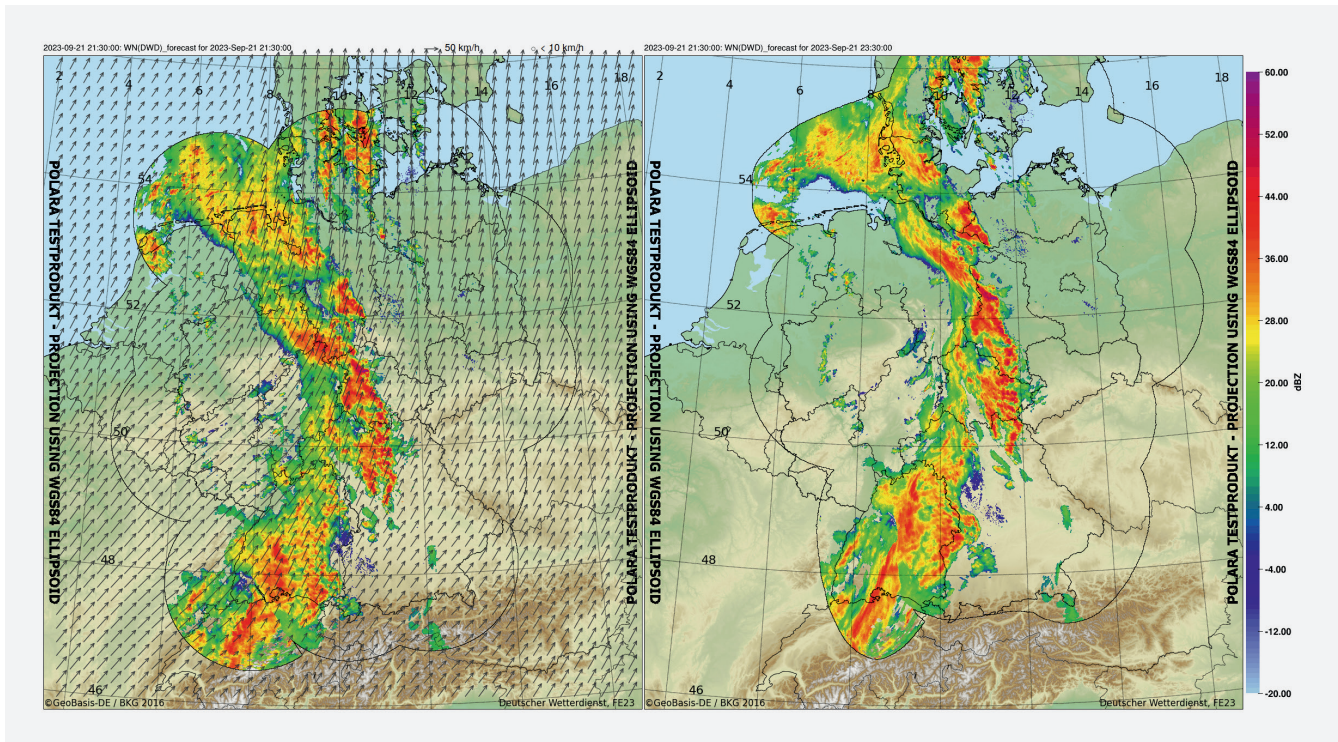


Abbildung 3-8: Beispiel eines Analysekomposits der Radarreflektivität vom 21.09.2023 mit den für die Verlagerung maßgeblichen Bewegungsvektoren (links) und die Vorhersage für +2 h (rechts).

komplexer, erfordert dank umfangreicher Parallelisierung aber nur unwesentlich mehr Rechenzeit. Zurzeit befindet sich diese alternative Vorgehensweise in DWD-interner Evaluierung.

#### 4 Zusammenfassung

Die vorgestellten Methoden zur Kompositerstellung und Verlagerung ermöglichen eine anforderungsspezifische räumliche Aggregation der einzelnen Radarmessungen auf verschiedenen vordefinierten geographischen Rastern und die kurzfristige Vorhersage des aktuellen Niederschlagsgeschehens. Die auf der Reflektivität basierenden Produkte sind hierbei Teil der Basisversorgung für interne und externe Kunden. In Verfahren zur Erstellung von abgeleiteten Produkten wie der Niederschlagsart und der Niederschlagsmenge, sowie in einigen Verfahren des Gewitternowcastings kommen die in diesem Beitrag beschriebenen Methoden ebenfalls zum Einsatz.

Bei der Kompositerstellung richtet sich die *Sampling*-Methode und die Werteauswahl primär nach dem Anwendungsbereich des Zielproduktes. Beispielsweise werden für ein Komposit der Reflektivität zur Beurteilung von sommerlicher Konvektion die vertikalen Maxima der von den Radaren gemessenen Reflektivitätswerte herangezogen. Ein Komposit zur Abschätzung der Niederschlagsmenge am Boden soll hingegen auf möglichst repräsentativen und bodennahen Radarmesswerten basieren. Für die Anwendung von Methoden der Verlagerung ist stattdessen eine

möglichst einheitliche Vorgehensweise sinnvoll, um Inkonsistenzen zwischen den Vorhersagen verschiedener Produkte zu vermeiden.

Im Rahmen des SINFONY-Projekts werden hierbei die gleichen Methoden auf simulierte Radardaten angewendet. Dieses Vorgehen erlaubt eine bestmögliche Vergleichbarkeit von Komposits der simulierten Reflektivität mit den Komposits der Radarmessungen und bildet die Grundlage für Verfahren zur flächenbasierten Kombination von Nowcasting und NWV. Weitere Details hierzu finden sich im Beitrag 1 in diesem Heft.

#### Literatur

AYZEL, G., HEISTERMANN, M., WINTERRATH, T., 2019: Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0.1). *Geoscientific Model Development* **12**, 1387–1402, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1387-2019>.

BELLON, A., AUSTIN, G.L., 1978: The evaluation of two years of real-time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHARP). *Journal of Applied Meteorology* **17**, 1778–1787, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<1778:TEOTYO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<1778:TEOTYO>2.0.CO;2).

FORESTI, L., SIDERIS, I.V., NERINI, D., BEUSCH, L., GERMAN, U., 2019: Using a 10-year radar archive for nowcasting precipitation growth and decay: A probabilistic machine learning approach. *Weather and Forecasting* **34**, 1547–1569,

- <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0206.1>.
- GERMANN, U., ZAWADZKI, I., 2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Monthly Weather Review* **130**, 2859–2873, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<2859:SDOTPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<2859:SDOTPO>2.0.CO;2).
- HORN, B., SCHUNCK, B., 1981: Determining optical flow. *Artificial Intelligence* **17**, 185–203, [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(81\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2).
- LUCAS, B., KANADE, T., 1981: Iterative image registration technique with an application to stereo vision. Proceedings of Imaging Understanding Workshop, 674–679.
- PROJ Contributors, 2024: PROJ coordinate transformation software library. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://proj.org/>, Abruf: 18.07.2024, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5884394>.
- QGIS Contributors, 2022: QGIS (3.22.3) [Computer software]. Zenodo, <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5869837>.
- RYU, S., LYU, G., DO, Y., LEE, G., 2020: Improved rainfall nowcasting using Burgers' equation. *Journal of Hydrology* **581**, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124140>.
- SÁNCHEZ, J., LLOPIS, E., FACCILOLO, G., 2013: TV-L1 optical flow estimation. *Image Processing On Line* **3**, 137–150, <https://doi.org/10.5201/ipol.2013.26>.
- ZACH, C., POCK, T., BISCHOF, H., 2007: A duality based approach for realtime TV-L1 optical flow. In: Pattern Recognition. *Lecture Notes in Computer Science* **4713**, Springer, [http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-540-74936-3\\_22](http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-540-74936-3_22).
- ZHANG, Y., LONG, M., CHEN, K., XING, L., JIN, R., JORDAN, M.I., WANG, J., 2023: Skilful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet. *Nature* **619**, 526–532, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06184-4>.

## Kontakt

MICHAEL MOTT  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
[michael.mott@dwd.de](mailto:michael.mott@dwd.de)

MARKUS SCHULTZE  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
[markus.schultze@dwd.de](mailto:markus.schultze@dwd.de)

M. SCHULTZE, J. STEINERT

# 4 Bestimmung der Niederschlagsart

## Determination of the Type of Precipitation

### Zusammenfassung

Die Analyse und die Vorhersage von Niederschlag sind wichtige Aufgaben für nationale Wetterdienste, um qualitativ hochwertige Wettervorhersagen und -warnungen zu erstellen. Neben der Niederschlagsmenge ist die Art des Niederschlags (insbesondere im Winter) entscheidend für die Beschreibung und Bewertung der aktuellen und zukünftigen Wettersituation. In diesem Beitrag wird ein mehrstufiges Verfahren zur Bestimmung der bodennahen Niederschlagsart vorgestellt. Der Ansatz kombiniert polarimetrische Radardaten aus dem Wetterradarverbund des DWD mit korrigierten thermodynamischen Profilen der numerischen Wettervorhersage (NWV) und extrapoliert die detektierten Hydrometeor-Klassen in Radarstrahlhöhe auf eine Höhe von 2 m über Grund. Die Idee dabei ist, die mikrophysikalischen Prozesse in der unteren Troposphäre auf der Grundlage des entsprechenden thermodynamischen Profils, das die Hydrometeore zwischen Radarstrahlhöhe und Bodenhöhe durchlaufen, vereinfacht abzubilden. Aufgrund von Ungenauigkeiten in den NWV-Daten werden die Vertikalprofile von Temperatur und Feuchte durch die Verwendung mehrerer Arten von Stationsdaten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung angepasst. Das Verfahren wurde 2019 in den Routinebetrieb des DWD überführt und wird seither sukzessive weiterentwickelt. Die erzeugten Produkte unterstützen den Warndienst des DWD und stehen der allgemeinen Öffentlichkeit sowie Spezialnutzern (wie beispielsweise Winterdiensten) zur Verfügung.

### Summary

Analyzing and forecasting precipitation are essential tasks for national weather services to create high-quality weather forecasts and warnings. Besides the amount of precipitation, the type of precipitation is particularly crucial in winter for describing and assessing the current and future weather situation. This article presents a multi-stage algorithm for determining the near-surface precipitation type. The approach combines polarimetric radar data from the DWD weather radar network with corrected thermodynamic profiles from numerical weather prediction (NWP) and extrapolates the detected hydrometeor classes at radar beam height to a height of 2 meters above ground. The idea is to simplify the representation of microphysical processes in the lower troposphere based on the corresponding thermodynamic profile that the hydrometeors pass between radar beam height and ground level. Due to inaccuracies in the NWP data, the vertical profiles of temperature and humidity are adjusted using several types of station data with high spatial and temporal resolution. The presented algorithm was introduced into the routine operations of the DWD in 2019. Since then, it has been continuously refined and extended. The generated products support the DWD warning service and are available to the general public as well as specialized user groups, such as winter road maintenance services.

### 1 Einleitung

Der Prozess der Wettervorhersage und -warnung besteht aus mehreren Komponenten, darunter aus der Beobachtung, dem Nowcasting und der ensemblebasierten numerischen Wettervorhersage (NWV). Die Analyse und Vorhersage der Niederschlagsart im Winter ist eine der Herausforderungen für die Meteorologinnen und Meteorologen der nationalen Wetterdienste, insbesondere bei kritischen Wetterlagen. Auch in Bereichen wie der Luftfahrt und dem Straßenverkehr besteht ein zunehmender Bedarf an zuverlässigen Informationen zur Niederschlagsart, um beispiels-

weise die Einsätze von Räumfahrzeugen möglichst effizient zu koordinieren.

Die Art des Niederschlags ist auch ein wichtiger Bestandteil von Wetterberichten und Unwetterwarnungen und beeinflusst daher die Kommunikation von Wettergefahren und die damit verbundene Reaktion der Öffentlichkeit. Die Niederschlagsart ist keine Messgröße wie etwa die Temperatur, sondern kann nur durch menschliche Beobachtung direkt bestimmt werden. Meteorologische Instrumente ermöglichen aber eine automatisierte indirekte Schätzung der Niederschlagsart. Der DWD betreibt hierfür ein Netzwerk

von hauptamtlichen Wetterstationen, an denen die Niederschlagsart mit Distrometern, genauer Laserniederschlagsmonitoren (LNM), bestimmt wird (BLOEMINK und LANZINGER 2005). Vereinfacht ausgedrückt ermitteln diese Geräte die Größe, Geschwindigkeit und Anzahl von Niederschlagspartikeln, die durch die Messstrecke eines Lasers fallen und leiten hieraus die Art des Niederschlags ab. In den letzten Jahren haben Meldungen über die Niederschlagsart vor Ort, die von Nutzern über die WarnWetter-App des DWD abgegeben werden (SPITZER et al. 2023), zunehmend an Bedeutung gewonnen. Trotz einer gewissen Subjektivität der Meldungen unterstützen diese den Warn-dienst des DWD, insbesondere auch im Winter bei Ereignissen mit gefrierendem Regen.

Wetterstationen liefern Daten mit hoher zeitlicher Auflösung, haben aber den Nachteil, dass es Punktmessungen sind und daher nur eine begrenzte räumliche Repräsentativität besteht. In Gegenden mit komplexer Topographie wie es beispielweise in den deutschen Mittelgebirgen der Fall ist, kann die räumliche Variabilität der Niederschlagsart durch die Messungen nicht immer adäquat abgebildet werden. Ähnlich verhält es sich manchmal auch im Flachland vor allem bei Grenzwetterlagen mit einem scharfen Übergang der Niederschlagsphase. Die Meldungen von App-Nutzern sind in solchen Situationen hilfreich, wobei deren Verfügbarkeit von Faktoren wie der Bevölkerungsdichte und der Tageszeit abhängig ist. Daten von Wetterradaren ermöglichen eine große Flächenabdeckung bei hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, haben aber den Nachteil, dass Informationen nur in der Höhe des Radarstrahls vorliegen. Daher erfordert die Abschätzung der bodennahen Niederschlagsart die Kombination von Informationen aus verschiedenen Datenquellen. Insbesondere in der Wintersaison hängt die bodennahe Niederschlagsart stark von den Bedingungen in der unteren Troposphäre ab, sodass eine ausschließliche Verwendung von Wetterradardaten für diesen Zweck nicht ausreichend ist. Meteorologische Messdaten im Höhenbereich zwischen den Radarmessungen und dem Erdboden sind allerdings sehr spärlich. Die Nutzung von qualitativ hochwertigen Daten von Radiosonden ist nicht praktikabel, da nur wenige Stationen mit jeweils nur einigen wenigen Messungen pro Tag zur Verfügung stehen. Messungen von Verkehrsflugzeugen sind prinzipiell, zumindest tagsüber und für die Temperatur, in vergleichsweise hoher Anzahl verfügbar. Allerdings sind die Daten für den hier relevanten Höhenbereich auf die unmittelbaren Gebiete rund um die Verkehrsflughäfen begrenzt. Daher werden ersatzweise die Daten der NWV verwendet.

Die Forschung an radarbasierten Verfahren zur Hydrometeoriklassifikation begann bereits vor Jahrzehnten und ist eng mit Dualpolarisations-Radarmessungen (Dual-Pol) und deren Beziehung zu spezifischen Hydrometeorotypen verknüpft (STRAKA et al. 2000). Vor mehr als zehn Jahren begannen die nationalen Wetterdienste, ihre Wetterradar-netze mit Dual-Pol-Radarsystemen zu erweitern oder zu erneuern. Mit diesem Schritt wurden auch Algorithmen

zur Hydrometeoriklassifikation implementiert, um von den Dual-Pol-Daten zu profitieren (PARK et al. 2009). Gegenstand dieses Beitrags ist die Beschreibung der Verfahrensschritte zur Bestimmung der bodennahen Niederschlagsart und Veranschaulichung des Verfahrens anhand eines Fallbeispiels. Eine umfangreichere Darstellung mit weiterführenden Literaturhinweisen sowie eine Verfahrensverifikation findet sich in STEINERT et al. (2021).

## 2 Eingangsdaten

Die Datenbasis für die Analyse der Niederschlagsart besteht aus qualitätsgesicherten Messungen des Wetterradar-netzes des DWD, Daten der numerischen Wettervorhersage sowie Messungen von Wetterstationen.

### 2.1 Wetterradarmessungen

Wetterradare sind Fernerkundungsgeräte, um die mikrophysikalische dreidimensionale Struktur des Niederschlags mit einer hohen räumlichen Abdeckung und zeitlichen Auflösung zu analysieren. Der DWD betreibt als nationaler Wetterdienst in Deutschland ein Netzwerk aus 17 operationellen C-Band-Wetterradaren. Seit 2021 arbeiten alle Radare im Verbund als Dual-Pol-Systeme. Im Gegensatz zur Aussendung von horizontal polarisierten elektromagnetischen Wellen wie bei Single-Pol-Radaren, setzt sich die Polarisation der gesendeten Wellen bei Dual-Pol-Radaren aus einem horizontalen und einem vertikalen Anteil zusammen. Damit stehen neben der klassischen horizontalen Reflektivität weitere Messgrößen zur Verfügung. Diese ermöglichen beispielsweise eine verbesserte Filterung von Störschall („Clutter“) und eine genauere radarbasierte quantitative Niederschlagsabschätzung. Details hierzu finden sich in den Beiträgen 2 und 5 in diesem Heft. Die Hydrometeoriklassifikation profitiert in besonderem Maße von Dual-Pol-Radardaten. Die typischen Größen hierbei sind die horizontale Reflektivität  $Z_H$ , die differentielle Reflektivität  $Z_{DR}$ , der ko-polare Korrelationskoeffizient  $\rho_{HV}$  und die spezifische differentielle Phase  $K_{DP}$ . Sie enthalten Informationen über die Niederschlagsintensität ( $Z_H$  und  $K_{DP}$ ), die mittlere Form der Hydrometeore ( $Z_{DR}$ ) und die Ähnlichkeit der Partikel im Messvolumen ( $\rho_{HV}$ ).

Alle 17 Radarsysteme im Verbund folgen einer festen und identischen Scan-Sequenz mit jeweils elf Scans, die alle 5 min wiederholt werden. Jeder Scan entspricht hierbei einer kompletten Drehung des Radars um die eigene Achse bei einer definierten Elevation (vertikaler Kippwinkel). Die verschiedenen Elevationen ermöglichen die dreidimensionale Erfassung des Niederschlags. Der Scanzzyklus startet mit dem so genannten Niederschlagsscan. Dieser zeichnet sich durch eine variable Elevation während der Drehung aus. Die Winkel sind so eingestellt, dass der Radarstrahl in etwa der Orographie folgt. Mit einem konfigurierten niedrigen Standardwert von  $0,8^\circ$  wird so eine möglichst bodennahe Abtastung bei gleichzeitig hoher Reichweite ohne orographische Störeinflüsse ermöglicht, wobei die maximale

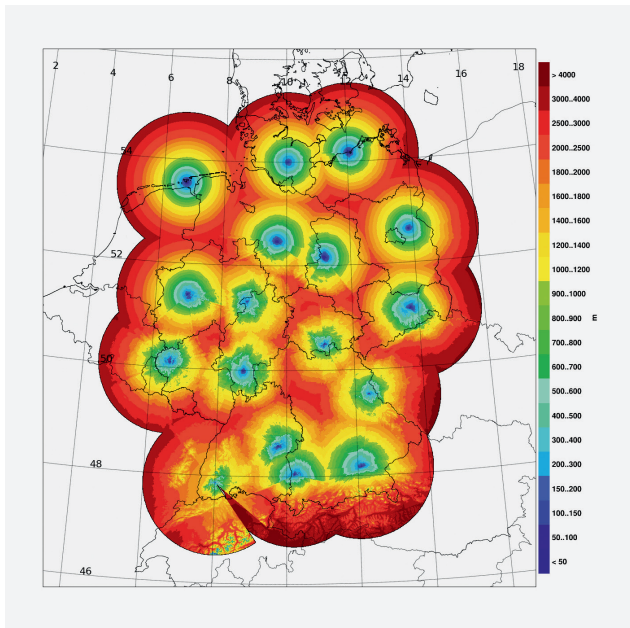


Abbildung 4-1: Operationeller Radarverbund des DWD: Komposit der Höhendifferenz zwischen Messhöhe des Radars im geländefolgenden Niederschlagsscans und dem Boden. Die einzelnen Radarstationen sind an den niedrigen Werten erkennbar (Daten Hintergrundkarte: GeoBasis-DE/BKG 2016).

Reichweite ausgehend vom Radarstandort 150 km beträgt. Die Höhendifferenz zwischen der Messhöhe des Niederschlagsscans und dem Boden ist in Abbildung 4-1 als Komposit aus allen Radarstandorten dargestellt. In Überlappregionen wird die niedrigste Höhe verwendet. Sehr gut sind die einzelnen Radarstandorte an den sehr niedrigen Werten identifizierbar. In Gebieten weit entfernt von Radarstandorten ergeben sich Höhendifferenzen zum Boden von teilweise mehr als 4 km.

Die anderen zehn Scans werden häufig unter dem Begriff „Volumenscan“ zusammengefasst und erfüllen den Bedarf an Messungen in größeren Höhen. Sie werden mit festen Elevationen zwischen 0,5° und 25° mit einer Reichweite von bis zu 180 km betrieben. Die bereitgestellte räumliche Auflösung der Daten des Niederschlagsscans und des Volumenscans beträgt 250 m. Diese gilt aber nur in Ausbreitungsrichtung des Radarstrahls. Mit zunehmendem Abstand zum Radar kommt es zu einer physikalisch bedingten Aufweitung des Radarstrahls, sodass sich das Messvolumen vergrößert und daher die effektive räumliche Auflösung abnimmt. Für weiterführende Informationen zur Wetterradarmessung wird an dieser Stelle auf Beitrag 2 in diesem Heft verwiesen.

## 2.2 Daten der numerischen Wettervorhersage (NWV)

Aufgrund des Mangels an hochauflösenden meteorologischen Messungen der unteren Troposphäre werden die Vorhersagen der hauseigenen ICON-Modellkette (ZÄNGL et al. 2015) verwendet. Diese besteht aus einem Globalmodell, dem direkt gekoppelten Ausschnittsmodell ICON-EU

mit einer höheren Auflösung über Europa und angrenzenden Gebieten, sowie dem Regionalmodell ICON-D2. Letzteres hat eine Maschenweite von circa 2 km und erlaubt die explizite Auflösung von Konvektion. Das vertikale Gitter umfasst insgesamt 65 Schichten mit einem nach oben zunehmenden vertikalen Abstand. Die Modelldomain deckt das gesamte Gebiet Deutschlands, Österreichs, der Schweiz, der Benelux-Staaten und Teile der Nachbarländer ab. Damit ist die ICON-D2-Domain größer als die Abdeckung des Radarverbundes des DWD, sodass jede Radarmessung mit den Modelldaten kombiniert werden kann. Die hohe räumliche Auflösung des ICON-D2 ermöglicht unter anderem eine detaillierte Abbildung der Orographie und ist daher für das hier angestrebte Einsatzgebiet in der unteren Troposphäre am besten geeignet.

ICON-D2-Vorhersagen werden alle 3 h gerechnet mit einer Vorhersagezeit bis 48 h. Viele zweidimensionale Parameter, wie die Höhe der Schneefallgrenze, werden alle 15 min ausgegeben, während dreidimensionale Größen, wie die Temperatur, in stündlicher Auflösung zur Verfügung stehen. Wir nutzen derzeit ausschließlich Daten des deterministischen Laufs von ICON-D2. Diese sind etwa 1 h nach Startzeitpunkt verfügbar. Die im Folgenden verwendeten Größen umfassen die Schneefallgrenze sowie die dreidimensionalen Felder der Temperatur, des Drucks und der spezifischen Feuchte.

## 2.3 Messungen von Wetterstationen

Der DWD betreibt ein Netz von etwa 180 automatisierten hauptamtlichen Wetterstationen in Deutschland. Jede dieser Stationen umfasst eine Reihe standardisierter Sensoren, die nach den Richtlinien der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) und weiteren DWD-spezifischen Anforderungen auf einem Messfeld platziert sind. Die Stationen sind räumlich näherungsweise homogen über Deutschland verteilt. Die für unser Verfahren relevanten Messgrößen sind Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck. Die zugehörigen Sensoren befinden sich in 2 m ü. NN. Neben dem hauptamtlichen Messnetz betreibt der DWD ein Netz von hunderten nebenamtlichen Stationen. Ehrenamtliche Beobachter vor Ort übernehmen häufig die Pflege dieser Stationen und führen teilweise manuelle Messungen durch. Die Kriterien an die Platzierung der Sensoren entsprechen denen der hauptamtlichen Stationen, wobei an den nebenamtlichen Stationen eine reduzierte Anzahl an Wetterelementen erfasst wird. An vielen Stationen wird lediglich die Niederschlagsmenge gemessen. Die Anzahl der für unsere Anwendung verwertbaren nebenamtlichen Stationen beläuft sich typischerweise auf knapp 500. Die Daten der haupt- und nebenamtlichen Stationen stehen alle 10 min mit einer Latenz von wenigen Minuten zur Verfügung.

Darüber hinaus sind Messungen von über 2000 Straßenwetterstationen (SWS) verfügbar, um die Verfügbarkeit von meteorologischen Daten in Bodennähe zu erweitern. Hier können wir zusätzlich zu Stationen in Deutschland

auch auf eine Vielzahl von Messungen aus den Niederlanden und Tschechien zurückgreifen. Die Straßenwetterstationen werden von den Bundesländern beziehungsweise durch die jeweiligen Nachbarländer betrieben. Typischerweise befinden sich die Stationen an Autobahnen und Fernstraßen. In die Fahrbahn eingebaute Sensoren messen die Belagtemperatur, die als Indiz für mögliche Straßenglätte herangezogen werden kann und so beispielweise die Einsatzplanung von Winterdiensten unterstützt. Weitere Sensoren befinden sich meist direkt neben der Fahrbahn und erfassen unter anderem die von uns genutzten Werte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Straßenwetterstationen liefern Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 15 min. Aufgrund von spezifischen Bedingungen entlang der Straßen sind standardisierte Messungen schwierig, sodass die Richtlinien der WMO nicht eingehalten werden können. Nicht selten befinden sich die Stationen an für den Straßenverkehr neuralgischen Punkten (z. B. Senken), die nur eine geringe räumliche Repräsentativität der Messung zulassen. Stationen mit wiederholt auffälligen Messwerten wurden von uns in einer *Blacklist* gespeichert und werden bei der weiteren Verarbeitung ignoriert. Zusätzlich durchlaufen die Meldungen der Straßenwetterstationen ein im DWD entwickeltes Verfahren, um fehlerhafte Daten zu detektieren. In einem mehrstufigen Algorithmus werden beispielweise Messwerte verworfen, die im Vergleich zu Daten von benachbarten Stationen hohe Abweichungen aufweisen.

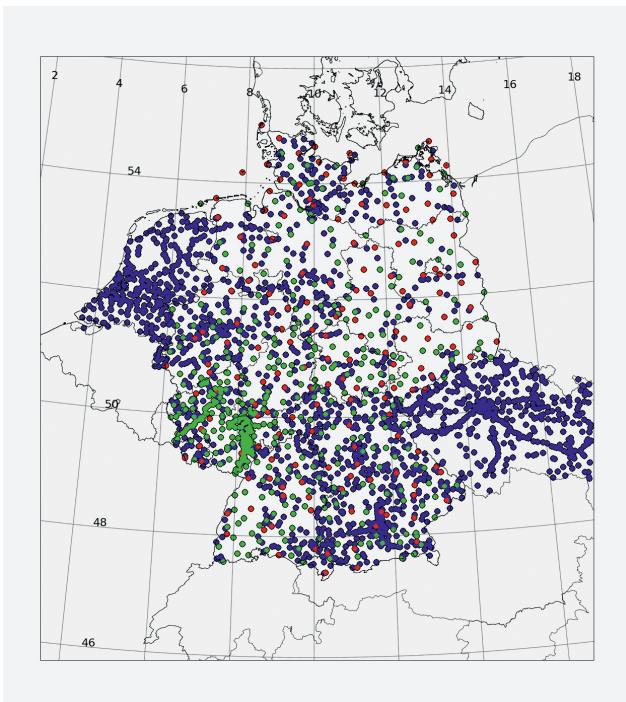


Abbildung 4-2: Standorte der Wetterstationen, deren Daten an einem Beispieltag im Winter verwendet wurden. Die drei Stationstypen umfassen hauptamtliche Stationen (rote Kreise) und nebenamtliche Stationen (grüne Kreise), sowie Straßenwetterstationen (blaue Kreise; Daten Hintergrundkarte: GeoBasis-DE/BKG 2016).

Abbildung 4-2 gibt einen grafischen Überblick über die Standorte der verschiedenen Stationstypen. Dargestellt sind nur Stationen, die Daten der relevanten Messgrößen an einem typischen Wintertag geliefert haben. Die Anzahl variiert und beträgt im dargestellten Beispiel über 2600 Stationen. Gut erkennbar ist die homogene Verteilung von hauptamtlichen Wetterstationen (rote Kreise) in Deutschland, während sich die räumliche Dichte der nebenamtlichen Stationen (grüne Kreise) deutlich variabler darstellt. Die Positionierung der Straßenwetterstationen (blaue Kreise) entlang der Fernstraßen zeigt sich besonders deutlich in Tschechien.

### 3 Hydrometeoriklassifikation auf Radarstrahlhöhe

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Niederschlagsart in Bodennähe bildet das Verfahren HymecRS (*Hydrometeor classification Radar Sweep*) zur Klassifikation der Hydrometeore in Höhe der Radarmessung. HymecRS wird seit 2010 entwickelt und nutzt vor allem die Dual-Pol-Messungen des DWD-Radarverbundes. Als Vorlage für die Entwicklung des Verfahrens diente ein Ansatz nach PARK et al. (2009), bei dem für amerikanische S-Band-Radarsysteme ein Algorithmus zur Hydrometeoriklassifikation mithilfe einer Fuzzylogik realisiert wurde. Gegenüber dem beim DWD-Radarverbund verwendeten C-Band-Frequenzbereich gibt es bei der Nutzung des S-Bandes Unterschiede in der Signalausbreitung beziehungsweise den gemessenen Signalen. Unter anderem deshalb konnte das Verfahren nicht direkt übernommen werden.

#### 3.1 Funktionsprinzip

Fuzzylogik, oder unscharfe Logik, ist ein Ansatz, der entwickelt wurde, um mit Unsicherheiten und Unschärfen in der Entscheidungsfindung umzugehen. Das Konzept findet heute vor allem in vielen Bereichen der Regelungstechnik praktische Anwendung. Im Gegensatz zur klassischen, booleschen Logik, die strikte binäre Wahrheiten (wahr oder falsch, 1 oder 0) verwendet, erlaubt die Fuzzylogik die Behandlung von Werten, die zwischen diesen Extremen liegen. Sie ist darauf ausgerichtet, menschliches Entscheidungsverhalten, für das die Abwägung verschiedener mit Unsicherheiten behafteter Einflussfaktoren charakteristisch ist, nachzubilden und in technischen Systemen zu realisieren. Im Fall der Hydrometeoriklassifikation stellen unter anderem die verschiedenen Messgrößen der Dual-Pol-Radarsysteme die berücksichtigten Einflussfaktoren dar, die in Kombination das Ergebnis der Klassifikation bestimmen. Wie und in welcher Stärke die unterschiedlichen Messgrößen das Ergebnis beeinflussen, muss im Fuzzylogik-Verfahren als explizites Wissen hinterlegt werden. Die Basis hierfür liefern beispielweise theoretische Überlegungen zum Streuverhalten der einzelnen Hydrometeorstypen.

HymecRS bietet eine den Nutzeranforderungen des DWD entsprechenden Unterteilung in die zehn Hydrometer-

klassen Sprühregen, Regen, große Tropfen, nasser Schnee, trockener Schnee, Eiskristalle, Graupel, nasser Hagel, Hagel und großer Hagel. Messungen, für die keine Klassifikation möglich ist, werden der Klasse „nicht klassifizierbar“ zugeordnet. Die verwendeten Radarmessgrößen sind die horizontale Reflektivität  $Z_H$ , die differentielle Reflektivität  $Z_{DR}$  und der ko-polare Korrelationskoeffizient  $\rho_{HV}$ . Ein starkes Rückstreusignal, das sich in hohen  $Z_H$ -Werten zeigt, deutet beispielweise auf Hagel hin. Haben die Hydrometeore dabei eine eher abgeflachte Form, was aus erhöhten Werten im  $Z_{DR}$  geschlossen werden kann, kann dies stattdessen ein Hinweis auf große Tropfen sein. Während zwischen einzelnen Regentropfen in einem Messvolumen eine große Ähnlichkeit hinsichtlich Größe und Form erwartet werden kann, sind einzelne Hagelkörner deutlich individueller. Entsprechend kann in unserem konstruierten, aber praxisnahen Beispiel bei einem hohen  $\rho_{HV}$ -Messwert von großen Tropfen als dem wahrscheinlichsten Hydrometeorotyp ausgegangen werden. Erst in der Gesamtbeurteilung der einzelnen Messgrößen lässt sich also eine robuste Aussage treffen.

Für die Unterscheidung zwischen Schnee und Regen ist die alleinige Nutzung von Radardaten aufgrund der sehr ähnlichen Signaturen in den Radarmessungen häufig nicht ausreichend. Zur Optimierung werden daher Informationen über die Höhe der Schneefallgrenze aus den ICON-D2-Modelldaten extrahiert und als weitere Eingangsgröße der Fuzzylogik verwendet. Hierbei nutzen wir die direkte Modellausgabe nur als Backup und verwenden stattdessen eine eigens bestimmte Höhe der Schneefallgrenze. Diese wird aus korrigierten ICON-D2-Vertikalprofilen abgeleitet und basiert auf Schwellenwerten der Schmelzfläche. Das Konzept hierzu und die sich daraus ergebenden Vorteile werden in Abschnitt 4.3 beschrieben. Eine möglichst genaue Abschätzung der Schneefallgrenze ist essentiell, um die Lage der Schmelzschicht zu bestimmen. Diese zumeist wenige hundert Meter dicke Schicht markiert die Zone, in denen fallende Schneeflocken beginnen zu schmelzen (Oberkante) und vollständig zu Regentropfen geschmolzen sind (Unterkante = Schneefallgrenze). Im Übergangsbereich beider Niederschlagsphasen kommt es zu einem Anstieg der gemessenen horizontalen Reflektivität, der primär durch besondere Streueigenschaften der schmelzenden Schneeflocken hervorgerufen wird. Eine anschauliche Erklärung zu diesem Effekt findet sich im Wetter- und Klimalexikon des DWD ([www.dwd.de/lexikon](http://www.dwd.de/lexikon)) unter dem Stichwort „Radar Brightband Effekt“. Der Anstieg der Reflektivität ist jedoch nicht mit einer erhöhten Niederschlagsintensität assoziiert, was insbesondere bei der radarbasierten Abschätzung der Niederschlagsmenge berücksichtigt werden muss.

Eine große Herausforderung der letzten Jahre war die adäquate Klassifikation von Graupel. Schneeflocken im oberen Bereich der Schmelzschicht weisen ein sehr ähnliches Streuverhalten wie Graupel auf, sodass eine Unterscheidung anhand der Messgrößen des Radars schwierig ist. Als praktikabler Ansatz zur Verbesserung hat sich die zusätz-

liche Nutzung des vertikal integrierten Eises (*Vertically Integrated Ice*, VII) als Eingangsgröße der Fuzzylogik gezeigt. VII ist ein aus dreidimensionalen Radardaten abgeleitetes Produkt, das die Menge an gefrorenem Wasser der vertikalen Säule über einem Punkt abschätzt (MOSIER et al. 2011). Es ist als guter Indikator für Konvektion anerkannt und hilft so die Regionen einzugrenzen, in denen Graupel prinzipiell möglich ist.

### 3.2 Realisierung

Hauptbestandteil der konkreten Umsetzung der Fuzzylogik-Klassifikation mit den verschiedenen Eingangsgrößen ist die Formulierung von sogenannten Zugehörigkeitsfunktionen. Diese werden für jede Eingangsgröße der einzelnen Zielklassen definiert. Sie haben die Form eines Trapezes mit Werten zwischen 0 und 1 und können als Wahrscheinlichkeit dafür interpretiert werden, dass der Wert einer Eingangsgröße auf eine bestimmte Hydrometeor-Klasse hinweist. Das gewichtete Mittel aus allen für die Klasse ermittelten Einzelwahrscheinlichkeiten ergibt die Gesamtwahrscheinlichkeit. Das finale Klassifikationsergebnis entspricht dann der Klasse mit der höchsten Wahrscheinlichkeit. Die Zugehörigkeitsfunktionen und die Gewichtung sind sehr klassen- und größenspezifisch und das Ergebnis eines langwierigen und zum Teil noch andauernden Tuningprozesses. Die Klassifikation wird alle 5 min separat für alle Radarstandorte für alle Niederschlags- und Volumenscans durchgeführt.

### 3.3 Vor- und Nachprozessierung

Die Klassifikation mittels Fuzzylogik fußt darauf, dass sich gewisse Werte und Wertkonstellationen der Eingangsgrößen auch in den tatsächlichen Messungen widerspiegeln. Bei sehr schwachen Niederschlägen können die geringen Rückstreusignale ein großes Rauschen in den Messdaten hervorrufen und so eine sinnvolle Klassifikation verhindern. Zudem treten im Sommerhalbjahr im Umfeld der Radarstandorte manchmal Gebiete mit geringer Reflektivität auf, die wahrscheinlich auf Insekten-schwärme zurückzuführen sind und sich anhand gewisser charakteristischer Merkmale in den Daten teilweise identifizieren lassen. In beiden Fällen werden die betroffenen Messungen von der Klassifikation ausgeschlossen und als „nicht klassifizierbar“ eingestuft.

Nicht in allen Situationen ergibt sich aus der Fuzzylogik ein plausibles Klassifikationsergebnis. Die der Klasse zugeordnete Wahrscheinlichkeit kann hierfür ein Indiz sein. Liegt diese unter einem Schwellenwert von derzeit 35 %, ist das Ergebnis als sehr unsicher anzusehen. Die Klassifikation wird dann verworfen und es erfolgt stattdessen die Einstufung „nicht klassifizierbar“.

Die verlässliche Erkennung von Hagel ist ein wichtiger Aspekt der Hydrometeor-Klassifikation. Eine zu häufige Detektion kann durch die nachträgliche Anwendung eines VII-Schwellenwertes reduziert werden. Ist ein bestimmter

Wert des VII unterschritten, wird angenommen, dass die vertikale Mächtigkeit und Intensität der Konvektion nicht ausreichen, um Hagel zu generieren und es erfolgt eine Rückstufung auf Graupel. Mitunter wird die ursprüngliche Hagelklassifikation auch komplett verworfen und eine Zuordnung zur Klasse „nicht klassifizierbar“ vorgenommen. Dies kann bei starken Rückstreusignalen, die beispielsweise durch Windkraftanlagen hervorgerufen werden, auftreten. Die Klassifikation von großem Hagel ist nicht direkt Teil der Fuzzylogik und wird im letzten Schritt anhand von Mindestwerten im VII und gleichzeitig auftretenden niedrigen Werten im  $\rho_{HV}$  als Heraufstufung der Hagelklasse realisiert. Der Grundgedanke hierbei ist es, einen indirekten Indikator für großen Hagel mit einer direkten Messgröße zu kombinieren. Große Hagelkörner sind in ihrer Form und Größe sehr variabel, was sich in ausgesprochen niedrigen  $\rho_{HV}$ -Werten widerspiegeln kann.

### 3.4 Weiterverarbeitung

Die HymecRS-Daten werden im Verfahren KONRAD3D (siehe Beitrag 6 in diesem Heft) zur Verknüpfung von Hagelinformationen und detektierten Gewitterzellen weiterverarbeitet. Die Hydrometeorklassifikationen des Niederschlagsscans findet außerdem im Rahmen der polarimetrischen quantitativen Niederschlagsschätzung Anwendung (Beitrag 5 in diesem Heft).

Für die nachfolgenden Schritte zur Bestimmung der Niederschlagsart in Bodennähe ist es praktikabel, die HymecRS-Daten des Niederschlagsscans der einzelnen Radare in das nationale Komposit mit der Gitterweite  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  zusammenzufassen. In Überlappbereichen werden die Daten mit der niedrigsten Höhe verwendet. Neben eines Komposits der Hydrometeorklasse ist auch die Erzeugung eines Höhenkomposits notwendig, um die Bezugshöhe der ursprünglichen Radarmessung bei der weiteren Prozessierung berücksichtigen zu können. Beide Komposits werden für den Analysezeitpunkt erstellt und zudem für die nächsten zwei Stunden mittels Verlagerung vorhergesagt. Details zur generellen Kompositerstellung und den Methoden der Verlagerung finden sich in Beitrag 3 in diesem Heft.

## 4 Bestimmung der bodennahen Niederschlagsart

Die Unterscheidung zwischen Schnee und Regen am Boden stellt im Winter häufig eine warnrelevante Fragestellung dar. Dies lässt sich mit einem auf Radarstrahlhöhe bezogenem Produkt häufig nicht beantworten und eine verlässliche Aussage bleibt auf die unmittelbaren Gebiete rund um die Radarstandorte (entsprechend niedriger Höhe des Radarstrahls, vgl. Abbildung 4-1) beschränkt. Daher ergab sich auch aufgrund interner Nutzeranforderungen die Notwendigkeit zur Bestimmung der Niederschlagsart in Bodennähe. Die Umsetzung des entsprechenden Verfahrens HymecNG (*Hydrometeor classification Near Ground*) begann 2016. Die Grundidee besteht darin, die mikrophysikalischen Prozesse, die Hydrometeore zwischen Radar-

strahlhöhe und Boden durchlaufen, mithilfe des thermodynamischen Profils vereinfacht abzubilden.

Statt der realen Temperatur wird in diesem Verfahren die Feuchttemperatur (auch Feuchtkugelttemperatur) genutzt. Das ist die Temperatur, die sich infolge von Verdunstung an einer feuchten Oberfläche einstellt. Die Feuchttemperatur ist stets kleiner oder gleich der Temperatur, wobei gilt: Je trockener die Luft, desto größer ist die Differenz. Die Feuchttemperatur beschreibt die potentielle lokale Abkühlung durch Verdunstung. Für unsere Fragestellung bietet die Feuchttemperatur den Vorteil, dass Abkühlungseffekte, die entstehen, wenn Niederschlag in eine untersättigte Luftschicht fällt und dabei verdunstet oder sublimiert, berücksichtigt werden.

HymecNG verwendet als Eingangsprodukt das Komposit der Hydrometeorklasse und der dazugehörigen Höhe, sowie die Messungen von Wetterstationen und Daten der NWV. Die räumliche und zeitliche Auflösung dieser Daten ist sehr unterschiedlich, sodass die Vorverarbeitung der Eingangsdaten und die Interpolation auf ein gemeinsames Raster einen nicht unerheblichen Teil des Gesamtalgorithmus ausmachen. Das gemeinsame Zielgitter aller Eingangsdaten entspricht dem Raster, auf dem die Hydrometeorklasse und die Höhe der Radarmessung vorliegen. Das Verfahren wird alle 5 min für die aktuelle Analyse, als auch für die Vorhersagen bis +2 h angewendet. Wir beschränken uns in der folgenden Diskussion auf den Analysezeitpunkt; für die Vorhersage ist die prinzipielle Vorgehensweise aber ähnlich.

### 4.1 Vorverarbeitung und Interpolation der Stationmessungen

Die Feuchttemperatur ist eine Größe, die nicht direkt an den Stationen gemessen wird. Sie kann jedoch aus den Messungen der Lufttemperatur, der relativen Feuchte und des Luftdrucks näherungsweise bestimmt werden. Fehlende Daten des Luftdrucks werden durch den Wert der Standardatmosphäre (1013,25 hPa) ersetzt, ohne einen signifikanten Fehler in der abgeschätzten Feuchttemperatur hervorzurufen.

Um die unregelmäßig verteilten, aus Messungen der Wetterstationen abgeleiteten Daten der Feuchttemperatur auf dem regulären Zielgitter bereitzustellen, ist eine räumliche Interpolation nötig. Hierfür sind Techniken wie die inverse Distanzwichtung (IDW) oder geostatistische Methoden wie *Kriging* weit verbreitet. Beide Ansätze schätzen Daten an Orten, an denen keine direkten Informationen verfügbar sind. *Kriging* führt typischerweise zu genaueren Ergebnissen, ist verfahrensbedingt allerdings deutlich aufwändiger zu berechnen. Im Sinne der Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems erfolgt die räumliche Interpolation daher derzeit mittels IDW.

Die Grundidee der IDW besteht darin, unbekannte Werte an bestimmten Punkten basierend auf den Werten von

benachbarten bekannten Punkten zu schätzen. Dabei wird angenommen, dass näher gelegene Punkte einen größeren Einfluss auf den Schätzwert haben als weiter entfernte Punkte. Dies geschieht durch die Anwendung von Gewichten, die umgekehrt proportional zur Entfernung zwischen den Punkten sind. In unserem Fall sind die bekannten Punkte jene Gitterzellen, in denen eine Stationsmessung vorliegt. Die unbekannt, zu interpolierenden Punkte entsprechen analog den Gitterzellen ohne Messung. Bei der Interpolation spielen neben dem horizontalen Abstand auch die Differenz zwischen Stationshöhe und Höhe des Zielpixels, sowie der zeitliche Versatz der Stationsmessung eine Rolle. Für die Interpolation eines Punktes werden dabei nur Stationen im Umkreis von 50 km herangezogen. Betrachtet wird außerdem nur die jeweils aktuellste Messung einer Station, wobei diese bezogen auf die aktuelle Analysezeit maximal 45 min zurückliegen darf.

In orographisch gegliederten Regionen ist eine reine horizontale Interpolation häufig nicht ausreichend. Zusätzlich müssen auch höhenbedingte Variationen der Temperatur berücksichtigt werden. Dies geschieht im Zuge der räumlichen Interpolation anhand eines räumlich festen aber zeitlich variablen vertikalen Temperaturgradienten. Dieser wird für jeden Zeitpunkt aus den Temperatur- und Höhenunterschieden der Stationsmessungen untereinander abgeleitet und räumlich gemittelt.

#### 4.2 Vorverarbeitung und Korrektur der NWV-Daten

Die Feuchttemperatur ist ein Parameter, der als vertikales Profil nicht Teil der direkten ICON-D2-Ausgabedaten ist und daher aus den Profilen der Temperatur, des Drucks und der spezifischen Feuchte berechnet wird. Insbesondere beim Wechsel des Modelllaufs führte eine direkte Nutzung dieser, mit stündlicher Auflösung bereitgestellten, dreidimensionalen Felder in der Vergangenheit regelmäßig zu Sprüngen zwischen direkt aufeinanderfolgenden HymecNG-Ergebnissen. Dieser Effekt wird durch eine lineare zeitliche Interpolation der Eingangsfelder inzwischen erheblich abgemildert. Für die räumliche Interpolation der abgeleiteten Profile der Feuchttemperatur vom Modellgitter auf das feinere Zielgitter ist ein einfaches *Nearest-Neighbor-Mapping* zweckmäßig. Anschließend wird das digitale Höhenmodell des Zielgitters angewendet, um eine geeignete untere Grenze des Profils zu bestimmen. Ortsabhängig erfolgt dies entweder durch Abschneiden der untersten Modellschichten oder durch lineare Extrapolation.

Nicht immer bilden die NWV-Daten den aktuellen Zustand der Troposphäre mit hinreichender Genauigkeit ab. Teilweise resultiert dies aus den allgemeinen Unsicherheiten bei der numerischen Modellierung, nicht selten ergeben sich Unschärfen auch durch den Versatz zwischen aktuellem Zeitpunkt und Startzeitpunkt des aktuell verfügbaren Modelllaufs. Bei der derzeitigen Modellkonfiguration (Modelllauf alle 3 h, Latenz ca. 1 h) muss hier teilweise auf eine 4-h-Vorhersage zurückgegriffen werden. Naturgemäß sind die Ungenauigkeiten im Bereich der Grenzschicht am

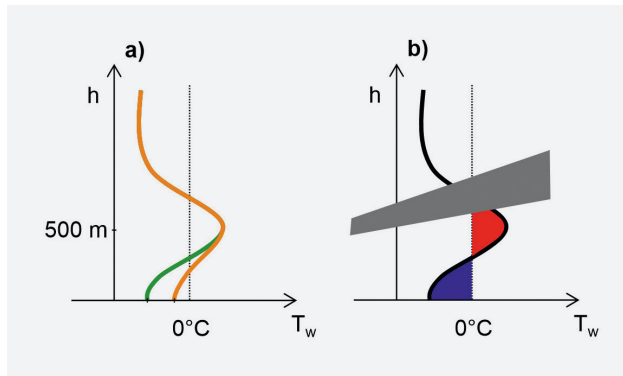


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung eines beispielhaften Vertikalprofils der Feuchttemperatur  $T_w$ . a) Prinzip der höhenabhängigen Korrektur bis 500 m über Grund anhand des Vertikalprofils der NWV ohne Korrektur (orangefarbene Linie) und mit Korrektur (grüne Linie). b) Bestimmung der Schmelzfläche (rote Fläche) und Gefrierfläche (blaue Fläche) aus dem korrigierten Profil der Feuchttemperatur (schwarze Linie) unterhalb des in grau symbolisierten Radarstrahls.

Größen. Diese versuchen wir unter Verwendung der interpolierten Stationsdaten mittels einer einfachen Biaskorrektur zu reduzieren. Dafür wird für jeden Gitterpunkt die Differenz der Feuchttemperatur zwischen dem interpolierten Stationswert und dem interpolierten NWV-Wert der untersten Schicht bestimmt und höhenabhängig dem NWV-Profil aufgeprägt. Die Stärke der Korrektur ist dabei am Boden maximal und nimmt linear mit der Höhe ab, wobei die Anpassung auf eine Höhe bis 500 m über Grund begrenzt ist. Die Vorgehensweise bildet ab, dass die Messdaten der Wetterstationen in Bodennähe eine hohe Genauigkeit bieten, die vertikale Repräsentativität aber begrenzt ist. Das Prinzip der höhenabhängigen Korrektur ist in Abbildung 4-3 (a) schematisch dargestellt.

#### 4.3 Die Extrapolationsmethode

Die Hauptidee der Extrapolationsmethode besteht darin, zu überprüfen, inwieweit die auf Radarstrahlhöhe klassifizierten gefrorenen Hydrometeore (siehe Abschnitt 3) auf ihrem Weg zum Boden schmelzen. Im Sinne eines einfach anzupassenden und echtzeitfähigen Systems basiert der Ansatz auf empirisch bestimmten Schwellenwerten der Schmelzfläche, die den Schmelzprozess repräsentiert. Die Schmelzfläche wird als vertikales Integral der korrigierten Feuchttemperaturen im Höhenbereich zwischen Radarstrahl und Boden bestimmt, wobei nur Schichten mit einer Feuchttemperatur oberhalb der Schmelztemperatur von Wasser ( $> 0\text{ }^\circ\text{C}$ ) berücksichtigt werden. In Abbildung 4-3 (b) ist das Konzept der Schmelzfläche (rote Fläche) schematisch dargestellt. Die Schwellenwerte, die erreicht werden müssen, damit von einem Schmelzen ausgegangen wird, hängen vom konkreten Hydrometeorotyp ab. Sie wurden im Rahmen eines mehrjährigen Evaluierungsprozesses empirisch geschätzt und iterativ anhand von Stationsdaten und anderer Beobachtungsdaten der Niederschlagsart immer weiter verbessert.

Ergibt die Extrapolation, dass in Bodennähe von flüssigem Niederschlag (Sprühregen/Regen) auszugehen ist, wird das Ergebnis anschließend auf das Potential für gefrierendem Niederschlag hin überprüft. Hier nutzen wir das Konzept der Gefrierfläche, die im Höhenbereich zwischen Radarstrahl und Boden ausschließlich Schichten mit einer Feuchttemperatur  $< 0\text{ °C}$  berücksichtigt. Die Gefrierfläche kann als Pendant zur Schmelzfläche verstanden werden und ist in Abbildung 4-3 (b) als blaue Fläche dargestellt. Anhand einer Kombination von Schwellenwerten der Gefrierfläche und der Feuchttemperatur in 2 m über Grund ergibt sich dann, inwieweit das Klassifikationsergebnis in gefrierendem Sprühregen/Regen abgeändert wird. Der Begriff „Gefrierfläche“ ist hier zwar zweckmäßig, tatsächlich beschreibt der Ansatz aber lediglich das Potential für Unterkühlung von flüssigen Niederschlagsteilchen und nicht deren (Wieder-)Gefrieren zu Eiskörnern. Dieser Effekt ist bei besonderen Temperaturschichtungen zu beobachten, wenn flüssiger Niederschlag in eine bodennah sehr kalte Schicht fällt, in der beispielweise Temperaturen unterhalb von  $-5\text{ °C}$  herrschen. Diese Konstellation tritt in Mitteleuropa sehr selten auf. Deutlich häufiger erreichen die unterkühlten Tropfen den Boden und Gefrieren bei Kontakt mit der Oberfläche, was schon bei geringen Niederschlagsmengen zu Glatteisbildung auf Straßen und Wegen führen kann.

Die HymecRS-Klassen „nasser Hagel“, „Hagel“ und „großer Hagel“ werden in den Ausgabedaten von HymecNG derzeit in einer gemeinsamen Hagelklasse zusammengefasst. Hier sind weitere Untersuchungen nötig, um den Mehrwert einer Aufteilung beurteilen zu können. Zudem werden Schmelzvorgänge derzeit nur für die Klasse „nasser Hagel“ berücksichtigt und bei den anderen Hagelklassen, auch vor dem Hintergrund des geringeren Schmelzpotentials aufgrund hoher Fallgeschwindigkeiten, vernachlässigt.

Darüber hinaus werden verschiedene Schwellenwerte der horizontalen Reflektivität verwendet, um eine Unterteilung in (gefrierenden) Regen und (gefrierenden) Sprühregen vorzunehmen. Außerdem wird extrem schwacher Niederschlag, der im Höhenbereich zwischen Radarstrahl und Boden häufig verdunstet/sublimiert, als „kein Niederschlag“ eingestuft.

Als erweiterte Anwendung der vorgestellten Extrapolationsmethode wird die Höhe der Schneefallgrenze mittels Schmelzflächenansatz abgeleitet. Dabei entspricht die Schneefallgrenze der Höhe des erstmaligen Überschreitens (bei vertikaler Integration von oben nach unten) des Schwellenwerts für den Übergang von Schnee in Regen. Im ICON-D2 wird im Gegensatz dazu bei ansonsten ähnlicher Vorgehensweise ein fester Schwellenwert der Feuchttemperatur verwendet. Insbesondere bei isothermen Schichtungen, bei denen die Feuchttemperatur um den Schwellenwert herum schwankt, können dadurch teils große räumliche Sprünge in der bestimmten Schneefallgrenze auftreten. Dieser Effekt kann durch den vorgestellten Schmelzflächenansatz reduziert werden. Zusätzlich

führt die Verwendung von korrigierten Vertikalprofilen der Feuchttemperatur durch den Einfluss der aktuellen Messungen in manchen Fällen zu einer genaueren Bestimmung der Schneefallgrenze. Genutzt wird diese im jeweils darauffolgenden Zeitschritt als Eingangsgröße der Hydrometeoriklassifikation auf Radarstrahlhöhe (siehe Abschnitt 3.1).

#### 4.4 Fallstudie

Um einen Eindruck vom Verfahrensablauf und den Ergebnissen der Hydrometeoriklassifikation in Radarstrahlhöhe und am Boden zu erhalten, ist in Abbildung 4-4 ein besonders prägnantes Fallbeispiel vom 17. Januar 2024 um 13 UTC dargestellt. In zuvor eingeflossener polarer Kaltluft entwickelte sich quer über Deutschland eine Tiefdruckrinne, an deren Vorderseite mit südwestlicher Anströmung in der unteren und mittleren Troposphäre sehr warme Luft nach Norden geführt wurde. Gleichzeitig konnte sich bodennah die Kaltluft länger halten, wodurch sich eine Unwetterlage mit gefrierendem Regen einstellte. Über dem Südwesten gingen die Niederschläge im Laufe des Tages mit Einfließen von bodennah milderer Luft in Regen über, wohingegen in der Mitte (vor allem über Rheinland-Pfalz und Hessen) die Grenzwitterlage mit Glatteisregen bis in den extremen Unwetterbereich den gesamten Tag anhielt. Nördlich davon gab es markante Schneefälle.

Das Vordringen der Warmluft nach Norden ist in Abbildung 4-4 am Komposit der Schneefallgrenze (a) erkennbar. Die Schneefallgrenze liegt im Südwesten Deutschlands teils über 2000 m, während sie im Norden und der nördlichen Mitte bis zum Boden reicht. Die räumlich interpolierten 2-m-Feuchttemperaturen der Wetterstationen (b) zeigen die Regionen mit bodennaher Kaltluft unter  $0\text{ °C}$ . Auch hier ist ersichtlich, dass sich im Südwesten bereits deutlich mildere Luft durchgesetzt hat. Naturgemäß passiert dies bei derartigen Wetterlagen zuerst in den höheren Lagen. Über Teilen der Mitte, sowie dem Osten Bayerns sind bei Schneefallgrenzen vielfach über 1000 m verbreitet negative Temperaturen am Boden vorzufinden. Im Komposit der horizontalen Reflektivität (c) sind im Umfeld der Radarstandorte Neuheilenbach (westliches Rheinland-Pfalz), Offenthal (Südhessen), sowie Eisberg und Isen (Ost- und Südbayern) ringförmig angeordnete Zonen mit erhöhter Reflektivität erkennbar. Diese zeigen sehr gut den Bereich der Schmelzschicht und damit, rein messungsbasiert, das Vorhandensein von Warmluft in größerer Höhe. In der Hydrometeoriklassifikation auf Radarstrahlhöhe (d) wird hier korrekterweise die Klasse „nasser Schnee“ und näher am Standort (d. h. niedrigere Höhe des Radarstrahls) „Regen“ klassifiziert. Die Luftmassengrenze bildet sich mit einem scharfen Gradienten in der berechneten Schmelzfläche (e) ab und folgt in etwa dem Verlauf des Übergangsbereichs zwischen aufliegender und abgehobener Schneefallgrenze. Die inselartigen Gebiete mit sehr niedrigen Schmelzflächen zum Beispiel über Südhessen ergeben sich durch die niedrige Höhe des Radarstrahls in der Nähe des Radarstandorts. Das Zusammenwirken der verschiedenen gezeig-

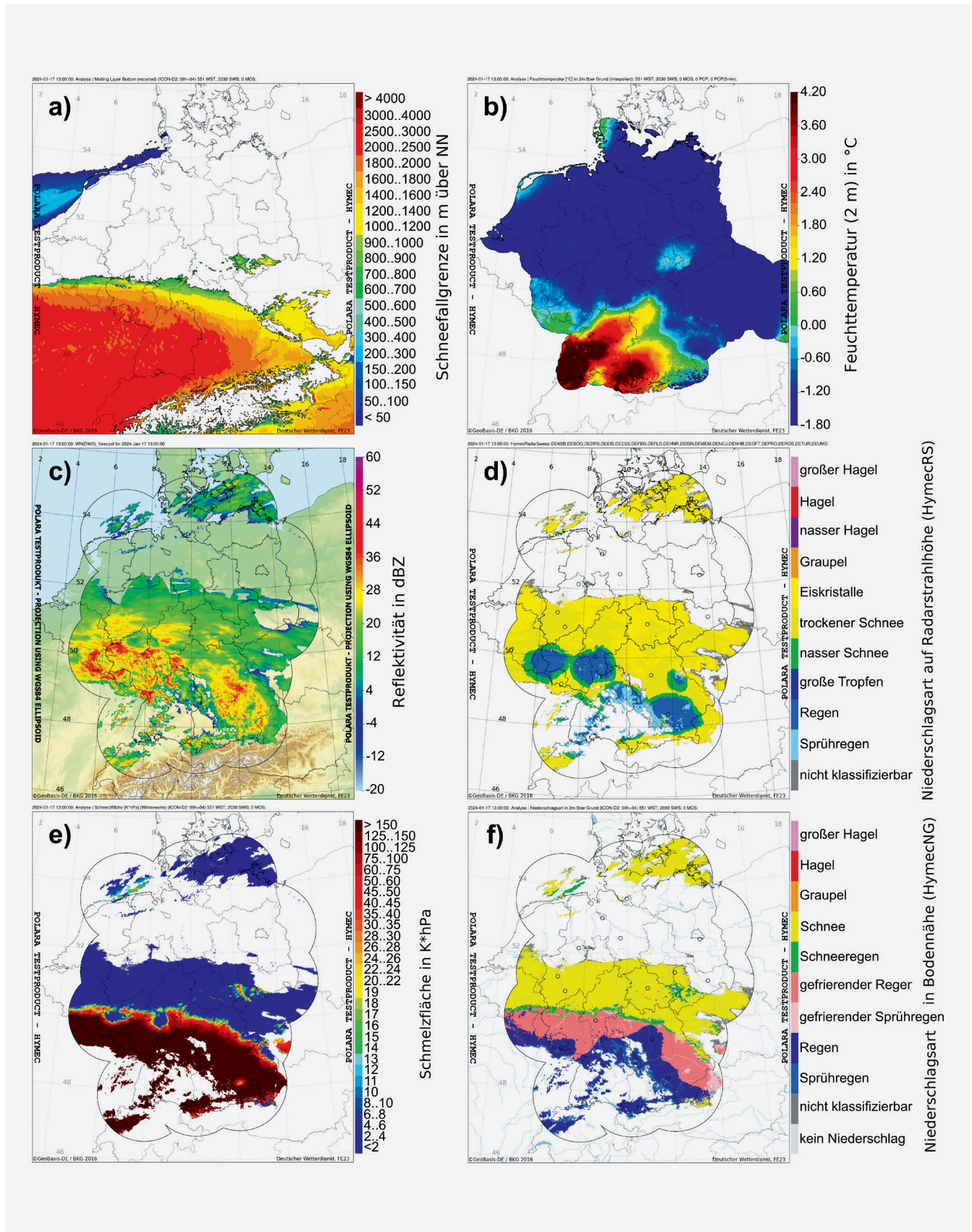


Abbildung 4-4: Fallbeispiel vom 17.01.2024, 13 UTC mit Komposit aller wesentlicher Verfahrenskomponenten zur Bestimmung der bodennahen Niederschlagsart. Dargestellt sind: (a) aus korrigierten ICON-D2-Profilen abgeleitete Schneefallgrenze, (b) räumlich interpolierte Feuchttemperatur in 2 m Höhe basierend auf Messungen von Wetterstationen, (c) horizontale Reflektivität des Niederschlagsans aller Radare, (d) HymecRS: Hydrometeoriklassifikation auf Radarstrahlhöhe, (e) berechnete Schmelzfläche aus korrigierten ICON-D2-Profilen zwischen Radarstrahlhöhe und Boden, (f) HymecNG: Niederschlagsart in Bodennähe (Daten Hintergrundkarten: GeoBasis-DE/BKG 2016).

ten Einflussfaktoren sowie der Gefrierfläche bestimmen schließlich die abgeschätzte Niederschlagsart am Boden (f). Diese zeigt deutlich die Staffelung mit Regen, gefrierendem Regen, Schneeregen und Schnee von Südwest nach Nordost. Insgesamt gibt es eine hohe Übereinstimmung mit den (hier nicht gezeigten) Messungen der hauptamtlichen Stationen und den Nutzermeldungen aus der WarnWetter-App des DWD.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Verfahrenskette bestehend aus HymecRS und HymecNG zeichnet sich vor allem durch ihre verschiedenartigen Eingangsdaten und derer anwendungsspezifischen Verarbeitung aus. Ihre Nutzung ist darauf ausgerichtet, die jeweiligen Schwächen und Stärken der Datenarten möglichst gut miteinander zu kombinieren. So trägt beispielsweise die bodennahe Korrektur der NWV-Profilen mit aktuellen Messdaten in vielen Fällen zu einer genaueren Bestimmung der bodennahen Niederschlagsart bei.

Die HymecNG-Ergebnisse stehen einem großen DWD-internen und externen Nutzerkreis entweder direkt, oder in Form von kombinierten Produkten zur Verfügung. Zur Unterstützung des Vorhersage- und Warndienstes sowie der Flugwetterberatung sind die Produkte im Visualisierungssystem NinJo integriert und werden rund um die Uhr in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Sie finden auch Verwendung als Eingangsdaten im integrierten Nowcasting-System NowCastMIX, welches zur Unterstützung des Warndienstes im DWD automatisiert optimierte Warnvorschläge generiert. Einer breiten Öffentlichkeit sind die HymecNG-Daten über das Open-Data-Portal des DWD zugänglich. Sie werden außerdem in der WarnWetter-App des DWD visualisiert.

In vielen Situationen liefert HymecNG gute und plausible Ergebnisse. Bei bestimmten Konstellationen können allerdings schon minimalste Unschärfen beispielsweise im Vertikalprofil der Feuchttemperatur zu falschen Klassifikationen führen. Wir versuchen daher die gesamte Prozesskette kontinuierlich zu verbessern. Aktuell befinden sich zwei Weiterentwicklungen in der internen Evaluierung. Sie umfassen die Einbeziehung von unterkühlten Tropfen in HymecRS, sowie die explizite Berücksichtigung von Verdunstung zwischen Radarstrahlhöhe und Boden.

In Planung befindliche Weiterentwicklungsschritte betreffen die Schmelzflächen-Schwellenwerte in HymecNG. Feste Werte können nicht in allen Situationen die tatsächlichen Verhältnisse repräsentieren. Orts- und zeitabhängige Schwellenwerte versprechen hier Verbesserungspotential. Auch die Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens ist für diesen Zweck möglich. In HymecRS besteht zudem Optimierungsbedarf bei der Erkennung von nassem Schnee im Bereich der Schmelzschicht. Manchmal wird ihre vertikale Mächtigkeit nicht korrekt abgebildet, was

sich vor allem auch negativ auf die quantitative Niederschlagsabschätzung auswirken kann.

Die Verwendung des im SINFONY-Projekt entwickelten ICON *Rapid Update Cycle* (ICON-RUC; siehe Beitrag 1 in diesem Heft) mit stündlich neuen Vorhersagen bietet Verbesserungspotential bei der Bestimmung der Niederschlagsart. Optimierte für sommerliche Konvektion, kann die häufigere Aktualisierung doch insbesondere auch bei sehr dynamischen Wetterlagen durch die Assimilation aktueller Beobachtungsdaten mitunter einen Mehrwert bieten. Perspektivisch ist auch die Erweiterung des gesamten Verfahrens zu einem Ensemble-System, sowie die nahtlose Kombination mit der Wetterinterpretation der ICON-Modellkette denkbar.

## Literatur

- BLOEMINK, H.I., LANZINGER, E., 2005: Precipitation type from the Thies disdrometer. In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation. *Instruments and Observing Methods Report* **82**, 407–413, URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/41919>, Abruf: 15.07.2024.
- MOSIER, R.M., SCHUMACHER, C., ORVILLE, R.E., CAREY, L.D., 2011: Radar nowcasting of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. *Weather and Forecasting* **26**, 199–212, <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222431.1>.
- PARK, H.S., RYZHKOV, A.V., ZRNIĆ, D.S., KIM, K.E., 2009: The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Weather and Forecasting* **24**, 730–748, <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222205.1>.
- SPITZER, A., KEMPF, H., JERG, M., BLAHAK, U., 2023: DWD-Crowdsourcing: User Reports available on Open Data. EMS Annual Meeting 2023, Bratislava, Slovakia, 4–8 Sep 2023, <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/ems2023-677>.
- STEINERT, J., TRACKSDORF, P., HEIZENREDER, D., 2021: Hymec: Surface Precipitation Type Estimation at the German Weather Service. *Weather and Forecasting* **36**, 1611–1627, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0232.1>.
- STRAKA, J.M., ZRNIĆ, D.S., RYZHKOV, A.V., 2000: Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations. *Journal of Applied Meteorology* **39**, 1341–1372, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1341:BHCAQU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1341:BHCAQU>2.0.CO;2).
- ZÄNGL, G., REINERT, D., RÍPODAS, P., BALDAUF, M., 2015: The ICON (ICOSahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **141**, 563–579, <https://doi.org/10.1002/qj.2378>.

## **Kontakt**

MARKUS SCHULTZE  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
markus.schultze@dwd.de

JÖRG STEINERT  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung für Meteorologische  
Arbeitsplätze  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
joerg.steinert@dwd.de

## 5

S. TRÖMEL, J. CHEN, C. CHWALA, M. GOTTSCHALK, E. WEIGL, T. WINTERRATH

# Quantitative Niederschlagsschätzung (QPE)

## Quantitative Precipitation Estimation (QPE)

### Zusammenfassung

Die Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen stellt immer größere Anforderungen an die flächendeckende Niederschlagsschätzung bezüglich der Genauigkeit und ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen auf die bestmögliche Ausnutzung moderner polarimetrischer Radarnetzwerke ab und entwickeln hybride Niederschlagsalgorithmen. Zusätzliche Profilkorrekturen berücksichtigen einen möglichen Bias, wenn das Radar nicht in ausreichender Bodennähe scannt. Beispielsweise können bestimmte Niederschlagsprozesse auch noch unterhalb der Schmelzschicht eine signifikante Änderung der Niederschlagsmenge bewirken oder die Niederschlagsschätzung wird bei einem Scan in oder oberhalb der Schmelzschicht durch unterschiedliche Rückstreustärken der Hydrometeore erschwert. Parallel werden Radarniederschlagsfelder an Bodenmessungen angeeicht. Die Idee ist die synergistische Nutzung flächendeckender, indirekter Radarmessungen mit den direkten Pluviometermessungen von lokal höherer Genauigkeit. Jüngst werden zusätzlich auch Daten von opportunistischen Messverfahren, wie z. B. von Richtfunkstrecken der Mobilfunkanbieter für die Aneichung genutzt. Insbesondere hinsichtlich operationeller Niederschlagsschätzung nahe Echtzeit und hoher Ansprüche an die räumliche und zeitliche Auflösung und Genauigkeit ist die parallele Betrachtung und Weiterentwicklung sowohl von polarimetrischen Schätzern als auch von Aneichverfahren zu empfehlen.

### Summary

The increase in extreme precipitation places ever greater demands on area-wide precipitation estimation in terms of accuracy and its spatio-temporal resolution. Research and development efforts aim at the best possible exploitation of modern polarimetric radar networks and develop hybrid precipitation algorithms. Additional profile corrections account for possible biases when the radar does not scan at sufficient ground proximity. For example, certain precipitation processes can still cause a significant change in the amount of precipitation even below the melting layer, or precipitation estimation is made difficult due to different backscatter intensities of hydrometeors in or above the melting layer. In parallel, radar precipitation fields are adjusted to ground measurements. The idea is the synergistic use of area-wide, indirect radar measurements with direct pluviometer measurements of locally higher accuracy. Recently, data from opportunistic measurements methods, i.e. microwave links of commercial mobile tele-communication networks are additionally used for calibration. Especially with respect to operational near real-time precipitation estimates and high demands on spatio-temporal resolution and accuracy, the parallel consideration and further development of polarimetric estimators and adjustment methods is recommended.

### 1 Aktuelle Herausforderungen der flächendeckenden, quantitativen Niederschlagsschätzung

Laut IPCC wirkt sich der vom Menschen verursachte Klimawandel bereits jetzt auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus und seit dem Fünften Sachstandsbericht (AR5; IPCC 2013) gibt es nochmal stärkere Belege für beobachtete Veränderungen von Extremen. Damit steigen die Anforderungen an die flächendeckende, zugleich aber auch raum-zeitlich hochaufgelöste und quantitativ genaue Beobachtung und Vorhersage von Extremniederschlägen und Überschwemmungen. Beeinträchtigungen und Gefahren für den Menschen resultieren

sowohl aus sich schnell entwickelnden, kleinskaligen konvektiven Zellen hoher Intensitäten (z.B. die Ereignisse in Braunsbach am 29.05.2016 und Simbach am 01.06.2016), als auch von langanhaltenden, weitestgehend stratiformen Ereignissen (z.B. Ahrtal-Flut im Juli 2021).

Damit stellt sich die Frage nach der geeigneten Sensorik und optimalen Algorithmenentwicklung. Die traditionellen Niederschlagsmesser am Boden stellen mit den operationellen Radarnetzwerken und opportunistischen Richtfunkmessungen ein heterogenes, zugleich aber auch synergistisches Ensemble individueller Vorteile, Herausforderungen und Entwicklungszustände dar.

Die bodengebundene Niederschlagsmessung liefert zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen direkter Punktmessungen, die trotz Fehlerquellen wie Wind und Verdunstung eine größere lokale Genauigkeit liefern als indirekte Messungen. Operationelle Radarnetzwerke mit Geräten im S-, C- oder X-Band-Bereich (entspricht Radarwellenlängen von ca. 11, 5 oder 3 cm) scannen flächendeckend und heutzutage mit 5-minütiger Auflösung. Das heißt, sie produzieren alle 5 Minuten einen sogenannten „Volumenscan“ mit verschiedenen Neigungswinkeln der Antenne. Daraus erhält man ein dreidimensionales Bild der Streusignale von den umgebenden Hydrometeoren. Eine weitere Scanmethode ist der „Niederschlagsscan“, ein Radarscan bei sehr flachem Neigungswinkel, der beim DWD der Orografie (z.B. Gebirgskanten) folgt.

Die konventionellen Wetterradare liefern als indirekte Messgröße insbesondere den horizontalen (linearen) Radarreflektivitätsfaktor  $z_H$  [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ], der aufgrund des großen Wertebereichs alternativ zumeist als logarithmischer Radarreflektivitätsfaktor  $Z_H$  [dBZ] angegeben wird. Von  $z_H$  kann über Potenzgesetze auf die Regenrate  $R$  [mm/h] geschlossen werden. Das Dilemma der radarbasierten Niederschlagsschätzung liegt jedoch in der starken Abhängigkeit der sogenannten  $z_H$ - $R$ -Beziehungen (Potenzgesetze) von der zeitlich und räumlich variablen Tropfengrößenverteilung (*dropsize distribution*, DSD); große Unterschiede herrschen beispielsweise zwischen den Beziehungen für stratiformen und konvektiven Regen. Die Variabilität der Tropfengrößenverteilung und Dämpfung des Radarsignals bei Regen stellen zusammen die Hauptfehlerquellen dieser indirekten Radarmessungen dar. Beeinträchtigungen der Messungen durch die Schmelzschicht, Hagel, nicht-meteorologische Streuer (z.B. Gebäude) oder Fehlkalibration sind weitere beispielhafte Fehlerquellen. Mittels zusätzlicher Information von polarimetrischen Radaren können einige Fehlerquellen zumindest reduziert werden, z.B. weisen Niederschlagsbestimmungen mit polarimetrischen Radarvariablen eine geringere DSD-Abhängigkeit auf und sind unabhängig von einem Kalibrierungsbias (trifft auf phasenabhängige Variablen wie die spezifische differentielle Phase  $K_{DP}$  zu). Dämpfungseffekte können ebenso korrigiert werden, auch wenn gerade in starken konvektiven Ereignissen Unsicherheiten verbleiben können (siehe Abschnitt 2.1). Weitere Fehlerquellen resultieren aus der zeitlich-räumlichen Auflösung der Radarmessung und aus der Messgeometrie, welche die Bodenniederschlagsschätzung durch das Messen in zunehmender Höhe mit zunehmender Entfernung vom Radar erschwert. Entfernte Streusignale geben dabei aufgrund ihrer Höhe über dem Boden nicht zwingend den realen Niederschlag am Boden wieder. Stattdessen können in 1–2 km Höhe noch Verdunstungs- oder Niederschlag generierende Prozesse (Bereifung, depositionelles Wachstum) stattfinden. Zusätzliche Profilkorrekturen sind nötig, um bestmögliche bodennahe Schätzungen zu erhalten (siehe Abschnitt 3).

Um die oben genannten Fehler im Radarniederschlag zu minimieren, kann neben den bereits angedeuteten Korrek-

turen das Radarniederschlagsfeld alternativ oder zusätzlich an bodengebundene Messungen angeglichen werden (siehe Abschnitt 4). Man spricht hierbei von einer Aneichung. Diese wird meist auf stündlicher Basis mit einem möglichst dichten Messnetz an Pluviometern durchgeführt (siehe Abschnitt 4.1). Insbesondere bei kleinskaligen konvektiven Ereignissen limitiert die endliche Stationsdichte jedoch die Qualität der Aneichung. Daher wird versucht, weitere Datenquellen hinzuzuziehen. So liefern Richtfunkstrecken von Mobilfunkanbietern (*Commercial Microwave Links*, CMLs) opportunistische Messungen des Niederschlags, zumeist bei Frequenzen zwischen 15 und 80 GHz, und werden heutzutage zunehmend für die Niederschlagsschätzung eingesetzt. Sie stellen eine Art Zwischenform der beiden Systeme, Radare und Niederschlagsmesser am Boden, dar. Auf Basis der Dämpfung des Signals entlang von Richtfunkstrecken zwischen ca. 100 m und 30 km Länge können mittlere Regenraten entlang dieser Wegstrecken mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu zehn Sekunden abgeleitet werden. Diese Messungen sind bodennah, liegen in großer Anzahl vor (mehrere 10.000 sind für das Mobilfunknetz in Deutschland in Betrieb) und sind analog zur Messung der spezifischen Dämpfung  $A$ , die auch auf Basis polarimetrischer Wetterradare abgeleitet werden können und in Beziehung zur Regenrate stehen (siehe Abschnitt 2.1). CML-Messungen werden jüngst in Synergie mit Niederschlagsmessern am Boden zur Aneichung flächendeckender Radarmessungen verwendet. Alternativ gibt es Bestrebungen durch Abgleich von CML- und radarbasierten Dämpfungsmessungen die radarpolarimetrische Niederschlagsmessung zu verbessern (TRÖMEL et al. 2014).

Um den Anforderungen zeitlich und räumlich hochaufgelöster flächendeckender Niederschlagsmengen gerecht zu werden, sind verschiedene Methoden und ihre Kombination in der Anwendung und Weiterentwicklung und werden in diesem Artikel zur quantitativen Niederschlagsschätzung in ihren Grundzügen erläutert. Der Mehrwert polarimetrischer Niederschlagsalgorithmen wird in Abschnitt 2 dargelegt, die Profilkorrektur der Radarmessungen zur bestmöglichen Niederschlagsschätzung am Boden trotz Limitierungen durch die Messgeometrie und begrenzter Dichte von Radaren folgt in Abschnitt 3, während zuletzt Abschnitt 4 die Aneichung der radarbasierten Regenraten beschreibt.

## 2 Polarimetrische quantitative Niederschlagsschätzung

Erste Herangehensweisen, um mittels polarimetrischer Radarmessungen zu genaueren Niederschlagsschätzungen zu gelangen, bestehen in der Anwendung verschiedener  $z_H$ - $R$ -Beziehungen für verschiedene Hydrometeorotypen. Mittels der Fuzzy-Logik-Methode können die multivariaten polarimetrischen Radarmessungen zumeist den dominanten Hydrometeorotyp im aufgelösten Radarbin identifizieren und erlauben somit anschließend beispiels-

weise für Schnee, moderaten oder intensiven konvektiven Regen mit möglichen Hageleinflüssen unterschiedliche  $z_H$ - $R$ -Beziehungen anzuwenden (siehe Beitrag 4 in diesem Heft). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) testet unterschiedliche Beziehungen für festen Niederschlag, für Messungen in der Schmelzschicht (im Bereich der 0 °C-Grenze) und für flüssigen Niederschlag. Für Letzteres erfolgt eine genauere Differenzierung entsprechend Intensität und räumlicher Niederschlagsstruktur (stratiform versus konvektiv). Diese sogenannte verfeinerte  $z_H$ - $R$ -Beziehung (BARTELS et al. 2004) wird derzeit im DWD operationell genutzt. In Abhängigkeit des Reflektivitätswertes werden drei Kategorien mit unterschiedlichen  $z_H$ - $R$ -Beziehungen gebildet, wobei die niedrigste Kategorie ( $Z_H < 36,5$  dBZ) erneut in drei Unterkategorien entsprechend des räumlichen Reflektivitätsgradienten (sog. Shower-Index) mit spezifischen  $z_H$ - $R$ -Beziehungen unterteilt wird.

Im Folgenden soll anstatt der vorgeschalteten Hydrometeoriklassifikation, die direkte Ausnutzung der polarimetrischen Radarvariablen zur Reduktion der Messfehler und genaueren Niederschlags-schätzung beleuchtet werden. Abschnitt 2.1 beschreibt für alle polarimetrischen Radarvariablen die für die quantitative Niederschlags-schätzung relevanten Charakteristika und Vorteile, während dann entsprechend in Abschnitt 2.2 Schlussfolgerungen für hybride Niederschlagsalgorithmen getroffen werden.

## 2.1 Relevante Charakteristika der polarimetrischen Radarvariablen

Die differentielle Reflektivität  $Z_{DR}$  [dB] ist gegeben durch das Verhältnis der linearen horizontalen und vertikalen Reflektivitäten ( $Z_{DR} = z_H/z_V$ ) und gibt Aufschluss über die Form der Hydrometeore. Beispielsweise bekommen Regen-

tropfen mit zunehmender Größe eine oblatere Form, was zu einem höheren Wert für  $z_H$  als für  $z_V$  und damit zu einem größeren  $Z_{DR}$ -Wert führt. In reinem Regen stellt  $Z_{DR}$  somit die durchschnittliche Größe der Regentropfen innerhalb eines Radarabstastvolumens dar (SELIGA und BRINGI 1976). Die Kombination von  $Z_{DR}$  und  $z_H$  (oder  $Z_H$ ) für die Niederschlags-schätzung, d. h. die Verwendung von  $R(Z_H, Z_{DR})$ -Beziehungen, liefert somit bereits eine Möglichkeit die DSD-Variabilität zu berücksichtigen.  $Z_{DR}$  ist auch wertvoll für die Hydrometeoriklassifikation (HCA, siehe oben). So erzeugen zufällig taumelnde Hagelkörner  $Z_{DR}$ -Werte nahe Null, jedoch in Kombination mit hohen  $Z_H$ -Werten. Diese auf den Signalstärken in beiden Kanälen (horizontal und vertikal) beruhende Variable erfordert jedoch eine hohe relative Genauigkeit von ca. 0,1 dB. Es sind also hohe Anforderungen an die Kalibrierung gestellt und eine sorgfältige Korrektur der differentiellen Dämpfung muss durchgeführt werden. Insbesondere bei kurzen Wellenlängen (X- und C-Band) sind die durch die Dämpfung verursachten Unsicherheiten stärker ausgeprägt.

Die spezifische differentielle Phase  $K_{DP}$  [deg/km] ist eine auf den Messungen der Phasendifferenzen in beiden Kanälen basierte Beobachtungsgröße. Sie ist somit nicht beeinträchtigt durch Ungenauigkeiten in der Signalstärke (d. h. der Kalibrierung, Dämpfung, teilweise Strahlabschattung durch Gebäude oder Vegetation, Effekte eines nassen Radoms) und zeigt eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber der DSD-Variabilität als  $Z_H$  (Abbildung 5-1). Darüber hinaus liefert  $K_{DP}$  in Mixturen von Regen mit Hagel bessere Niederschlags-schätzer als  $Z_H$  (BALAKRISHNAN und ZRNIĆ 1990). Diese Vorteile führten zu einer zunehmenden Popularität von  $R(K_{DP})$  in den letzten Jahren. Bei geringem Niederschlag ist die differentielle Phasenverschiebung  $P_{DP}$  und damit auch  $K_{DP}$  jedoch klein und verrauscht. Eine verstärkte räumliche

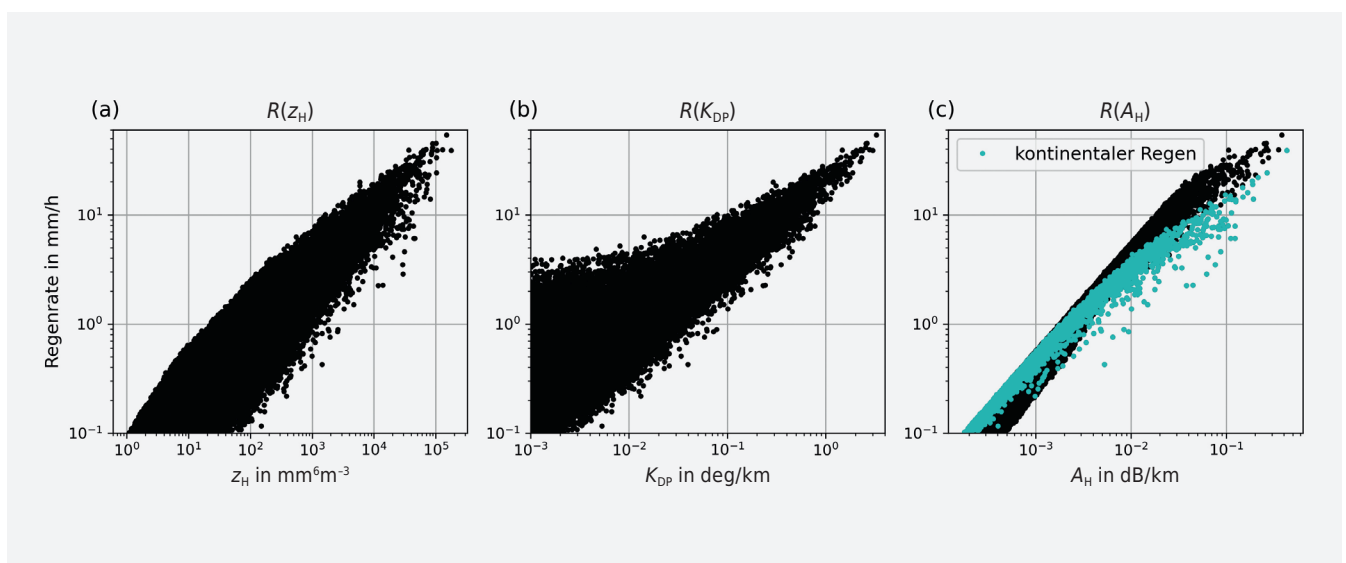


Abbildung 5-1: Mit T-Matrix-Simulationen auf Basis von Distrometermessungen erzeugte Streudiagramme. Die simulierte Regenrate  $R$  ist aufgetragen gegenüber a) der linearen horizontalen Reflektivität  $z_H$ , b) der spezifischen differentiellen Phase  $K_{DP}$ , und c) der spezifischen Dämpfung bei horizontaler Polarisation  $A_H$ . Die cyanfarbenen Punkte in c) markieren kontinentalen Regen.

Glättung zur Rauschunterdrückung hat jedoch eine geringere räumliche Auflösung der  $R(K_{DP})$ - im Vergleich zu  $R(z_H)$ -Feldern zur Folge. Zu beachten ist ebenso, dass  $K_{DP}$  umgekehrt proportional zur Radarwellenlänge ist, wodurch  $R(K_{DP})$  besonders für C- und X-Band-Radare geeignet ist.

Die spezifische Dämpfung  $A_H$  (der Index H deutet an, dass wir hier die Ableitung bei horizontaler Polarisation verwenden) ist eine weitere, auf der Phaseninformation basierende Radarvariable, welche viele Probleme der Niederschlagschätzung zu überwinden scheint (DIEDERICH et al. 2015; RYZHKOV et al. 2014).  $R(A_H)$  birgt nicht nur alle Vorteile von  $R(K_{DP})$ , sondern zeigt zusätzlich auch bei leichtem bis mäßigem Regen gute Ergebnisse und gewährleistet eine hohe radiale Auflösung. Darüber hinaus ist die  $R(A_H)$ -Beziehung von allen in Abbildung 5-1 aufgeführten diejenige mit der geringsten Sensitivität gegenüber der DSD-Variabilität. Bei der Verwendung mit S-Band-Radaren zeigen  $R(A_H)$ -Beziehungen sowohl bei tropischem als auch bei kontinental charakterisiertem Niederschlag robuste Ergebnisse. Sogenannter tropischer Regen wird hauptsächlich durch den Warmregenprozess erzeugt und ist durch eine hohe Konzentration kleinerer Tropfen gekennzeichnet, während der kontinentale Regen größtenteils über die Eisphase erzeugt wird und einen hohen Anteil großer Regentropfen enthält. Im C-Band, der für das operationelle Radarnetz des DWD verwendeten Wellenlänge, ergeben sich jedoch einige Einschränkungen. Während bei geringen Intensitäten die  $R(A_H)$ -Beziehung für beide Regentypen nahezu linear ist, zeigt die  $R(A_H)$ -Beziehung bei starkem kontinentalen Regen aufgrund von Resonanzeffekten im C-Band wieder eine größere Sensitivität gegenüber der DSD-Variabilität (Abbildung 5-1, cyanfarbene Punkte). Solch intensiver kontinentaler Regen ist dominiert durch große Regentropfen, die aus großen Graupel- oder Hagelkörnern entstanden sind. Es sei erwähnt, dass  $A_H$  keine direkte Radarmessgröße ist, sondern aus Messungen von  $Z_H$  und  $D_{DP}$  mittels der sogenannten ZPHI-Methode (TESTUD et al. 2000) abgeleitet werden muss, die jedoch für Eis- oder Mischphasenpartikel ungültig ist. Weiterhin ist  $A_H$  stark von der Temperatur abhängig, was jedoch in der Regel nicht berücksichtigt wird.

Die Schätzung von Schneefallraten  $S$  ist noch anspruchsvoller als die Schätzung von Regenmengen mit Hagel einflüssen, da die Radarvariablen sehr sensitiv auf die Größenverteilung der Eispartikel (*Particle Size Distribution*, PSD) und ihre Variabilität in Bezug auf Dichte, Form und Ausrichtung reagieren. BUKOVČIĆ et al. (2020) schlugen  $S(z_H, K_{DP})$ - und  $S(z_{DR}, K_{DP})$ -Beziehungen vor – analog zu  $z_{H/V}$  ist hier die lineare differentielle Reflektivität mit  $z_{DR}$  ( $=10^{0.1Z_{DR}}$ ) bezeichnet –, die Veränderungen in der Form und Ausrichtung der Eispartikel zu berücksichtigen versuchen und eine verbesserte Genauigkeit gegenüber  $S(z_H)$  zeigen. Der abnehmende Informationsgehalt von  $K_{DP}$  mit zunehmenden Aggregationsprozessen von Schneeflocken zum Boden hin kann jedoch ein Nachteil von  $S(z_H, K_{DP})$  und  $S(z_{DR}, K_{DP})$  insbesondere im S-Band sein und be-

fürwortet die Verwendung von  $S(z_H)$  bei aggregiertem Schnee.

Der kopolare Korrelationskoeffizient  $\rho_{HV}$  ist ein Maß für die Einheitlichkeit der Partikel innerhalb eines bestimmten Volumens in Bezug auf ihre Form/Größe, Ausrichtung und Phasenzusammensetzung. In der Regel liegen die  $\rho_{HV}$ -Werte in Regionen außerhalb der Schmelzschicht (*Melting Layer*, ML) nahe bei eins. Innerhalb der Schmelzschicht, wo die Eispartikel zu schmelzen beginnen, können die  $\rho_{HV}$ -Werte jedoch auf etwa 0,9 sinken. Somit ist  $\rho_{HV}$  ein nützliches Werkzeug für die Detektion der Schmelzschicht und spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Kombination verschiedener polarimetrischer Niederschlagsgleichungen für unterschiedliche Hydrometeorotypen, wie sie im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

## 2.2 Die Entwicklung multivariater und hybrider Regenschätzer

Es werden hybride, d. h. kombinierte Niederschlagsalgorithmen für verschiedene Hydrometeorotypen vorgeschlagen, um die Charakteristika und Vorteile der multivariaten Radarmessungen optimal zu nutzen:

- (1) Für leichten bis mäßigen Niederschlag mit  $Z_H$  kleiner 40 dBZ wird, auch in Abhängigkeit der Qualität der  $Z_{DR}$ -Messungen, die Verwendung von  $R(Z_H)$ ,  $R(Z_H, Z_{DR})$  oder  $R(A_H)$  empfohlen (ZRNIC und RYZHKOV 1999; zunächst für S-Band, jedoch auch für C- und X-Band anwendbar).
- (2) Für starken Niederschlag oder bei Hageleinflüssen ist  $R(K_{DP})$  zu bevorzugen. Messen die Radare bei kürzeren Wellenlängen, kann  $R(K_{DP})$  für einen größeren Bereich, d. h. auch für etwas geringere Niederschlagsintensitäten angewendet werden.
- (3) Scannt das Radar innerhalb der Schmelzschicht, so sollte eine  $R(Z_H)$ -Beziehung mit einem zusätzlichen Faktor von 0,6 angewendet werden, um die erhöhten  $Z_H$ -Werte aufgrund des schmelzenden Schnees auszugleichen (GIANGRANDE und RYZHKOV 2008; Ergebnis ihrer Studie für S-Band, Annahme weiterer Anwendbarkeit für C- und X-Band).
- (4) Scannt das Radar jedoch oberhalb der Schmelzschicht (in größeren Abständen des Radars und/oder bei kühleren Temperaturen im Herbst oder Winter), wird ein empirisch bestimmter Faktor von 2,8 auf die  $R(Z_H)$ -Beziehung angewendet um die erniedrigten  $Z_H$ -Werte in Schnee zu kompensieren (GIANGRANDE und RYZHKOV 2008).
- (5) Für Schneeereignisse liefern  $S(z_H, K_{DP})$  oder  $S(z_{DR}, K_{DP})$  die besten Ergebnisse bei Messungen in größeren Höhen oder wenig aggregierten Schnee. In geringeren Höhen ist KDP jedoch wenig informativ und  $S(z_H)$  ist zu bevorzugen.

### 3 Projektionen für die beste bodennahe Schätzung

Oftmals scannt der Radarstrahl nicht in hinreichender Bodennähe, um das erfasste Radarsignal direkt in die Niederschlagsrate am Boden zu transformieren. Genauer gesagt sind Korrekturen des Vertikalprofils (VP) der Radarvariablen in zwei speziellen Szenarien nötig:

- (1) Auch bei konstanter Regenrate entlang des Profils messen Radare innerhalb der Schmelzschicht erhöhte  $Z_H$ -Werte (*Brightband*) aufgrund der teilweise angeschmolzenen Hydrometeore; oberhalb der Schmelzschicht messen sie jedoch reduzierte  $Z_H$ -Werte aufgrund der schwächeren Radarechos von Schneeflocken und Strahlaufweitungseffekten (Abbildung 5-2).
- (2) Die Regenrate ist nicht konstant entlang des Profils, sondern ändert sich noch unterhalb des Radarstrahls; beispielsweise kann sie aufgrund von Verdunstungseffekten abnehmen oder in dominierenden Warmregenprozessen zunehmen.

Im Folgenden werden beide Szenarien mit den entsprechenden Korrekturalgorithmen beschrieben.

#### 3.1 Korrektur der Messungen in und über der Schmelzschicht (Szenario 1)

Eine gängige Methode, die mit dem Radar innerhalb und oberhalb der Schmelzschicht gemessene  $Z_H$ -Bias zu korrigieren, um letztendlich mittels  $R(Z_H)$  eine vertrauenswürdige Schätzung des bodennahen Niederschlags zu erhalten, ist die Verwendung von a-priori-Informationen des Vertikalprofils der Reflektivität (VPR). Diese können aus Statistiken der Radarbeobachtungen und daraus resultierenden Modellen stammen (z. B. zur Abnahme von  $Z_H$  oberhalb der ML oder der Differenz  $Z_H^{\max} - Z_H^{\text{snow}}$ , siehe rechtes Profil in Abbildung 5-2).

In einem nächsten Schritt haben RYZHKOV et al. (2022) die erste polarimetrische Korrektur des Vertikalprofils der Reflektivität (PVPR) eingeführt. Die Methode modelliert zunächst das intrinsische VPR als stückweise lineare Funktionen (Abbildung 5-2, rechtes Profil) von Parametern, die auf der Statistik der vertikalen Profile von  $\rho_{HV}$  beruhen (z.B.  $\rho_{HV}^{\min}$  in Abbildung 5-2, linkes Profil). Der Grund hierfür ist, dass die Bereiche der Schmelzschicht in  $\rho_{HV}$  nochmal besser als in  $Z_H$  abgegrenzt sind, und die Abnahme von  $\rho_{HV}$  in der Schmelzschicht sehr gut mit der dortigen Zunahme von  $Z_H$  korreliert ist. Anschließend werden aus den tatsächlichen intrinsischen Profilen mögliche gemessene  $Z_H$ - und  $\rho_{HV}$ -Profile in verschiedenen Abständen vom Radar unter Berücksichtigung von Strahlaufweitungseffekten simuliert. Diese Zusammenhänge zwischen intrinsischen und gemessenen Profilen werden in *Look-up-Tabellen* festgehalten. So kann nun für einen Zeitschritt, in dem die PVPR-Korrektur angewendet werden soll, aus dem aktuell gemessenen  $\rho_{HV}$ -Profil auf das intrinsische  $Z_H$ -Profil geschlossen werden und die Korrektur von  $Z_H$  in Bodennähe durchgeführt werden.

#### 3.2 Berücksichtigung bodennaher Niederschlagsprozesse (Szenario 2)

Um auch Radarmessungen unterhalb der Schmelzschicht zu korrigieren, werden mittels VP-Referenzen Radarbeobachtungen aus größeren Höhen auf niedrigere projiziert. Genauer gesagt wird im Referenzprofil die Differenz in  $Z_H$  und/oder  $K_{DP}$  zwischen dem Erdboden und der Beobachtungshöhe des scannenden Radars abgelesen und dann zu den Radarbeobachtungen in  $Z_H$  und/oder  $K_{DP}$  addiert, um die Radarvariablen in Bodennähe zu schätzen. Hierzu können zwei Arten von VP-Referenzen verwendet werden: (1) Beobachtungen von zusätzlichen, vertikal ausgerichteten Profilen (CHEN et al. 2020) und (2) ein vom Radar selbst abgeleitetes, bereichsdefiniertes quasi-vertikales Profil (CHEN et al. 2023). Die daraus resultierenden projizierten Daten können dann für die Niederschlagsschätzung

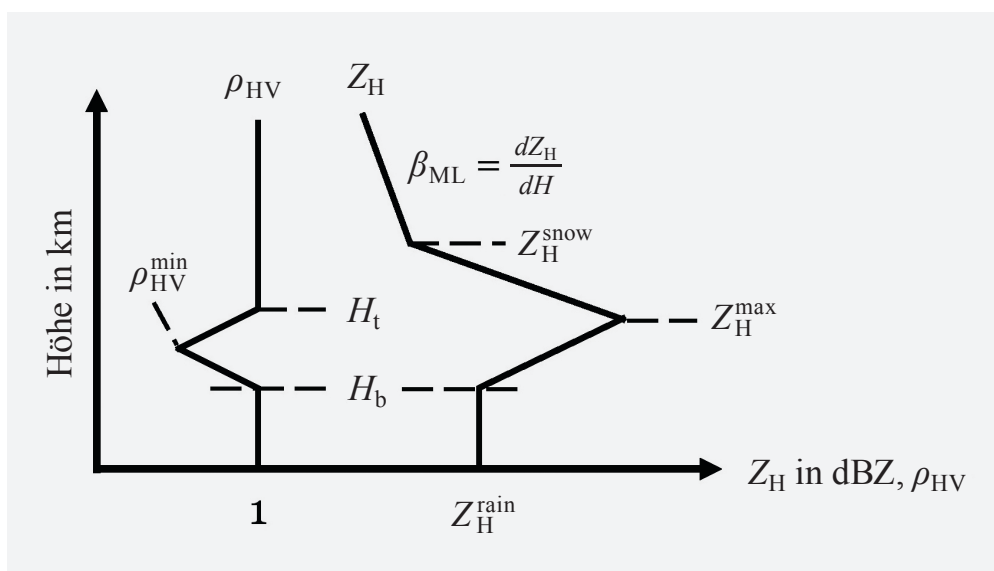


Abbildung 5-2: Schematische Vertikalprofile der horizontalen Reflektivität  $Z_H$  und des kopolaren Korrelationskoeffizienten  $\rho_{HV}$ .  $Z_H$  zeigt erhöhte und  $\rho_{HV}$  reduzierte Werte in der Schmelzschicht (ML), d. h. ca. 200–300 m unterhalb der 0 °C-Grenze. Oberhalb der Schmelzschicht zeigt  $Z_H$  eine Abnahme mit der Höhe  $H$  (Gradient  $\beta$ ), während  $\rho_{HV}$  überwiegend konstant ist.

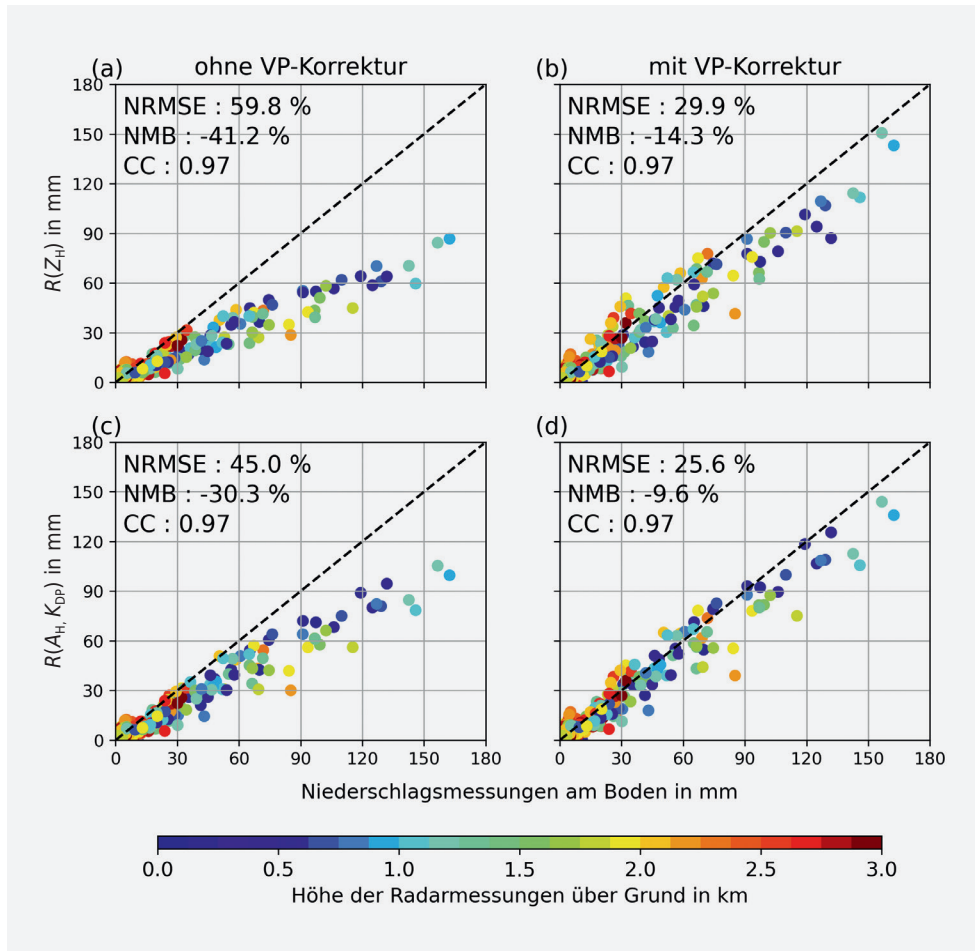


Abbildung 5-3: Streudiagramme von täglichen streubarbasierten (an den Standorten Offenthal (OFT), Essen (ESS), Flechtdorf (FLD) und Neuheilenbach (NHB)) und aus Niederschlagsmessungen am Boden gewonnenen Niederschlagssummen  $R$  für den 14. Juli 2021. Die Radarschätzer basieren auf den  $R(Z_H)$ - (erste Zeile) und  $R(A_H, K_{DP})$ -Algorithmen (zweite Zeile), jeweils ohne (links) und mit Vertikalprofil (VP)-Korrektur (rechts) unter Verwendung vom Radar selbst abgeleiteter, bereichsdefinierter quasi-vertikaler Profile als Referenz. Die Farbe der Punkte gibt Aufschluss über die Höhe der Radarmessungen über Grund.

verwendet werden, was zu erheblichen Verbesserungen führen kann (Abbildung 5-3).

Insbesondere bei vorliegenden bodennahen Verdunstungseffekten kann die Profilkorrektur auch mithilfe eines numerischen Wettervorhersagemodells durchgeführt werden. Dies kann vor allem im Winter bei trockenen Grenzschichten wichtig sein, wenn der mit dem Radar erfasste Niederschlag eventuell nicht den Boden erreicht, andernfalls aber zu Glatteis führen würde. MARTINAITIS et al. (2018) entwickelten ein Verdunstungsschema, das auf simulierten Temperatur- und Feuchteprofilen numerischer Wettervorhersagemodelle basiert. Das iterative Modell berücksichtigt nur schwache ( $< 24,8$  mm/h) Niederschläge in Bodennähe ( $< 3$  km). Für jede Modellschicht unterhalb der Radarstrahlabdeckung wird das Wasserdampfdefizit berechnet und von der Niederschlagsrate der darüberliegenden Schicht abgezogen. Die Schleife stoppt entweder am Boden oder wenn die Niederschlagsrate unter  $0,2$  mm/h liegt (aus Gründen der numerischen Stabilität).

#### 4 Aneichung an in-situ-Messungen

Wie in Abschnitt 1 bereits angedeutet, werden simultan zur zunehmenden Ausnutzung der Polarimetrie und Profilkorrekturen auch Aneichverfahren verwendet und weiter-

entwickelt, um aus Radarmessungen abgeleitete Niederschläge zu korrigieren und die Genauigkeit weiter zu erhöhen. Während Abschnitt 4.1 die Aneichung an Bodenstationen beschreibt, geht Abschnitt 4.2 auf die zusätzliche Nutzung von Richtfunkstrecken ein.

##### 4.1 Verwendung von Bodenstationen

Die Aneichung der Radardaten mit den Daten der Niederschlagsstationen und den Niederschlagsdaten der Wetterstationen erfolgt mit verschiedenen Methoden. Ein einfaches Verfahren bedient sich des Vergleichs der in-situ-Messung und der Messung des geografisch zugeordneten Radarpixels (einfache Bias-Korrektur). Dabei werden sowohl der Faktor als auch die Differenz der beiden Datenquellen berechnet und anschließend in die gesamte, vom Radar erfasste Fläche interpoliert. Die Radarniederschlagsdaten werden dann mit diesen interpolierten Feldern von Faktoren und Differenzen durch Multiplikation bzw. Addition angeeicht. Abbildung 5-4 zeigt beispielhaft die additive Aneichung. Für das beim DWD operationelle RADOLAN-Verfahren werden zur lokalen Bestimmung des besten Aneichverfahrens sogenannte Kontrollstationen als Unterkollektiv aller Aneichstationen ausgewählt und die absoluten Abweichungen zwischen der Niederschlagshöhe der jeweiligen Kontrollstation und dem (ohne Kontrollstationen) angeeichten Radarniederschlags-

wert gebildet. Die Information zur jeweils besten Methode wird räumlich interpoliert und entsprechend im gewichteten Mittel der Ergebnisse aus Faktoren- und Differenzenmethode ortsabhängig angewendet (BARTELS et al. 2004; WEIGL und WINTERRATH 2009). Ein mathematisch aufwendigeres Verfahren ist das sogenannte Merging-Verfahren von Ehret (EHRET 2003; 2008) Hier werden sowohl die Niederschlagsdaten aus den Stations- als auch aus den Radarmessungen vom Ort der Bodenstationen mittels des geostatistischen Verfahrens *Ordinary Kriging* in die Fläche interpoliert. Anschließend wird das Verhältnis zwischen dem originären und dem interpolierten Radarfeld multiplikativ auf das interpolierte Feld der Bodenmessungen übertragen. Um die Robustheit des Verfahrens zu erhöhen, werden sehr kleine oder große Verhältniswerte mittels einer Transformationsfunktion gedämpft (HEISTERMANN und KNEIS 2011). Ziel des Verfahrens ist es, die Vorteile stationsgebundener Niederschlagsmessungen und flächenhafter Radarmessungen zu kombinieren. Bei beiden Verfahren liefern die Radardaten das räumliche Muster und die Stationsdaten die absoluten Werte. Die

Stationsdaten unterlaufen zuvor verschiedene Stufen der Qualitätskontrolle um unrealistische Werte herauszufiltern. Zusätzlich werden unrealistische Werte der Faktoren und Differenzen gedeckelt. Es werden jedoch weder Wind- noch Advektionskorrekturen durchgeführt.

Darüber hinaus ist bei der Aneichung auch die zeitliche Verfügbarkeit der Eingangsdaten zu berücksichtigen. Für eine zeitnahe (Online-)Aneichung stehen weniger konventionelle Daten zur Verfügung und die Korrekturmöglichkeiten sind begrenzt. Damit ist die Qualität der Ergebnisse geringer als bei einer nachträglichen (Offline-)Aneichung. Beim DWD stehen beispielsweise stündlich angeeichte Radar-Niederschlagsprodukte in der Regel 30 Minuten nach der Messung zur Verfügung (siehe [www.dwd.de/radolan](http://www.dwd.de/radolan)). Da stündliche Aneichungen höhere Unsicherheiten aufweisen können und nur mit den in Echtzeit verfügbaren Stationen durchgeführt werden können, werden für nicht zeitkritische Anwendungen auch Daten der nur einmal täglich messenden Niederschlagsstationen für die Aneichung verwendet.

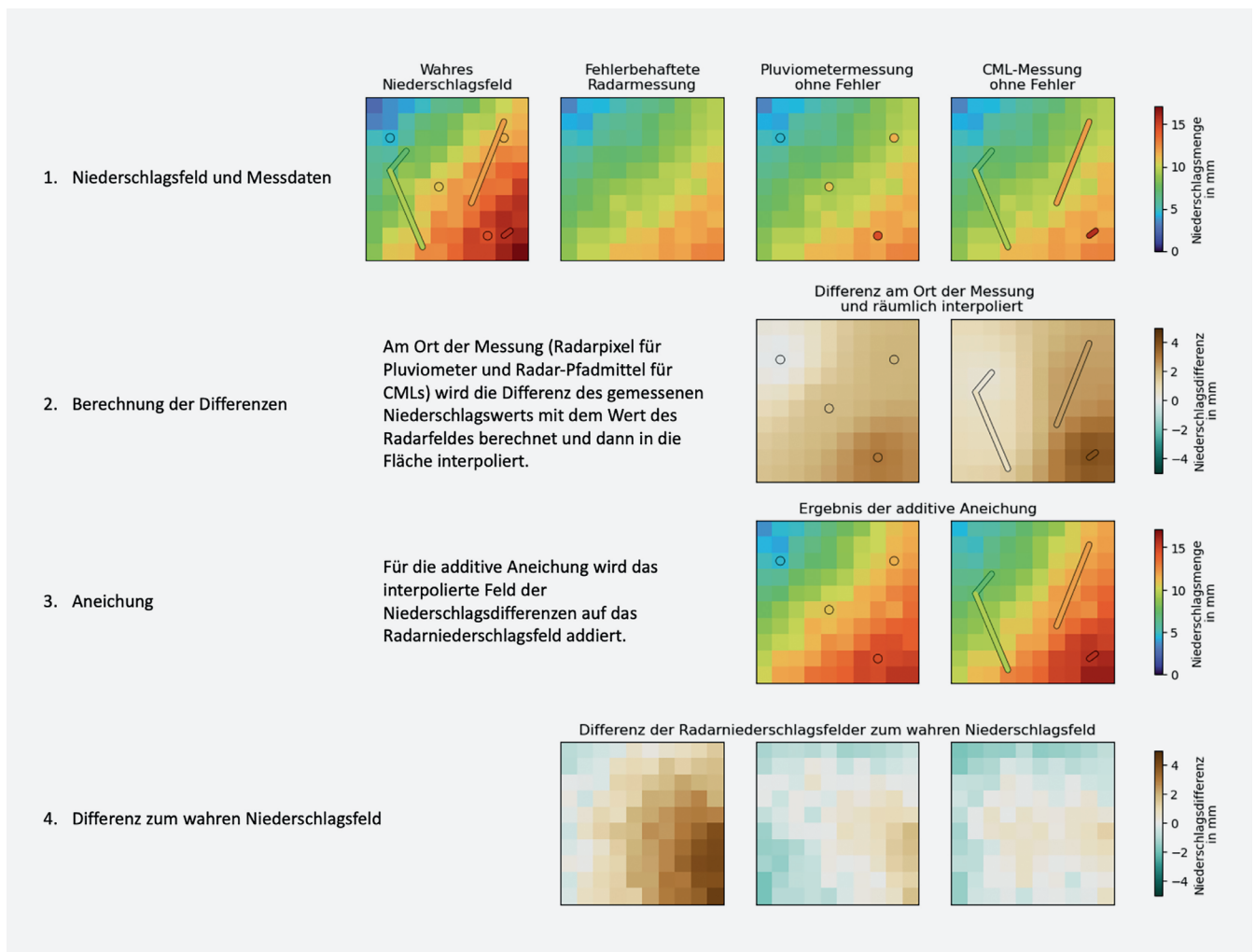


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der additiven Radar-Aneichung mit Punkt- und Linieninformation unter Annahme eines wahren Niederschlagsfeldes, einer Radarmessung mit Fehler und fehlerfreien Messungen des wahren Niederschlagsfeldes durch Bodenstationen und CMLs (*Commercial Microwave Links*; Richtfunkstrecken von Mobilfunkanbietern). Die CML-Messungen sind Pfadmitten entlang der Strecke.

### 4.2 Verwendung kommerzieller Richtfunkstrecken

Konvektive Niederschläge können wegen ihrer hohen räumlichen Variabilität nicht immer ausreichend mit den existierenden Netzwerken an Bodenstationen erfasst werden. Die Dichte an bodennahe Niederschlagsinformation kann jedoch mittels sogenannter opportunistischer Messverfahren unter Verwendung von Datenquellen, die nicht für die Niederschlagsmessung erdacht wurden, erhöht werden. Für CMLs konnte gezeigt werden, dass deren opportunistischen Daten für die landesweite Niederschlagsschätzung eine ähnliche Qualität wie RADOLAN-RW, das stündliche stationsangeicherte Produkt des DWD, liefern (GRAF et al. 2020).

Anders als Daten von Bodenstationen, die eine Messung an einem Punkt repräsentieren, sind CML-basierte Niederschlagsmengen ein Pfadmittel entlang der Strecke der CMLs. Für eine Radar-Aneichung muss daher das existierende Aneichprinzip, welches Radardaten auf einem Gitter mit den Punktmessungen der Stationen kombiniert, erweitert werden um Gitter- und Linieninformation verarbeiten zu können. Dafür wird jeder CML-Pfad mit dem Radar-Gitter geschnitten und der Längenanteil pro Pixel für jeden CML berechnet. Für jeden CML werden dann, nach Längenanteil gewichtet, die Radarniederschlagswerte der geschnittenen Pixel aufaddiert. Daraus ergeben sich die

CML-Pfadmittel des Radarniederschlags. Diese werden mit den jeweiligen CML-Niederschlagsschätzungen (resultierend aus der separat durchgeführten CML-Datenprozessierung) verglichen, und es ergeben sich Faktoren oder Differenzen, die dann an virtuellen Stationen im Mittelpunkt der Strecken, genau wie bei der Aneichung mit Stationsdaten (siehe Abschnitt 4.1), in die weiteren Schritte der existierenden Aneichverfahren eingehen. Abbildung 5-4 zeigt in der rechten Spalte exemplarisch einen additiven Aneichprozess mit CML-Daten.

Im Rahmen des BMBF-Projekts „HoWa-innovativ“ (<https://www.howa-innovativ.sachsen.de>) wurde, in Zusammenarbeit mit dem DWD, eine entsprechende Erweiterung des RADOLAN-Verfahrens in Python entwickelt, die es erlaubt, CML-Messungen in die Aneichung zu integrieren. Im Rahmen des Nachfolgeprojekts „HoWa-PRO“ (<https://www.wasser.sachsen.de/howa-pro.html>) wurde damit eine Radar-CML-Aneichung für das Ahr-Hochwasser durchgeführt. Wie in Abbildung 5-5 zu sehen ist, erreicht die Radar-CML-Aneichung die gleiche Qualität wie die Stationsaneichung. In der gezeigten Region des Ahr-Hochwassers, mit hoher CML-Dichte, ist die Radar-CML-Aneichung sogar besser als die Radar-Stationaneichung. Die beste Performance zeigt eine kombinierte Aneichung mit CMLs und Stationen.

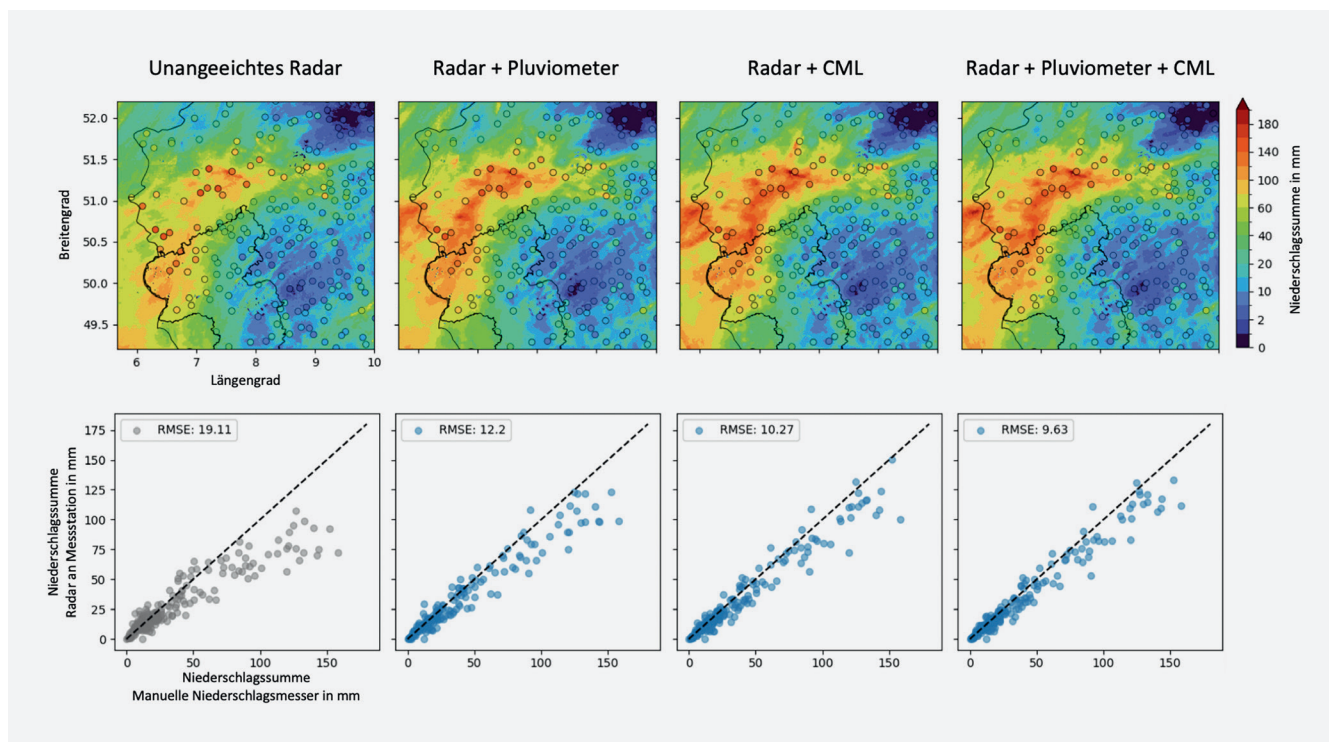


Abbildung 5-5: Vergleich der Niederschlagssummen von Tief „Bernd“ in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 13. bis 15. Juli 2021. Gezeigt sind (von links nach rechts) unangeicherte Radardaten, das Ergebnis einer Stationsaneichung, einer CML (*Commercial Microwave Links*)-Aneichung und einer Aneichung mit Stationen + CMLs. Die dünne schwarze Linie zeigt die Landesgrenze von Deutschland, die dickere schwarze Linie den Umriss von Rheinland-Pfalz. Die gefüllten Kreise markieren die Daten der manuellen Niederschlagsmesser in der Region, die nicht für die Aneichung verwendet wurden. Das beste Ergebnis wird durch eine kombinierte Aneichung mit CMLs und Stationen erzielt. Auf die Darstellung der zur Aneichung verwendeten Niederschlagsmesser und CMLs wurde zugunsten der Übersichtlichkeit der Grafik verzichtet.

Da CML-Daten mit einer Latenz von weniger als einer Minute verfügbar gemacht werden können, können sie auch in einem operationellen Echtzeit-Radarprodukt zur Aneichung verwendet werden. Sowohl beim DWD als auch bei Météo France sind entsprechende Produkte aktuell in der Entwicklung. Im Vergleich zu Stationsdaten aus den eigenen Messnetzen der Wetterdienste, stellt die operationelle Verarbeitung von CML-Daten wegen der größeren Datenmenge, der Fluktuation der Datenqualität und des dynamisch wachsenden CML-Netzes höhere Anforderungen an die Prozesskette auf dem Weg von Rohdaten zur qualitätsgesicherten CML-Niederschlagsschätzung, die für die Radar-Aneichung verwendet werden kann.

## 5 Ausblick

Die Genauigkeit von Niederschlagsprodukten und ihre räumliche und zeitliche Auflösung wird durch verschiedenste Ansätze vorangetrieben. Beispiele sind die Weiterentwicklung der Messinstrumente, die Erstellung hybrider Niederschlagsalgorithmen und der Einsatz von Aneichmethoden. In diesem Beitrag wurde der Mehrgewinn polarimetrischer Radarmessungen und zusätzlicher Profilkorrekturen für die quantitative Niederschlagsschätzung beleuchtet. Auch wurden parallele Weiterentwicklungen in der Radaraneichung, die durch Hinzunahme opportunistischer Messungen von CMLs erreicht werden konnten, beschrieben. Neueste Bestrebungen untersuchen auch, wie sogenannte *Personal Weather Stations*, also private Niederschlagsmessungen mit stark variierender Qualität, integriert werden können. Die unterschiedlichen Messprinzipien und schwankende Qualität müssen im Aneichprozess berücksichtigt werden und erfordern flexiblere Interpolationsverfahren, um auch die Extremwerte besser zu repräsentieren. Die abschließende Herausforderung besteht darin, die Verfahren, beziehungsweise eine Kombination aus den dargelegten Verfahren, in den vollautomatisierten Echtzeitbetrieb zu überführen.

## Literatur

- BALAKRISHNAN, N., ZRNIĆ, D.S., 1990: Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail. *Journal of the Atmospheric Sciences* **47**, 1525–1540, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<1525:UOPTCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<1525:UOPTCP>2.0.CO;2).
- BARTELS, H., WEIGL, E., REICH, T., LANG, P., WAGNER, A., KOHLER, O., GERLACH, N., 2004: Zusammenfassender Abschlussbericht zum Projekt RADOLAN. URL: [www.dwd.de/RADOLAN](http://www.dwd.de/RADOLAN), Abruf: 26.07.2024.
- BUKOVČIĆ, P., RYZHKOV, A., ZRNIĆ, D., 2020: Polarimetric relations for snow estimation-radar verification. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **59**, 991–1009, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0140.1>.
- CHEN, H., CIFELLI, R., WHITE, A., 2020: Improving Operational Radar Rainfall Estimates Using Profiler Observations over Complex Terrain in Northern California. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **58**, 1821–1832, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2949214>.
- CHEN, J.Y., REINOSO-RONDINEL, R., TRÖMEL, S., SIMMER, C., RYZHKOV, A., 2023: A Radar-Based Quantitative Precipitation Estimation Algorithm to Overcome the Impact of Vertical Gradients of Warm-Rain Precipitation: The Flood in Western Germany on 14 July 2021. *Journal of Hydrometeorology* **24**, 521–536, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0111.1>.
- DIEDERICH, M., RYZHKOV, A., SIMMER, C., ZHANG, P., TRÖMEL, S., 2015: Use of specific attenuation for rainfall measurement at X-band radar wavelengths. Part II: Rainfall estimates and comparison with rain gauges. *Journal of Hydrometeorology* **16**, 503–516, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0067.1>.
- EHRET, U., 2003: Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar. *Mitteilungen* **121**, Eigenverlag des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart.
- EHRET, U., GÖTZINGER, J., BÁRDOSSY, A., PEGRAM, G.G.S., 2008: Radar-based flood forecasting in small catchments, exemplified by the Goldersbach catchment, Germany. *International Journal of River Basin Management* **6**, 323–329, <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635359>.
- GIANGRANDE, S.E., RYZHKOV, A.V., 2008: Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **47**, 2445–2462, <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1753.1>.
- GRAF, M., CHWALA, C., POLZ, J., KUNSTMANN, H., 2020: Rainfall estimation from a German-wide commercial microwave link network: Optimized processing and validation for 1 year of data. *Hydrology and Earth System Sciences* **24**, 2931–2950, <https://doi.org/10.5194/hess-24-2931-2020>.
- HEISTERMANN, M., KNEIS, D., 2011: Benchmarking quantitative precipitation estimation by conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research* **47**, <https://doi.org/10.1029/2010WR009153>.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 1535 pp.
- MARTINAITIS, S.M., GRAMS, H.M., LANGSTON, C., ZHANG, J., HOWARD, K., 2018: A real-time evaporation correction scheme for radar-derived mosaicked precipitation estimations. *Journal of Hydrometeorology* **19**, 87–111, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0093.1>.
- RYZHKOV, A., DIEDERICH, M., ZHANG, P., SIMMER, C., 2014: Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *Journal of*

- Atmospheric and Oceanic Technology* **31**, 599–619,  
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00038.1>.
- RYZHKOV, A., ZHANG, P., BUKOVČIĆ, P., ZHANG, J.,  
COCKS, S., 2022: Polarimetric Radar Quantitative  
Precipitation Estimation. *Remote Sensing* **14**,  
<https://doi.org/10.3390/rs14071695>.
- SELIGA, T.A., BRINGI, V.N., 1976: Potential Use Of  
Radar Differential Reflectivity Measurements At  
Orthogonal Polarizations For Measuring Precipitation.  
*Journal of Applied Meteorology* **15**, 69–76,  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1976\)015<0069:  
PUORDR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1976)015<0069:PUORDR>2.0.CO;2).
- TESTUD, J., BOUAR, E.L., OBLIGIS, E., ALI-  
MEHENNI, M., 2000: The rain profiling algorithm  
applied to polarimetric weather radar. *Journal of  
Atmospheric and Oceanic Technology* **17**, 332–356,  
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0332:  
TRPAAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0332:TRPAAT>2.0.CO;2).
- TRÖMEL, S., ZIEGERT, M., RYZHKOV, A.V.,  
CHWALA, C., SIMMER, C., 2014: Using microwave  
backhaul links to optimize the performance of  
algorithms for rainfall estimation and attenuation  
correction. *Journal of Atmospheric and Oceanic  
Technology* **31**, 1748–1760,  
<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00016.1>.
- WEIGL, E., WINTERRATH, T., 2009: Radargestützte  
Niederschlagsanalyse und -vorhersage (RADOLAN,  
RADVOR-OP). *promet* **35**, 78–86.
- ZRNIĆ, D.S., RYZHKOV, A.V., 1999: Polarimetry  
for Weather Surveillance Radars. *Bulletin of the  
American Meteorological Society* **80**, 389–406,  
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0389:  
PFWSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0389:PFWSR>2.0.CO;2).

MATTHIAS GOTTSCHALK  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
[matthias.gottschalk@dwd.de](mailto:matthias.gottschalk@dwd.de)

ELMAR WEIGL  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Niederschlagsüberwachung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
[elmar.weigl@dwd.de](mailto:elmar.weigl@dwd.de)

DR. TANJA WINTERRATH  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Niederschlagsüberwachung  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
[tanja.winterrath@dwd.de](mailto:tanja.winterrath@dwd.de)

## Kontakt

DR. SILKE TRÖMEL  
Universität Bonn  
Institut für Geowissenschaften, Abteilung Meteorologie  
Auf dem Hügel 20  
53121 Bonn  
[silke.troemel@uni-bonn.de](mailto:silke.troemel@uni-bonn.de)

JU-YU CHEN  
Universität Bonn  
Institut für Geowissenschaften, Abteilung Meteorologie  
Auf dem Hügel 20  
53121 Bonn  
[jchen@uni-bonn.de](mailto:jchen@uni-bonn.de)

DR. CHRISTIAN CHWALA  
Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU)  
Kreuzackbahnstraße 19  
82467 Garmisch-Partenkirchen  
[christian.chwala@kit.edu](mailto:christian.chwala@kit.edu)

M. WERNER, R. FEGER, D. HEIZENREDER, K. HELMERT, T. HENGSTEBECK,  
P. JAMES, L. JOSIPOVIC, K. WAPLER

# 6

## Gewitternowcasting

### Nowcasting of Thunderstorms

#### Zusammenfassung

Gewitter und ihre Begleiterscheinungen, wie zum Beispiel Blitze, Starkniederschläge, Hagel und Böen, stellen eine Gefahr für Leib und Leben dar und verursachen jährlich enorme Schäden an Natur, Gebäuden und Infrastrukturen rund um den Globus. Die Erfassung und Vorhersage von Gewittern ist deshalb von großer Bedeutung für den operationellen Wettervorhersage- und Warndienst der nationalen Wetterdienste und für die meteorologische und klimatologische Forschung und Entwicklung. Mit „Nowcasting“ bezeichnet man Vorhersagen für sehr kurze Zeitabschnitte im Voraus. Vorhersagen dieser Art beruhen vor allem auf den zuletzt verfügbaren Mess- und Beobachtungsdaten der jeweiligen Wetterphänomene. Wetterradare ermöglichen eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Beobachtung von Niederschlägen in der unteren Troposphäre. Sie haben deshalb das Verständnis der Bildung und Entwicklung von konvektiven Niederschlägen und damit auch die Analyse und Vorhersage von Gewittern entscheidend verbessert. Der DWD verfügt über einen leistungsfähigen Verbund von 17 Wetterradargeräten, mit denen Niederschläge in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfasst werden können. Parallel zum Aufbau und zur Weiterentwicklung des Wetterradarverbundes hat der DWD auch Verfahren zur Erfassung und zum Nowcasting konvektiver Ereignisse entwickelt, die insbesondere im Wettervorhersage- und Warndienst und zur Hochwasservorhersage regelmäßig zum Einsatz kommen. Dieser Artikel stellt die Systeme und automatischen Verfahren des DWD für das Nowcasting von Gewittern vor, erläutert, wie auf deren Grundlage heute Warnungen erstellt werden können und gibt diesbezüglich einen kurzen Ausblick auf die Zukunft.

#### Summary

Concomitants of thunderstorms such as lightning, heavy rain, hail and gusts pose a threat to life and limb and cause substantial damage to nature, buildings and infrastructure around the globe. Hence, the detection and forecast of thunderstorms is of paramount importance for the national weather forecast and warning services as well as for meteorological and climatological research and development. “Nowcasting” refers to predictions made for very short periods of time in advance. Forecasts of this type are based primarily on the most recently available observation data for the relevant weather phenomena. Weather radars enable an observation of the lower troposphere with a high resolution in space and time. These ground-based remote-sensing systems have decisively improved the understanding of formation and development of convective precipitation and thus the analysis and prediction of thunderstorms. The German Meteorological Service (DWD) operates a powerful network of 17 weather radar systems for precipitation detection with high spatial and temporal resolution. Setup and refinement of the weather radar network at DWD has been in unison with the development of convective events detection and nowcasting applications that are regularly used for weather forecast and warning services as well as for flood predictions. This article presents systems and methods for thunderstorm nowcasting, illustrates how nowadays these are used to generate warnings and gives a short outlook on the future of this process.

#### 1 Einleitung

Gewitter und ihre Begleiterscheinungen verursachen jedes Jahr weltweit enorme Schäden an Natur, Gebäuden und Infrastrukturen, weshalb ihre Erfassung und Vorhersage von großer Bedeutung ist. „Nowcasting“ wurde ursprünglich als „die detaillierte Beschreibung des aktuellen Wetterzustandes und die Vorhersage der in den nächsten paar Stunden zu erwartenden Änderungen“ beschrieben

(BROWNING 1981). Die *World Meteorological Organization* (WMO) definiert Nowcasting als die detaillierte Analyse und Beschreibung des aktuellen Wetters und die Vorhersage von 0 bis 6 Stunden (WMO 2017). Analysen und Vorhersagen dieser Art beruhen vor allem auf den zuletzt verfügbaren Mess- und Beobachtungsdaten der jeweiligen Wetterphänomene. Wetterradare ermöglichen eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Beobachtung von Niederschlägen in der unteren Troposphäre, insbesondere der kon-

vektiven Ereignisse, und spielen daher für das Nowcasting von Gewittern eine zentrale Rolle.

Abschnitt 2 gibt zunächst einen Überblick über die Entstehung und Typen von Gewittern. In den in Abschnitt 3 beschriebenen Nowcasting- und Warnverfahren wird das Wissen über die Eigenschaften der verschiedenen Gewittertypen benutzt, um die wesentlichen, besonders gefährlichen Bereiche der Phänomene zu erfassen und vorherzusagen. Abschnitt 4 enthält einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich des Gewitternowcastings.

## 2 Entstehung und Typen von Gewittern

### 2.1 Entstehung

Konvektive Phänomene wie Quellwolken, Schauer und Gewitter entstehen durch kräftige vertikale Umlagerungen in der Troposphäre im Bereich der aufsteigenden Luft. Um aufsteigende Luftströmungen mit konvektiver Bewölkung und/oder konvektiven Niederschlägen bis hin zu Gewittern und Unwetterereignissen entstehen zu lassen, sind drei wichtige Zutaten erforderlich (DOSWELL 2001):

- (1) Instabilität – das Vorhandensein einer statischen Instabilität in der Atmosphäre oder zumindest einer potentiellen Instabilität
- (2) Feuchte – das Vorhandensein von Wasserdampf in der aufsteigenden Luft, der latente Kondensationswärme freisetzt
- (3) Hebung – ein Hebungsprozess, der die ggf. vorhandene potentiell instabile Schichtung in eine labile Schichtung umwandelt und durch den die Luft der unteren Troposphäre auf das Niveau der freien Konvektion angehoben wird

Sobald Instabilität, Feuchte und Hebung ausreichend groß sind und die konvektiv verfügbare potenzielle Energie (*Convective Available Potential Energy*, CAPE) relevante Grenzwerte überschreitet, können konvektive Niederschläge und Gewitter entstehen. Nicht immer bilden sich dabei auch Blitze und der damit verbundene Donner. In der Literatur werden deshalb sowohl „Gewitter“ als auch „hochreichende feuchte Konvektion“ (*deep moist convection*) untersucht.

Die Bedingungen für die Bildung von hochreichender feuchter Konvektion können in der Atmosphäre in den unterschiedlichsten Raum- und Zeitskalen entstehen. Dementsprechend bilden sich unterschiedliche Erscheinungsformen der konvektiven Ereignisse – von einfachen Quellwolken und Schauern bis hin zu ausgeprägten großskaligen Gewitterkomplexen.

Die Lebensdauer der konvektiven Phänomene hängt von ihrer Größenordnung ab (WILSON 1966; GERMANN und

ZAWADZKI 2002). Organisierte großskalige Niederschlagsstrukturen haben eine längere Lebensdauer als kleinere unorganisierte konvektive Niederschläge.

Um die konvektiven Ereignisse besser verstehen und vorhersagen zu können, werden grundsätzlich verschiedene Arten von hochreichender feuchter Konvektion unterschieden (WEISMAN und KLEMP 1982; BLUESTEIN 2013). Diese werden im folgenden Unterabschnitt beschrieben.

### 2.2 Typen

Gewöhnliche Einzelzellen sind die am häufigsten auftretenden Phänomene hochreichender feuchter Konvektion. Sie bilden sich in Regionen mit feuchtlabiler Schichtung und geringer vertikaler Windscherung und haben nur eine relativ kurze Lebensdauer von ca. 20–30 min (BATTAN 1953; FOOTE und MOHR 1979).

Die Auslösung von Konvektion erfolgt im Allgemeinen durch diabatische Prozesse (z.B. Aufheizung der untersten Luftschichten durch Sonneneinstrahlung) oder durch dynamische Prozesse (z.B. Hebung der Luftsäule durch aufwärts zunehmende positive Vorticityadvektion oder erzwungene orographische Hebung).

Für Einzelzellen sind hauptsächlich die diabatischen Prozesse verantwortlich. Einzelzellen können kurzzeitig starke Regenfälle, Hagel und Windböen erzeugen, ihr Unwetterpotenzial ist im Vergleich zu anderen Arten hochreichender Konvektion eher begrenzt. Die in den Einzelzellen oft beobachteten Böen bilden sich, wenn ungesättigte Luft im Bereich der konvektiven Zellen durch den fallenden verdunstenden Niederschlag abgekühlt wird und aufgrund der dann höheren Dichte zu Abwinden (*downdrafts*) mit den bodennahen signifikanten Böen führt. Diese Phänomene beeinflussen dabei die weitere Entwicklung der Zellen. Bei geringer Windscherung bewirken die relativ kalten Abwinde die Bildung von sogenannten *cold pools* in Bodennähe, die eine Verminderung der Instabilität und somit das Absterben des Auftriebes zur Folge haben.

Multizellen bestehen aus einem Verbund von mehreren Einzelzellen. Je nach vorherrschender Scherung des horizontalen Windes können die beteiligten einzelnen Zellen dabei relativ unabhängig voneinander existieren, sich verbinden oder sich gegenseitig beeinflussen und so ein organisiertes selbsterhaltendes System bilden und dann auch eine längere Lebensdauer als Einzelzellen erreichen (HENRY 1993).

Superzellen sind seltener, aber weitaus gefährlicher als Einzelzellen oder Multizellen. Sie haben eine deutlich längere Lebensdauer (zum Teil mehrere Stunden) und produzieren oft Hagel und Böen oberhalb der Sturmstärke bis hin zu Tornados. Superzellen sind damit die konvektiven Phänomene, die mit den gefährlichsten Auswirkungen verbunden sind. Für den Wetterwarndienst und die entsprechenden

automatisierten Verfahren zur Detektion von konvektiven Zellen ist es deshalb besonders wichtig, diese Konvektionsart anhand der verfügbaren Daten identifizieren zu können. Das charakteristische Merkmal der Superzellen ist ein rotierender Aufwindbereich (*rotating updraft*), der als Mesozyklone bezeichnet wird. Voraussetzung für die Bildung von Superzellen ist, dass die hochreichende vertikale Windscherung und die Instabilität entsprechende Grenzwerte überschreiten. Die Rotation im Aufwindbereich erzeugt ein hohes Potenzial für die Bildung von Starkregen, Hagel, Sturmböen und auch Tornados. Aufgrund ihrer dynamisch besonders ausgeprägten Struktur sind Superzellen häufiger mit Unwetterereignissen verbunden.

Wenn sich mehrere markante konvektive Zellen und Gewitter zu einer Linie organisieren, wie es beispielsweise häufig im Vorlauf einer Kaltfront zu beobachten ist, spricht man von einer „Squall-Line“. Diese sind oft mit Starkregen, Hagel und ausgeprägten Böen verbunden. Dabei können auch Superzellen Bestandteil von Squall-Lines sein (BLUESTEIN und JAIN 1985). Die vertikale Scherung des Horizontalwindes in der unteren Troposphäre ist ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Bildung von Squall-Lines. Die Dynamik dieser Systeme wird ausführlich von WEISMAN und ROTUNNO (2004) auf Basis von numerischen Simulationen beschrieben. Die mesoskaligen Squall-Lines leben deutlich länger als die einzelnen konvektiven Zellen aus denen sie bestehen. Dieser Umstand wird im Wetterwarndienst und in automatisierten Erkennungs- und Warnverfahren berücksichtigt.

Größerskalige dynamische Hebung von feuchter, potentiell instabiler Luft kann zu besonders ausgedehnten konvektiven Systemen führen, deren horizontale Ausdehnung deutlich über die konvektive Skala hinausgeht. Sobald eine Ansammlung von zusammenhängenden, konvektiv durchsetzten Niederschlägen mit einer horizontalen Ausdehnung von ca. 100 km oder mehr entsteht, spricht man von einem „Mesoskaligen Konvektiven System“ (*Mesoscale Convective System*, MCS; BROWNING und LUDLAM 1962; FRITSCH und FORBES 2001). Oft entstehen diese Phänomene im Bereich größerskaliger Hebung von feuchter instabiler Luft, wobei ausgedehnte konvektive Umlagerungen entstehen, deren horizontale Ausdehnung deutlich über die konvektive Skala hinausgehen und die im Verlauf ihrer Entwicklung eine Eigendynamik entwickeln. Die Lebensdauer dieser Systeme kann 6–12 Stunden oder mehr betragen. Die hohen, breit auslaufenden Ambosswolken der Gewitterzellen sind in Satellitenbildern dominant zu sehen. Die Auswertungen von Radardaten zeigen jedoch, dass sich die markanten konvektiven Niederschläge nur auf ausgewählte Regionen unterhalb der hohen Cirruswolken konzentrieren und in der Regel drei wesentliche Niederschlagsbereiche umfassen (HOUZE 2004; BLUESTEIN 2013):

- eine führende Linie konvektiver Niederschläge mit einer ausgeprägten Böenfront im vorderen Bereich (*leading convective line with gust front*)

- eine Übergangszone mit relativ schwachen Niederschlägen (*transition zone*)
- ein nachlaufendes stratiformes Niederschlagsgebiet, das konvektiv durchsetzt ist (*trailing stratiform precipitation area*)

Ein MCS vollzieht einen eigenen Entwicklungsprozess, bei dem sich die Organisation der beteiligten Gewitterarten und die räumliche Ausdehnung des MCS signifikant verändern. Das System entsteht anfangs in der konvektiven Skala aus Einzel- und Multizellen, die sich im weiteren Verlauf oft zu einer Squall-Line formieren. Im Verlauf der Entwicklung bildet sich stromaufwärts langsam ein nachlaufendes stratiformes, konvektiv durchsetztes Niederschlagsgebiet, das sich zunächst vergrößert und schließlich abschwächt und auflöst.

### 3 Gewitternowcasting und -warnung heute

Grundsätzlich liefert Nowcasting rasche und ortsspezifische Vorhersagen von gefährlichen Wetterereignissen für sehr kurze Zeitabschnitte im Voraus, basierend auf den zuletzt verfügbaren aktuellen Mess- und Beobachtungsdaten. Vorhersagen entstehen durch kurzfristige Extrapolationen der aktuellen Situation, d. h. der Eigenschaften und der Ausprägung des jeweiligen meteorologischen Phänomens. Dabei besitzen die Vorhersagen zu Anfang eine sehr hohe Qualität, verlieren diesen Vorteil aber schnell mit zunehmender Vorhersagezeit, weil sie meist keine Entwicklungsprozesse der Phänomene berücksichtigen. Nowcasting ist deshalb für alle Nutzenden besonders wertvoll, die einerseits eine hohe Qualität der Wettervorhersagen für ihr Risikomanagement benötigen und die sich andererseits rasch, mit kurzen Reaktionszeiten auf geänderte Wetterbedingungen einstellen können. Dazu gehören beispielsweise die kommerzielle und allgemeine Luftfahrt, Energieversorgungsunternehmen, der Straßenverkehr aber auch die allgemeine Bevölkerung mit vielen privaten Aktivitäten.

Im Wetterwarndienst wird Nowcasting immer dann eingesetzt, wenn verlässliche Vorhersagen und Warnungen erst ab dem Moment der Erfassung erster Signale des Phänomens in den verschiedenen Messsystemen (z. B. bei Gewittern ab Entstehung konvektiver Wolken) ausgegeben werden können. Zu diesem Zweck werden automatische Nowcastingverfahren entwickelt, die Vorhersage- und Warnprodukte erzeugen, welche im Warndienst des Deutschen Wetterdienstes genutzt werden, um frühzeitige und präzise Warnungen zu erstellen.

#### 3.1 Zentrale Datenquelle: Fernerkundungsdaten

Fernerkundungssysteme in der Meteorologie liefern Messdaten mit hoher zeitlicher und/oder räumlicher Auflösung, z. B. über Bewölkung, Niederschlag, Wind sowie über die Blitzaktivität. Nach dem Beginn der konvektiven Auflösung kann die Cumulus-Wolkenstruktur eines sich bilden-

den Gewitters ab einer gewissen Größe prinzipiell mithilfe von Wettersatelliten (SCHMETZ et al. 2002; HOLMLUND et al. 2021) erkannt und verfolgt werden. Geostationäre Satelliten sind hierfür besonders geeignet, weil sie neben einer hohen räumlichen Auflösung auch eine hohe zeitliche Auflösung garantieren. Wenn die konvektive Entwicklung des sich bildenden Gewitters weiter voranschreitet, kann zum Zeitpunkt des Auftretens von Niederschlägen die Erfassung des Phänomens mit Wetterradarsystemen ergänzt werden, sobald der Niederschlag eine gewisse Intensitätsschwelle überschreitet. Von der Auslösung bis zur Bildung von Niederschlägen ist damit im Idealfall bereits eine bestimmte Historie der sich bildenden Gewitterzelle bekannt. Ab dem Zeitpunkt der Niederschlagsbildung übernehmen Wetterradardaten die zentrale Rolle bei der Erfassung der weiteren Entwicklung, weil sie den Kern der sich entwickelnden Gewitterzelle im Blick behalten. Signifikante Niederschläge können hier bereits regelmäßig vor dem Auftreten der ersten Blitzmessungen registriert werden. Stehen Wetterradardaten nicht zur Verfügung, besteht aber auch die Möglichkeit, entwickelte Gewitter mithilfe von Satellitendaten und ggf. Blitzdaten allein weiter zu verfolgen (MÜLLER et al. 2022; ZINNER et al. 2008).

Dank der heute zur Verfügung stehenden Dual-Polarisationstechnik bei Wetterradaren (siehe Beitrag 2 in diesem Heft; KUMJIAN 2013), können neben der Niederschlagsintensität und der horizontalen Bewegungsgeschwindigkeit der Regentropfen in radialer Richtung (via Doppler-Effekt) auch Aussagen über die Beschaffenheit der Hydrometeore (sogenannte Hydrometeorklassifikation) getroffen werden (siehe Beitrag 4 in diesem Heft; STEINERT 2014; FRECH und STEINERT 2014). Insbesondere für das Nowcasting von Hagel ist dies sehr wichtig.

Polarimetrische Radarmessungen und Doppler-Messungen (sprich Messungen der Geschwindigkeit, mit der sich ein Niederschlagsteilchen auf den Radarstandort zu oder von ihm wegbewegt) ermöglichen die Ableitung einer Reihe weiterer für Gewitternowcasting relevanter Größen. Die Palette beginnt bei der Entfernung von Störschrauschen sowie der Korrektur von Dämpfungseffekten des Radarstrahls (FRIEDRICH et al. 2006; WERNER 2014) und beinhaltet weiter die genauere Ableitung von Niederschlagsraten und -summen sowie des vertikalen Wassergehaltes, die Generierung von Information über Rotation, Windscherung und Konvergenz sowie zahlreiche Anwendungen zur Erkennung und Einstufung von Superzellsignaturen (z.B. DONALDSON 1970; BURGESS 1976; LEMON 1980; ILLINGWORTH et al. 1987; MARKOWSKI 2002; KUMJIAN und RYZHKOV 2008, 2009; VAN DEN BROEKE 2015; BLUESTEIN et al. 2019).

## 3.2 Aufgaben und Grenzen des Gewitternowcastings

### 3.2.1 Detaillierte dreidimensionale Analyse

Ausgangspunkt für ein erfolgreiches Gewitternowcasting ist eine detaillierte dreidimensionale Analyse der aktuellen

konvektiven Prozesse und der entsprechenden Begleiterscheinungen, wie z.B. Wolken, Niederschlag, Wind und Blitzaktivität, deren Eigenschaften mittels für diesen Zweck entwickelter Software aus den Daten der Fernerkundungsmesssysteme abgeleitet werden. Eine zentrale Aufgabe besteht dabei in der Bestimmung verschiedener abgeleiteter meteorologischer Attribute, welche die Eigenschaften eines Gewitters oder allgemeiner einer konvektiven Zelle beschreiben. Diese Analyse dient zum einen als Ausgangspunkt für die zu bestimmenden Vorhersagen, zum anderen liefert sie die Grundlage für nachgelagerte (klimatologische) Studien zur Häufigkeit und Verteilung von Gewittern und den dadurch verursachten Schäden durch Niederschläge, Wind, Blitzschlag und Tornados (WAPLER und BEYER 2022) sowie für Studien der Lebenszyklen von Gewittern (WAPLER 2021). Schließlich kann die durch Messungen gewonnene Gewitteranalyse einen wichtigen Beitrag für die Numerische Wettervorhersage (kurz NWV) liefern, wenn sie in dessen Datenassimilationsverfahren berücksichtigt wird (siehe Beitrag 8 in diesem Heft).

### 3.2.2 Vorhersage und Warnung

Für den Vorhersagehorizont von +2 h (ggf. bis +6 h) liefert das Nowcasting idealerweise Vorhersagen aller zuvor in der Analyse bestimmten Attribute. Diese Vorhersagen sollten mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit versehen sein, die sich im Nachgang so auch statistisch verifizieren lässt. Basierend auf der zeitlichen und räumlichen Auflösung der verwendeten Fernerkundungssysteme werden die Vorhersagen in hoher zeitlicher Aktualisierungsrate (Standard sind heute 5 min oder weniger) in hoher räumlicher Auflösung (heute bereits oft ca. 250 m) sowie in kleinen Vorhersagezeitschritten (teils nur 1 min) aktualisiert und bereitgestellt. Die Ausgaben müssen dabei aber bereits sehr kurz nach Verfügbarkeit aller benötigten Messdaten erstellt werden. Aufwändige physikalische Modellierungen auf dieser zeitlichen und räumlichen Skala sind mit dem heutigen Stand der Technik im Rahmen des Nowcastings nicht sinnvoll. Sie werden jedoch parallel berechnet und in größeren Zeitabständen mit den Nowcastinginformationen kombiniert. Für die hohe Aktualisierungsrate des Nowcastings müssen vereinfachte Vorhersagemethoden verwendet werden und Vorhersagen können nur für eine Auswahl von meteorologischen Parametern erstellt werden. Im Mittelpunkt steht hierbei die Vorhersage zukünftiger Schwerpunkte der Gewitteraktivität (vor allem der Niederschlagsintensität) und deren ungefähre Ausdehnung. Als zentrale Herausforderung und Gegenstand der Forschung in den vergangenen Jahren gilt die Vorhersage der weiteren Entwicklung des Gewitters: Wird es sich verstärken? Wird es sich abschwächen? Ist mit Hagel zu rechnen und wenn ja, wann und in welcher Korngröße? Auf diese Weise automatisch erstellte Analysen und Vorhersagen bilden im Weiteren die Grundlage für die automatische Erzeugung von Warnungen, auf die in Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird.

### 3.3 Automatische Verfahren für das Gewitternowcasting

In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Verfahren für das Nowcasting von Gewittern entwickelt. WILSON et al. (1998) gibt einen umfassenden Überblick über die vor der Jahrtausendwende entstandenen Methoden und Systeme. Nachfolgende Entwicklungen werden in weiteren Veröffentlichungen beschrieben (LANG 2001; HANDWERKER 2002; HERING et al. 2004; HOFFMANN 2008; ZINNER et al. 2008; KOBER und TAFFERNER 2009; MEYER et al. 2013; JAMES et al. 2018; AUTONÈS und CLAUDON 2022; DIXON und WIENER 1993; JOHNSON et al. 1998).

Im Mittelpunkt des hier behandelten Gewitternowcastings stehen dabei Methoden, um zunächst aus der Messung der Radarreflektivität, d. h. prinzipiell aus der Niederschlagsintensität, sogenannte konvektive Zellen zu extrahieren. Als konvektive Zellen werden dabei lokal begrenzte Bereiche mit konvektiver Aktivität bezeichnet, die mit einer solchen räumlichen Genauigkeit bestimmt werden sollen, dass einzelne Aufwindbereiche voneinander getrennt als unterschiedliche Zellen erkannt werden.

Neben der reflektivitätsbasierten Erkennung von Gewittern stellen Methoden zur Erkennung von rotierenden Superzellen (sogenannte Mesozyklonen) mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmessungen des Doppler-Radars eine weitere wichtige Verfahrensklasse dar (ZRNÍČ et al. 1985; HENGSTEBECK et al. 2018).

Die so bestimmten konvektiven Zellen werden häufig auch als „Objekte“ bezeichnet. Denn die einzelnen Gewitter werden als Individuen erfasst, mit einer Identifikationsnummer versehen und über die Zeit verfolgt. Alternativ können Niederschlagsvorhersagen für den Nowcastinghorizont mittels sogenannter Optischer-Fluss-Ansätze erstellt werden (z.B. AYSEL et al. 2019). Hier werden keine Gewitterzellen (Objekte) abgeleitet, sondern es wird aus einer Zeitreihe eines pixelbasierten Niederschlagsproduktes (z.B. ein Deutschlandkomposit für die 1-h-Niederschlagssumme) ein Bewegungsvektorfeld berechnet, welches herangezogen wird, um die Niederschlagsstrukturen zeitlich zu extrapolieren. Man erhält so Prognosen des pixelbasierten Produktes, also auch des konvektiven Niederschlags.

Heutzutage werden üblicherweise die Ausgaben der objektbasierten Methoden mit den aus Radardaten und Regentöpfen abgeleiteten flächenbasierten Niederschlagsakkumulationen und entsprechenden Vorhersagen (via Optischer-Fluss-Methode) sowie mit Informationen anderer Fernerkundungsdaten (Blitz, Satellit), NWV-Daten, In-situ-Messungen und ggf. Crowdsourcing-Daten kombiniert, um bestmögliche Vorhersagen und Warnungen sowie im weiteren Vorhersageverlauf auch im Übergang zu NWV-Modellen nahtlose Vorhersagen und Warnungen bereitzustellen (z.B. HAIDEN et al. 2011; JAMES et al. 2018; LEINONEN et al. 2022).

#### 3.3.1 Reflektivitätsbasierte Erkennung und Verfolgung von konvektiven Zellen

Die Erkennung konvektiver Zellen in Radarreflektivitätsdaten erfolgt in der Regel durch die Bestimmung von räumlich zusammenhängenden Bereichen, in denen bestimmte Schwellenwerte der Reflektivität überschritten werden. Der DWD hatte dafür parallel zum Aufbau des Radarverbundes das Verfahren KONRAD (KONvektive Entwicklung in RADarprodukten) entwickelt (LANG 2001), welches aus Reflektivitätsdaten des zweidimensionalen Niederschlagsscans größerflächige Schwellenwertüberschreitungen (größer als 15 km<sup>2</sup>) von 46 dBZ extrahiert. Mit der Erweiterung der Radar-Scanstrategie und der Einführung der Dual-Polarisationstechnik wurde mit KONRAD3D dann ein erweitertes Verfahren entwickelt und 2023 operationell eingeführt.

KONRAD3D (WERNER et al. 2024) detektiert mithilfe eines sogenannten adaptiven Schwellenwertverfahrens konvektive Zellen in den dreidimensionalen Messdaten, und ist damit in der Lage, konvektive Zellen bereits in frühen Entwicklungsstufen zu erkennen, ohne gleichzeitig stratiforme Niederschlagsbereiche zu markieren. Dazu werden in jedem Radar-Sweep (Daten eines Antennenumschlags) zunächst zusammenhängende Bereiche mit einer Schwellenwertüberschreitung von 37 dBZ identifiziert. Innerhalb eines solchen Bereichs wird mit dessen Reflektivitätsmittelwert als adaptiver Schwellenwert ein zweiter Detektionslauf durchgeführt. Von den sich daraus ergebenden kleineren Unterbereichen werden nur solche als konvektiv angenommen, die einen Maximalwert über 46 dBZ und eine Reflektivitätsspanne von mindestens 6 dB aufweisen. Diese in jedem Radar-Sweep detektierten 2D-Bereiche werden anhand ihrer Überlappung in der Projektion zum Erdboden zur finalen 3D-Gewitterzelle zusammengefasst, was schematisch in Abbildung 6-1 dargestellt ist.

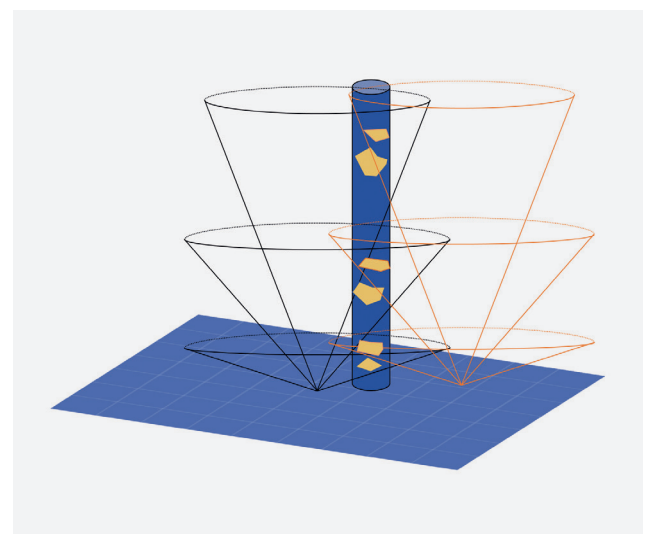


Abbildung 6-1: Erstellung der 3D-Gewitterzellen durch Zusammenfassung von sich in der Projektion zum Erdboden überlappenden 2D-Bereichen erhöhter Radarreflektivität.

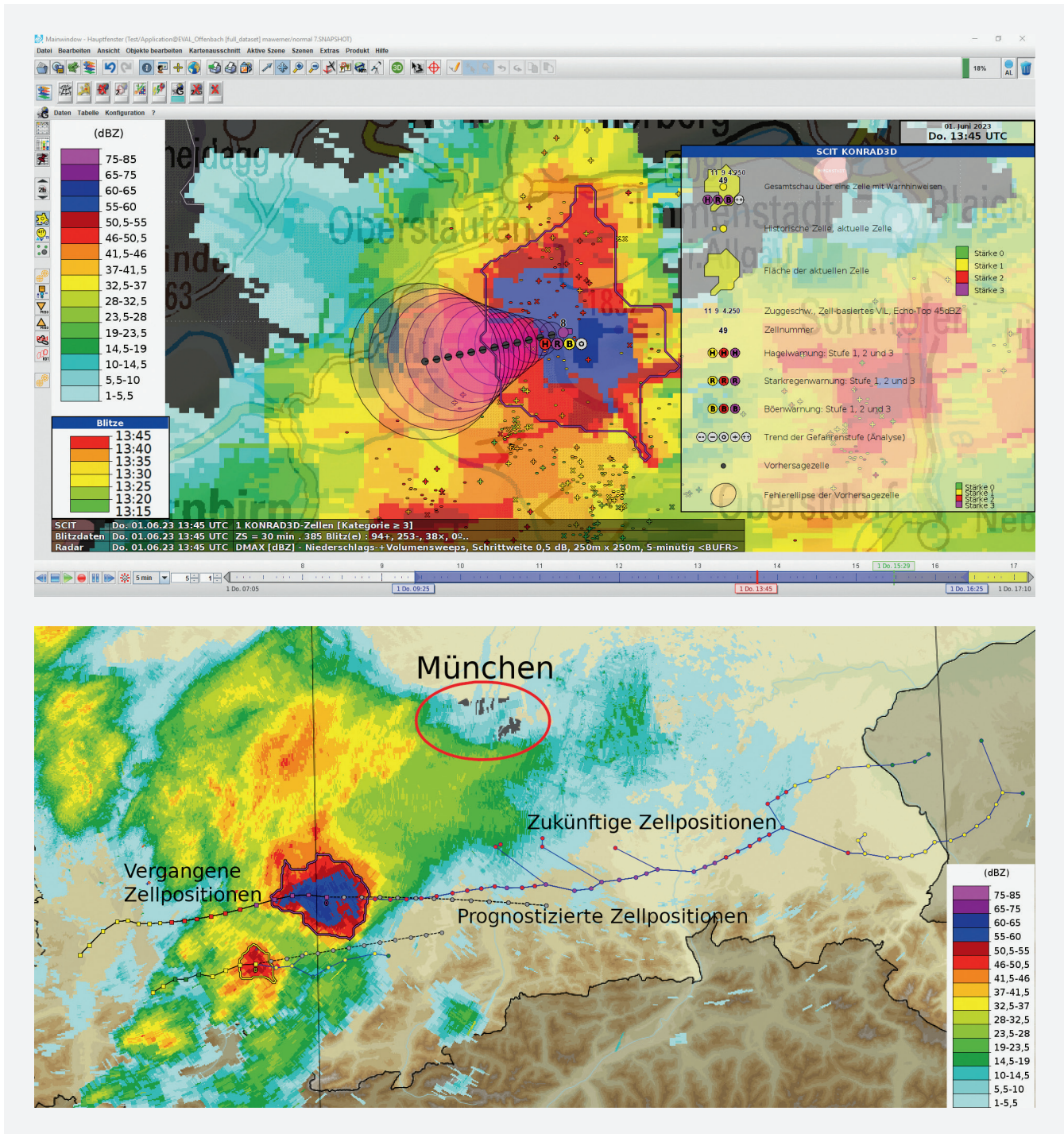


Abbildung 6-2: Oben: Visualisierung einer KONRAD3D-Zelle im DWD-Visualisierungssystem NinJo. Unten: KONRAD3D-Visualisierung einer Superzelle nahe Hohenpeißenberg am 30.04.2021, 15:05 UTC.

Im Anschluss erfolgt die Ableitung der diversen Zelleigenschaften der 3D-Zelle. Hierzu gehören Eigenschaften bezüglich der geometrischen Beschaffenheit einer Zelle (Höhe über Grund des höchsten Radarechos, überdeckter Bereich in Form eines Polygons, Fläche etc.), Eigenschaften, welche die Intensität des Ereignisses beschreiben (Schweregrad einer Zelle, zellbasiertes VIL, maximaler Reflektivitätswert, erwarteter akkumulierter Niederschlag, Rotation etc.) sowie Eigenschaften, die das Vorkommen von Hagel verschiedener Korngrößen und die Blitzaktivität

adressieren. Dabei werden zusätzlich die Blitzdaten des LINET-Messnetzes (BETZ et al. 2009) sowie die Hagelinformationen des DWD-Hydrometeoriklassifikationsproduktes HYMEC (STEINERT 2014; FRECH und STEINERT 2014) den KONRAD3D-Zellen zugeordnet. Aus den abgeleiteten Attributen ermittelt das Verfahren schließlich einen Zellschweregrad sowie Warnflags für Starkregen, Hagel und Windböen. Ein Beispiel einer visualisierten KONRAD3D-Zelle ist in Abbildung 6-2 (oben) dargestellt.

Die Zellverfolgung und Vorhersage der zukünftigen Zellpositionen und Zellgeschwindigkeit (Beispiel in Abbildung 6-2 unten) erfolgt durch eine Kopplung des Kuhn-Munkres-Algorithmus (KUHN 1955; MUNKRES 1957) mit einem Kalman-Filter (KALMAN 1960). Die Kalman-Technik ermöglicht eine stabile Zugbahnbestimmung und -prognose und liefert gleichzeitig bereits eine Unsicherheitsinformation über die bestimmten Vorhersagen der Zellposition.

Der Vorteil solcher objektbasierten Ansätze ist die Fähigkeit, die individuellen Eigenschaften signifikanter konvektiver Zellen zu erkennen, zu verfolgen und in der Vorhersage bzw. in Warnungen explizit zu berücksichtigen. So ist es beispielsweise möglich, die häufig von der Grundströmung abweichenden Zugbahnen von Gewittern (z.B. rechtsausscherende Superzellen oder stationäre Zellen) zu erfassen und bei der Prognose zu berücksichtigen, auch wenn sich der Großteil der benachbarten Niederschläge anders verhält; eine Eigenschaft, welche die oben erwähnten Optischer-Fluss-Methoden nicht besitzen, da bei der Anwendung des Optischen Flusses lokale Bewegungstendenzen häufig durch Glättungen des unterliegenden Bewegungsvektorfeldes verloren gehen. Diese Glättungen sind für die Bestimmung von generellen Verlagerungsvektoren grundsätzlich notwendig, um überhaupt artefaktfreie Extrapolationen bis +2 h Vorhersagezeit oder länger bereitstellen zu können.

### 3.3.2 Mesozyklonenerkennung

Die Radialwinddaten von idealerweise mit dreidimensionalem Scanmuster arbeitenden Wetterradarsystemen können zur Erkennung mesozyklonaler Rotation in Superzellen herangezogen werden. Dazu finden Algorithmen Anwendung, die automatisiert Regionen hoher Rotationsscherung detektieren. Radialwinddaten liegen typischerweise als Gruppe mehrerer Radar-Sweeps unterschiedlicher Antennenkippwinkel jeweils in Polarkoordinaten vor. Rotations-scherung tritt dann als azimutale Scherung in Erscheinung.

Charakteristisch für atmosphärische Rotation sind azimutal annähernd linear ansteigende Radialwindwerte (d. h. konstante Scherung) im Rotationszentrum. Der beim Deutschen Wetterdienst verwendete Algorithmus zur Mesozyklonenerkennung (HENGSTEBECK et al. 2018) basiert auf einem einfachen „Flächenwachstum-Ansatz“ (*Region Growing*), bei dem schrittweise eindimensionale azimutale Mustervektoren zu zweidimensionalen Rotations-signaturen und diese wiederum zu dreidimensionalen Mesozyklonen-Objekten kombiniert werden. Die Mustervektoren beschreiben dabei azimutale Schersequenzen. Zur Konsolidierung der Detektion werden in jedem Schritt des Flächenwachstum-Verfahrens Schwellenwerte angewandt. Insbesondere ist das Vorhandensein mehrerer vertikal geschichteter Rotations-signaturen hilfreich, um Fehlerkennungen zu reduzieren. Schließlich wird dem detektierten Mesozyklonenobjekt eine Gefahrenstufe zugeordnet, wobei die Stärke und räumliche Ausprägung der Rotation, und auch mit geringerer Wichtung reflektivitätsbasierte Schwellenwerte, eingehen.

Die Mesozyklonenerkennung gibt zusätzlich zu klassischen, rein reflektivitätsbasierten Zellerkennungsverfahren Hinweise auf Rotation, wie sie typisch ist für Aufwindbereiche von Superzellen, *Bookend-Vortices* von Bogenechos oder Systeme mit eingebetteter Rotation (z.B. Linien-Echo-Wellen-Muster). Dadurch lassen sich besonders gefahren-trächtige Regionen identifizieren (z.B. höheres Risiko für Starkregen, Hagel, Windböen, Tornados). Die zeitliche Persistenz der detektierten Rotation ist ein zusätzliches Kriterium, um Fehlerkennungen sowie gering ausgebildete, sporadische Rotation von gefährlicher dauerhafter, ausgeprägter Rotation zu unterscheiden. Die azimutale Scherung der Radialwinddaten lässt sich auch in Kompositprodukten direkt visualisieren mithilfe von „Rotations-Spuren“. In Abbildung 6-3 ist ein Rotations-Spur-Komposit (ROT-LL-Track) für die unteren Höhenschichten 0–3 km mit überlagerten Mesozyklonen-Detektionen zu sehen. Rotations-Spur-Komposits erhält man durch Akkumulation des Maximums der Rotationsscherung über einen gewissen Zeitraum (hier 3 h).

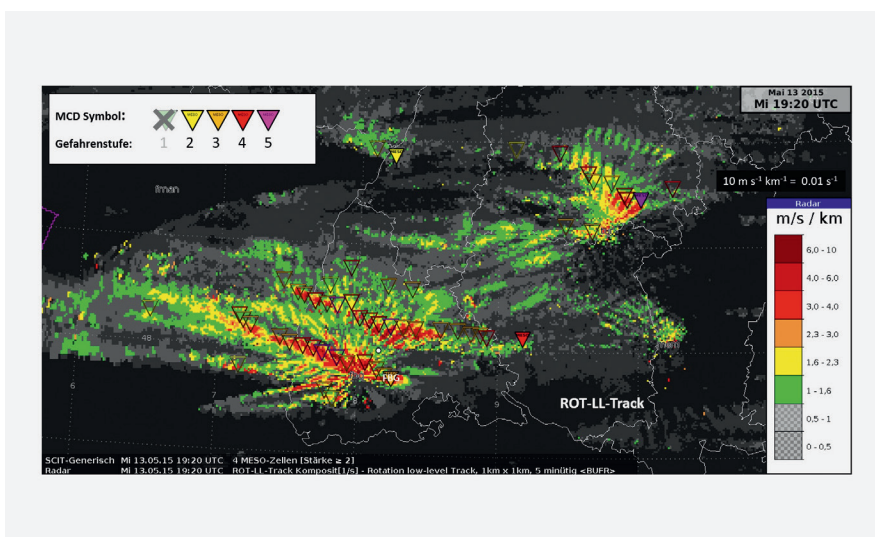


Abbildung 6-3: Komposits der akkumulierten zyklonalen Rotationsscherung im unteren Bereich der Troposphäre (0–3 km über Grund, „low level“) mit überlagerten Mesozyklonenerkennungen (*mesocyclone detection*, MCD). Durch die Akkumulation der maximalen Rotationsscherung über 3 h werden Spuren dauerhafter Rotation sichtbar, die hier von Superzellen stammen. Zum ausgewählten Referenzzeitpunkt 13.05.2015 19:20 UTC detektierte Mesozyklonen sind als gefüllte Dreieckssymbole dargestellt, historische Detektionen hingegen sind durch einen Dreiecksrahmen markiert. Die südlichste und die nördlichste Superzelle steht jeweils mit bestätigten Tornosichtungen im Zusammenhang.

Es sei angemerkt, dass die Rotation eines Tornados zu bodennah und zu kleinräumig ist, um mit Wetterradarsystemen direkt beobachtet zu werden. Es gibt andere Verfahren, die versuchen dualpolarimetrische Charakteristika von aufgewirbeltem Trümmerteilen (Gras, Äste oder Gegenstände) auszunutzen, um eine entsprechende sogenannte *tornadic debris signature* zu detektieren (VAN DEN BROEKE 2015).

### 3.3.3 Probabilistisches Gewitternowcasting

Analysen und Vorhersagen unterliegen verschiedenen Quellen von Unsicherheiten, die das Ergebnis beeinflussen. Hierzu gehören zum einen die Messfehler der Fernerkundungssysteme, zum anderen die Fehler in der Vorhersage. Im Fall von Radarmessungen sind dies beispielsweise die Intensitäts- und Positionskalibrierung, variierende Abtastkörnigkeit der Atmosphäre im Radarverbund sowie zeitlich variable Störeinflüsse z.B. durch Signaldämpfungseffekte, Windkraftanlagen oder Insekten. Eine andere Unsicherheitsquelle stellen Verfahrensunschärfen dar, wie beispielsweise die Abhängigkeit von den Schwellenwerten bei objektbasierten Verfahren oder die Abhängigkeit der Optischer-Fluss-Verfahren von diversen Stellparametern bei der Berechnung der Bewegungsvektorfelder. Die größte Unsicherheitsquelle liegt allerdings in der durch die Extrapolationsverfahren bisher nur begrenzt erfassten dynamischen Entwicklung von Gewittern insbesondere der Erfassung von deren Neubildung und Zerfall. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, werden seit einiger Zeit probabilistische Nowcasting-Verfahren entwickelt. Der DWD entwickelt im Zuge des SINFONY-Projektes (siehe Beitrag 1 in diesem Heft) insbesondere Ensemble-Nowcasting-Verfahren, sowohl im Rahmen des objektbasierten als auch im Rahmen des flächenbasierten (Optischer-Fluss-basierten) Nowcastings. Aus diesen Ensembles lassen sich unter anderem Auftrittswahrscheinlichkeiten von Gewittern ableiten, die im nachfolgenden Warnprozess verarbeitet werden können. Außerdem bieten Ensemblevorhersagen eine solide Basis für die nahtlose Kombination von Nowcasting und numerischer Wettervorhersage sowie für die Verwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz.

### 3.4 Generierung von Warnungen

Das Warnmanagement beim DWD hat drei Stufen und beginnt mit einer Frühinformation bis zu fünf Tage vor einem Ereignis, die auf der numerischen Wettervorhersage des Globalmodells basiert. Die Vorabinformationen mit einem Vorhersagehorizont zwischen 12 und 48 Stunden liefern räumlich und zeitlich präzisere Warn-Informationen, da sie aus höher aufgelösten Regionalmodellen abgeleitet werden. In der letzten Stufe, der Wetter- und Unwetterwarnung, werden die Modellvorhersagen durch Beobachtungsdaten ergänzt. Im Vorhersagehorizont von bis zu zwei Stunden haben Beobachtungen und Nowcasting-Verfahren das größte Gewicht, da sie in diesem Bereich besonders kleinräumige Gewitter mit hoher zeitlicher und räumlicher Präzision vorhersagen können.

### 3.4.1 Erstellung amtlicher Warnungen

Amtliche Unwetterwarnungen des DWD und damit auch Gewitterwarnungen werden in der Vorhersagezentrale von den Warnmeteorologinnen und Warnmeteorologen erstellt. Besonders während unübersichtlicher Unwetterlagen unterstützen Nowcastingsysteme die Meteorologen, indem verschiedene Datenarten zielgerichtet kombiniert werden und Kurzzeitfristvorhersagen für eine Vielzahl von Gewittern gleichzeitig erzeugt werden können. Die Nowcastingsysteme liefern den Meteorologen Warnvorschläge, die auf die Warnstrategie angepasst sein müssen. Dies erfordert eine Informationsverdichtung: Nowcastingsysteme oder den Nowcastingverfahren nachgelagerte automatische Verfahren müssen die Vorhersagen auf die definierten Warngebiete und Warnstufen abbilden. Warngebiete können beispielsweise Landkreise, Gemeinden oder auch die Umgebung eines Flughafens sein. Ganz gleich, ob das Nowcastingverfahren den Verlauf von Gewitterzellen als Objekt vorhersagt, Vorhersagen auf einem Gitter erzeugt oder die Vorhersage mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit einhergeht, es muss für das zu bewarnende Gebiet eine konsistente Warnung in den für die Warnkategorie passenden Warnstufen generiert werden. Der Umgang mit unterschiedlichen, eventuell widersprüchlichen Vorhersagen für das gleiche Gebiet und ggf. Eintrittswahrscheinlichkeiten muss dabei gemeistert werden.

### 3.4.2 Integrative Nowcasting-Systeme

NowCastMIX ist das integrative Nowcasting-System für den Warndienst im DWD, das eine aufwendige Vorverarbeitung sämtlicher Fernerkundungs- und NWV-Daten unternimmt, um optimierte Warnvorschläge bzw. Warnpolygone automatisch zu generieren. NowCastMIX kombiniert Daten aus Zelltrackingverfahren (vor allem KONRAD3D), Blitzortungen (LINET), quantitative Radaranalysen und -vorhersagen mit Zellverlagerungsvektoren, angeeichte Niederschlagsanalysen, 3D-Radarprodukte (Mesozyklonerkennungen, VIL), Echtzeit-Meldungen von Synop-Stationen (MREPs) und NWV-Modelldaten der meteorologischen Umgebungsbedingungen (Höhenwinde, Feuchtegehalt usw.). Die Daten werden auf ein Deutschland-Gitter mit einer 1 km x 1 km Auflösung gebracht. Ein optimiertes Verlagerungsfeld wird anhand der verfügbaren Tracking- und Optischer-Fluss-Vektoren erstellt.

In den Bereichen konvektiver Zellen werden Wahrscheinlichkeiten für Gewitter-Attribute (starke Böen, Hagel, Starkregen) mithilfe einer Hierarchie von Fuzzylogik-Regeln berechnet. Daraus kann für jede Zelle eine passende Gewitter-Warnkategorie zugeordnet werden. Anhand des lokalen Wertes des Verlagerungsfeldes wird dann ein Polygon in Form einer Warnkeule erstellt, die das gefährdete Gebiet während der nächsten 60 Minuten einschließt. Damit bei einer hohen Gewitteraktivität die räumliche Komplexität und kurzlebige Wechselhaftigkeit des gesamten Warnbildes nicht zu hoch wird und dadurch zur Verwirrung bei Endkunden führt, wird ein „Ensemble-Clustering-Ver-

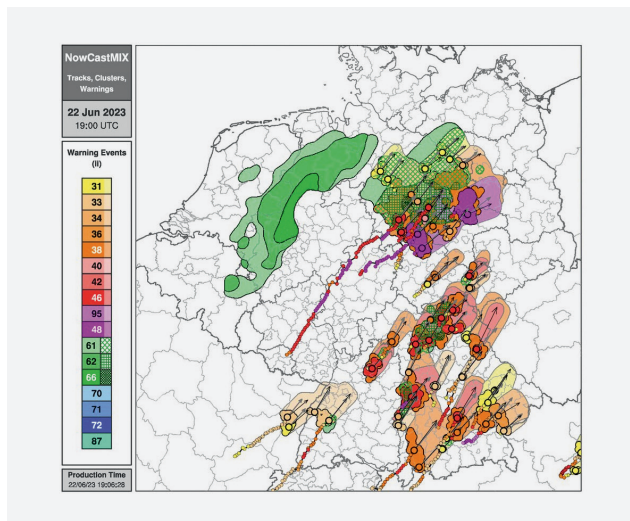


Abbildung 6-4: Beispiel einer Warnlage bei NowCastMIX, 19 UTC am 22.06.2023. Dargestellt sind Gewitter-Cluster (Polygone in den Schwerestufen Gelb, Ocker, Rot und Violett) mit ihren Zentren (Kreise) und Tracks in der Vergangenheit (verbundene kleine Kreise), aktuelle Verlagerungsvektoren mit (schwarz) und ohne (grau) zellbasiertem Tracking. Starkregen-Gebiete (grüne Flächen, mit 3 Schwerestufen) überlappen zum Teil die Gewitterpolygone (schraffiert).

fahren“ zur Beruhigung und Glättung der Warnpolygone eingesetzt.

Zusätzlich zu diesen Warnungen für Gewitter können auch Starkregen-Warnungen auf einer Zeitskala von sechs Stunden erstellt werden. Hierfür werden neben Analysen des bereits gefallenen Regens sowie Extrapolationen der Radardaten auch Niederschlagsquantile des ICON-D2-EPS-Modells eingearbeitet und kombiniert.

Durch diese Arbeitsschritte erstellt NowCastMIX integrierte hochaktuelle und qualitativ wertvolle Warnungen für Gewitter und Starkregen mit einer hohen Taktfrequenz (5 min; siehe Abbildung 6-4). Diese werden für die zentralen Warndienste, für die Flugmeteorologie sowie für den Katastrophenschutz zur Verfügung gestellt. Die Warnpolygone, zusammen mit Tracks von Gewitterzellen, werden auch für die breitere Öffentlichkeit in der WarnWetter-App des DWD in Echtzeit gezeigt.

### 3.4.3 Gewitterwarnungen für Verkehrsflughäfen

Die Begleiterscheinungen von Gewittern stellen eine große Gefahr für den Flug- aber auch für den Vorfeldbetrieb an Flughäfen dar. Hierzu gehören unter anderem Windböen, Hagel- und Blitzschlag.

Für Flughäfen werden international standardisierte Wetterbeobachtungsmeldungen, sogenannte METARs (*Meteorological Aerodrome Report*), halbstündig in codierter Form herausgegeben. Bei für die Luftfahrt signifikanter Wetteränderung, wie ein aufziehendes Gewitter, wird eine Sonder-

wettermeldung (SPECI) erstellt. Diese stellen die Grundlage für die Anfliegbarkeit des Flughafens, das eingesetzte Flugverfahren, die zu benutzenden Pisten, sowie Start- und Anflugrichtung dar, dienen aber auch Piloten zur Berechnung der Flugperformance bei Start und Landung.

In Deutschland wurde im Jahr 2022 durch das DWD-Projekt AutoMETAR eine vollautomatische Flughafen-Wetterbeobachtung und -meldung für alle 15 internationalen Verkehrsflughäfen eingeführt. Das Fachverfahren autoKON des eingeführten Systems autoOBS ist für die Erfassung konvektiver Wetterelemente wie Gewitter (TS im METAR) und Schauer (SH) sowie konvektiver Wolken wie *Towering Cumulus* (TCU) und *Cumulonimbus* (CB) zuständig. Gewitter werden aus Blitzortungen (LINET) abgeleitet, Hagel durch die Hydrometeorklassifikation (Hymec), Schauer und konvektive Bewölkung aus Wetterradardaten und KONRAD3D-Zellerkennungen. Die konvektiv verfügbare potenzielle Energie (CAPE) aus dem ICON-EU-Modell dient als Veto zur Vermeidung von Fehlerkennungen. Das Verfahren autoKON bringt die unterschiedlichen Datenarten auf ein gemeinsames Gitter und bewertet die konvektive Wettererscheinung anhand einer Fuzzy-Logik einzeln für jeden Gitterpunkt. Durch Zählen konvektiver Pixel erfolgt eine Informationsverdichtung, um eine konsistente Meldung des konvektiven Wetters und Wolken für jeden Flughafen zu erzeugen.

autoKON ist in das Gesamtsystem autoOBS eingebettet, zu dem auch die Fachverfahren autoPWX und autoCLD gehören. autoPWX bestimmt das gegenwärtige Wetter primär anhand von Daten des Flughafen-Messfeldes und autoCLD leitet die Bewölkung anhand von Daten der Ceilometer an den Schwellen der Start- und Landebahnen ab. Die Meldung von autoKON wird sowohl in autoPWX als auch autoCLD verarbeitet, um eine konsistente Wetterbeobachtung durch autoOBS zu erzeugen. Die von autoOBS minütlich erzeugten Wetterbeobachtungsmeldungen werden an ASDUV (Automatisches System zur Datenerfassung und -verbreitung) weitergeleitet, das vom DWD an den Flughäfen betrieben wird und die halbstündigen Routinewettermeldungen sowie bei Bedarf Sonderwettermeldungen erstellt. Der Wettermeldung wird eine Landewettervorhersage, der TREND, mit einer zweistündigen Gültigkeit durch die zuständige Luftfahrtberatungszentrale angefügt, bevor sie an die Deutsche Flugsicherung versendet und international verteilt wird.

MeteoSchweiz hat für die Umstellung auf durchgehend automatisch erzeugte Flughafenwettermeldungen das Projekt AMAROC (*AutoMetar/AutoReporting round the clock*) ins Leben gerufen, in dem drei Algorithmen zur Bestimmung von Hagel, Wolken und Konvektion entwickelt wurden. Die über SMART (*System for Meteorological Reporting*) verfügbare Messdateninfrastruktur wird durch das AMAROC-Projekt angebunden und durch neue Messsysteme und -methoden erweitert (MeteoSchweiz, Jahresbericht Flugwetter 2022, <https://www.yumpu.com/de/document/read/68352735/jahresbericht-flugwetter-2022>).

Für die automatische Gewittererkennung in Echtzeit an Flughäfen in Österreich und an automatischen Beobachtungsstationen entlang von Sichtflugrouten werden seit 2014 Wetterradar- und Blitzdaten verwendet (KALTENBÖCK 2012, 2016). Anfangs als Vorschlag für einzelne Flughäfen im Remote-Betrieb von der Ferne aus und im AUTOMETAR-Betrieb während unbesetzter Nachtstunden wird das System sukzessive weiter für den automatischen Betrieb der Bundesländerflughäfen ausgedehnt. Für die METAR-Gewittermeldung (TS oder VCTS) am Flughafen sind zwei Registrierungen des EUCLID Blitzortungssystems (SCHULZ et al. 2016) innerhalb der letzten 10 min notwendig, die vorab auf Plausibilität mit Wetterradar- und Blitzdaten überprüft werden. Liegt keine Blitzerfassung im Flughafenbereich vor, werden für die Detektion von Cumulonimbus (CB) zwei Niveaus in 3 bis 4 und 5 bis 6 km Höhe aus dreidimensionalen CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*)-Reflektivitätsdaten des österreichischen Wetterradar-netzwerkes verwendet. Im Zweischichtverfahren werden Falscherfassungen durch Schmelzschichteffekte, Störungen durch Fremdstrahler oder lückenhafte Volumenerfassung oder Verarbeitung eliminiert. Beginnende hochreichende Konvektion (TCU) soll zukünftig über den Krümmungsanteil des Zellerkennungs- und Verlagerungssystems erfasst werden. Die automatische Detektion der Gewitterfallböen mittels erhöhter Reflektivität und Divergenz im bodennahen Dopplerwindfeld wird derzeit visuell dem Forecaster ausgegeben und muss im Bedarfsfall manuell als Windscherungsinformation der METAR-Meldung hinzugefügt werden.

#### 4 Gewitterwarnung morgen: Nahtlose Vorhersagen und Warnungen bis zu 12 Stunden im Voraus

Das Herausgeben sehr frühzeitiger Gewitterwarnungen ist nicht mithilfe von beobachtungsbasierten Verfahren realisierbar. Das Nowcasting liefert für etwa die erste Stunde der Vorhersagezeit zutreffende Ergebnisse, jedoch nimmt die Vorhersagegüte mit der Zeit sehr schnell ab. Ab einer Vorhersagezeit von ca. zwei Stunden sind Nowcasting-basierte Warnungen weniger sinnvoll. Meteorologen und Meteorologinnen verlassen sich dann überwiegend auf die Prognosen der numerischen Wettervorhersagemodelle (NWV). Aus dieser Verwendung zweier in ihren Eigenschaften völlig verschiedener Vorhersagearten ergeben sich zwei Probleme, deren Lösung Gegenstand gegenwärtiger Forschung und Entwicklung ist: der Bruch am Übergang zwischen Nowcasting und NWV und die Tatsache, dass Nowcasting nur bereits beobachtete Gewitter beinhaltet, jedoch keine Entstehung neuer Zellen.

Um diese Probleme zu behandeln, wurde beim DWD im Jahr 2017 das Projekt *Seamless Integrated Forecasting System* (SINFONY) ins Leben gerufen. Das Ziel von SINFONY ist es, radarbasiertes Nowcasting und NWV zunächst unabhängig voneinander zu verbessern. In einem zweiten Schritt sollen aus beiden Vorhersagequellen kombinierte Produkte entstehen, die die Vorhersagen des

Nowcastings nahtlos in die der NWV überblenden. Das SINFONY-System wird in Beitrag 1 im Detail vorgestellt. Hierdurch werden in Zukunft die Vorhersagen für konvektive Niederschläge weiter verbessert und den Nutzerbedürfnissen angepasst. Ziel der kombinierten Verfahren ist es zudem, eine Quantifizierung von Unsicherheiten bereitzustellen sowie Vorwarnzeiten zu erhöhen.

Im Zuge des DWD-Entwicklungsprogramms „Risiko-basierte, anwendungsorientierte, individualisierbare Bereitstellung optimierter Warninformationen (RainBoW)“ wird der DWD in den nächsten Jahren ein neues Warnsystem entwickeln. Hierin sollen u. a. die Daten aus dem SINFONY-Projekt zur Erstellung von Warnungen vor Gewittern und Starkniederschlag herangezogen werden. Neben den bekannten standardisierten Warnungen sollen durch RainBoW auch individuell zugeschnittene Warnungen unter Angabe eines Wiederkehrintervalls und/oder der zu erwartenden Auswirkungen automatisiert erstellt werden. Die generierten Warninformationen sollen bis zu einem Zeithorizont von fünf Tagen herausgegeben werden und jeweils mit einer Unsicherheitsangabe versehen sein. Diese Unsicherheit soll sinken, je näher das warnwürdige Ereignis rückt bis hin zu einer detektionsbasierten Warnung für ein bereits beobachtetes Ereignis, welches mit Sicherheit eintritt.

#### Literatur

- AUTONÈS, F., CLAUDON, M., 2022: Algorithm Theoretical Basis Document for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. Tech. Rep. NWC/CDOP3/GEO/MF-PI/SCI/ATBD/Convection, Issue 1, Rev 0.1, 28<sup>th</sup> February 2022, Météo-France, Toulouse, [https://www.nwcfaf.org/Downloads/GEO/2021/Documents/Scientific\\_Docs/NWC-CDOP3-GEO-MF-PI-SCI-ATBD-Convection\\_v1.0.1.pdf](https://www.nwcfaf.org/Downloads/GEO/2021/Documents/Scientific_Docs/NWC-CDOP3-GEO-MF-PI-SCI-ATBD-Convection_v1.0.1.pdf), Abruf: 08.07.2024.
- AYZEL, G., HEISTERMANN, M., WINTERRATH, T., 2019: Optical flow models as an open benchmark for radar-based precipitation nowcasting (rainymotion v0.1). *Geoscientific Model Development* **12**, 1387–1402, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1387-2019>.
- BATTAN, L.J., 1953: Duration of convective radar cloud units. *Bulletin of the American Meteorological Society* **34**, 227–228.
- BETZ, H.D., SCHMIDT, K., LAROCHE, P., BLANCHET, P., OETTINGER, W.P., DEFER, E., DZIEWIT, Z., KONARSKI, J., 2009: LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research* **91**, 564–573, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012>.
- BLUESTEIN, H.B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Observations and Dynamics. *Springer-Praxis Books in Environmental Sciences*, Springer, 483 pp.
- BLUESTEIN, H.B., JAIN, M.H., 1985: Formation of Mesoscale Lines of Precipitation: Severe Squall Lines in Oklahoma during the Spring. *Journal of the*

- Atmospheric Sciences* **42**, 1711–1732, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2).
- BLUESTEIN, H.B., LINDSEY, D.T., BIKOS, D., REIF, D.W., WIENHOFF, Z.B., 2019: The relationship between overshooting tops in a tornadic supercell and its radarobserved evolution. *Monthly Weather Review* **147**, 4151–4176, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0159.1>.
- BROWNING, K.A., LUDLAM, F.H., 1962: Airflow in convective storms. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **88**, 117–135, <https://doi.org/10.1002/qj.49708837602>.
- BROWNING, K.A., 1981: Forward to: Nowcasting: mesoscale observations and short-range prediction. In: *Proceedings of an International Symposium*. BATTRICK, B. und MORT, J. (Hrsg.), Hamburg, Germany, 25–28 August, European Space Agency SP-16.
- BURGESS, D.W., 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part I—Mesocyclone signatures. Preprints, 17<sup>th</sup> Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, American Meteorology Society, 97–103.
- DIXON, M., WIENER, G., 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting – A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **10**, 785–797.
- DONALDSON, R.J., 1970: Vortex signature recognition by a Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **9**, 661–670, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1970\)009,0661:VSRBAD.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1970)009,0661:VSRBAD.2.0.CO;2).
- DOSWELL III, C.A., 2001: Severe Convective Storms – An Overview. *Meteorological Monographs* **28**, <https://doi.org/10.1175/0065-9401-28.50.1>.
- FOOTE, G.B., MOHR, C.G., 1979: Results of a Randomized Hail Suppression Experiment in Northeast Colorado. Part VI: Post Hoc Stratification by Storm Intensity and Type. *Journal of Applied Meteorology* **18**, 1589–1600.
- FRECH, M., STEINERT, J., 2014: Polarimetric radar observations during an orographic rain event and the performance of a hydrometeor classification scheme. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions* **11**, 8845–8877.
- FRIEDRICH, K., HAGEN, M., EINFALT, T., 2006: A Quality Control Concept for Radar Reflectivity, Polarimetric Parameters, and Doppler Velocity. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **23**, 865–887, <https://doi.org/10.1175/JTECH1920.1>.
- FRITSCH, J.M., FORBES, G.S., 2001: Mesoscale convective systems. *Meteorological Monographs* **28**, 323–357.
- GERMANN, U., ZAWADZKI, I., 2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Methodology. *Monthly Weather Review* **130**, 2859–2873.
- HADEN, T., KANN, A., WITTMANN, C., PISTOTNIK, G., BICA, B., GRUBER, C., 2011: The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. *Weather and Forecasting* **26**, 166–183, <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222451.1>.
- HANDWERKER, J., 2002: Cell tracking with TRACE3D – a new algorithm. *Atmospheric Research* **61**, 15–34.
- HELMERT, K., TRACKSDORF, P., STEINERT, J., WERNER, M., FRECH, M., RATHMANN, N., HENGSTEBECK, T., MOTT, M., SCHUMANN, S., MAMMEN, T., 2014: DWDs new radar network and post-processing algorithm chain. *Extended Abstracts, Eighth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Garmisch Patenkirchen, Germany, ERAD, [http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/237\\_Helmert.pdf](http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/237_Helmert.pdf), Abruf: 08.07.2024.
- HENGSTEBECK, T., WAPLER, K., HEIZENREDER, D., JOE, P., 2018: Radar Network-Based Detection of Mesocyclones at the German Weather Service. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **35**, 299–321, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0230.1>.
- HENRY, S.G., 1993: Analysis of thunderstorm lifetime as a function of size and intensity. *Preprints, 26<sup>th</sup> Conf. on Radar Meteorology*, Norman, OK, American Meteorology Society, 138–140.
- HERING, A., MOREL, C., GALLI, G., SÉNESI, S., AMBROSETTI, P., BOSCACCI, M., 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proc. 3<sup>rd</sup> European Conf. on Radar Meteorology and COST-717 Final Seminar*, 6–10 September 2004, Visby, Sweden, 206–211.
- HOFFMANN, J., 2008: Entwicklung und Anwendung von statistischen Vorhersage – Interpretationsverfahren für Gewitternowcasting und Unwetterwarnungen unter Einbeziehung von Fernerkundungsdaten. Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin, <https://doi.org/10.17169/refubium-15903>.
- HOLMLUND, K., GRANDELL, J., SCHMERTZ, J., et al., 2021: Meteosat Third Generation (MTG): Continuation and Innovation of Observations from Geostationary Orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society* **102**, E990–E1015, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0304.1>.
- HOUZE, R.A., 2004: Mesoscale convective systems, *Reviews of Geophysics* **42**, <https://doi.org/10.1029/2004RG000150>.
- ILLINGWORTH, A.J., GODDARD, J.W.F., CHERRY, S.M., 1987: Polarization radar studies of precipitation development in convective storms. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **113**, 469–489, <https://doi.org/10.1002/qj.49711347604>.
- JAMES, P.M., REICHERT, B.K., HEIZENREDER, D., 2018: NowCastMIX: Automatic Integrated Warnings for Severe Convection on Nowcasting Time Scales at the German Weather Service. *Weather and Forecasting* **33**, 1413–1433, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0038.1>.
- JOHNSON, J.T., MACKEEEN, P.L., WITT, A., DEWAYNE MITCHELL, E., STUMPF, G.J., EILTS, M.D., THOMAS, K.W., 1998: The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. *Weather and Forecasting* **13**, 263–276.

- KALMAN, R.E., 1960: A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering* **82D**, 33–45.
- KALTENBÖCK, R., 2012: New generation of dual polarized weather radars in Austria. *Extended Abstracts, Seventh European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Toulouse, France, [http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended\\_abs/NET\\_166\\_ext\\_abs.pdf](http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_166_ext_abs.pdf), Abruf: 08.07.2024.
- KALTENBÖCK, R., 2016: Wetterradar – Konvektion im Remote/AUTO-METAR. Herausforderungen für die radar-basierte automatische Erfassung von konvektiven Ereignissen im Alpenraum im Bereich der Luftfahrt. *ÖGM-DMG. Fortbildungstag/Flugmeteorologie am 25. November 2016 in Hall in Tirol, Präsentation mit 43 Folien inkl. Video*.
- KOBER, K., TAFFERNER, A., 2009: Tracking and Nowcasting of Convective Cells Using Remote Sensing Data from Radar and Satellite, *Meteorologische Zeitschrift* **1**, 75–84, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/359>.
- KUHN, H.W., 1955: The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly* **2**, 83–97.
- KUMJIAN, M.R., RYZHKOV, A.V., 2008: Polarimetric Signatures in Supercell Thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **47**, 1940–1961, <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1874.1>.
- KUMJIAN, M.R., RYZHKOV, A.V., 2009: Storm-Relative Helicity Revealed from Polarimetric Radar Measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences* **66**, 667–685, <https://doi.org/10.1175/2008JAS2815.1>.
- KUMJIAN, M.R., 2013: Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables. *Journal of Operational Meteorology* **1**, 226–242, <https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119>.
- KUMJIAN, M.R., 2013: Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part II: Warm- and Cold-Season Applications. *Journal of Operational Meteorology* **1**, 243–264, <http://dx.doi.org/10.15191/nwajom.2013.0120>.
- LANG, P., 2001: Cell tracking and warning indicators derived from operational radar products. *30<sup>th</sup> Int. Conf. on Radar Meteorology*, Munich, Germany, American Meteorological Society, 245–247.
- LEINONEN, J., HAMANN, U., GERMAN, U., MECIKALSKI, J.R., 2022: Nowcasting thunderstorm hazards using machine learning: the impact of data sources on performance. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **22**, 577–597, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-577-2022>.
- LEMON, L.R., 1980: Severe Thunderstorm Radar Identification Techniques and Warning Criteria: A Preliminary Report. *NOAA Tech. Memo. NWS NSSFC*, 60 pp.
- MARKOWSKI, P.M., 2002: Hook Echoes and Rear-Flank Downdrafts: A Review. *Monthly Weather Review* **130**, 852–876, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<0852:HEARFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<0852:HEARFD>2.0.CO;2).
- MEYER, V., HÖLLER, H., BETZ, H.D., 2013: Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data. *Atmospheric Chemistry and Physics* **13**, 5137–5150.
- MUNKRES, J., 1957: Algorithms for the assignment and transportation problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* **5**, 32–38.
- MÜLLER, R., BARLEBEN, A., HAUSSLER, S., JERG, M., 2022: A Novel Approach for the Global Detection and Nowcasting of Deep Convection and Thunderstorms. *Remote Sensing* **14**, <https://doi.org/10.3390/rs14143372>.
- SCHMETZ J., PILI, P, TJEMKES, S., JUST, D., KERKMANN, J., ROTA, S., 2002: An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *BAMS* **83**, 977–992, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2).
- SCHULZ, W., DIENDORFER, G., PEDEBOY, S., POELMAN, D.R., 2016: The European lightning location system EUCLID – Part I: Performance analysis and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **16**, 595–605.
- STEINERT, J., 2014: Hydrometeor Classification for the DWD Weather Radar Network: First Verification Results. *Eighth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Garmisch Patenkirchen, Germany, ERAD, [http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/225\\_Steinert.pdf](http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/225_Steinert.pdf), Abruf: 08.07.2024.
- WAPLER, K., 2021: Mesocyclonic and non-mesocyclonic convective storms in Germany: storm characteristics and life-cycle. *Atmospheric Research* **248**, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105186>.
- WAPLER, K., BEYER, M., 2022: Analysis of significant tornado events in Central Europe: synoptic situation and convective development. *Meteorologische Zeitschrift* **31**, 367–388, <http://dx.doi.org/10.1127/metz/2022/1126>.
- WEISMAN, M.L., KLEMP, J.B., 1982: The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy. *Monthly Weather Review* **110**, 504–520, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0504:TDonSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDonSC>2.0.CO;2).
- WEISMAN, M.L., ROTUNNO, R., 2004: A Theory for Strong Long-Lived Squall Lines. Revisited. *Journal of the Atmospheric Sciences* **61**, 361–382, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0361:ATFSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0361:ATFSL>2.0.CO;2).
- WERNER, M., 2014: A New Radar Data Post-Processing Quality Control Workflow for the DWD Weather Radar Network. *Extended Abstracts, Eighth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology*, Garmisch Patenkirchen, Germany, ERAD, [http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/079\\_Werner.pdf](http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/079_Werner.pdf), Abruf: 08.07.2024.
- WERNER, M., FEGER, R., JOSIPOVIC, L., 2024: Detection, Tracking, and Nowcasting of Convective Cells with KONRAD3D. *In Vorbereitung*.

- WILSON, J.W., 1966: Movement and predictability of radar echoes. *Technical Memorandum* **28**, National Severe Storms Laboratory, [https://library.oarcloud.noaa.gov/noaa\\_documents.lib/NOAA\\_historic\\_documents/ESSA/ESSA\\_ERLTM\\_NSSL/IERTM\\_NSSL\\_28.pdf](https://library.oarcloud.noaa.gov/noaa_documents.lib/NOAA_historic_documents/ESSA/ESSA_ERLTM_NSSL/IERTM_NSSL_28.pdf), Abruf: 08.07.2024.
- WILSON, J.W., CROOK, N.A., MUELLER, C.K., SUN J., DIXON, M., 1998: Nowcasting Thunderstorms: A Status Report. *Bulletin of the American Meteorological Society* **79**, 2079–2099.
- WMO, 2017: Guidelines for Nowcasting Techniques. WMO-No. 1198, WMO Geneva, 82 S.
- VAN DEN BROEKE, M.S., 2015: Polarimetric Tornadic Debris Signature Variability and Debris Fallout Signatures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **54**, 2389–2405, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0077.1>.
- ZINNER, T., MANNSTEIN, H., TAFFERNER, A., 2008: Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteorology and Atmospheric Physics* **101**, 191–210, <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0290-y>.
- ZRNIC, D.S., BURGESS, D.W., HENNINGTON, L.D., 1985: Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2**, 425–438, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1985\)002<0425:ADOMSW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1985)002<0425:ADOMSW>2.0.CO;2).
- DR. THOMAS HENGSTEBECK  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
thomas.hengstebeck@dwd.de
- DR. PAUL JAMES  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Meteorologische Anwendungsentwicklung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
paul.james@dwd.de
- LUKAS JOSIPOVIC  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
lukas.josipovic@dwd.de
- DR. KATHRIN WAPLER  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Betriebliche Prozessunterstützung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
kathrin.wapler@dwd.de

## Kontakt

DR. MANUEL WERNER  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
manuel.werner@dwd.de

DR. ROBERT FEGER  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
robert.feger@dwd.de

DIRK HEIZENREDER  
Deutscher Wetterdienst  
Leiter Abteilung Zentrale Meteorologische Fachverfahren  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
dirk.heizenreder@dwd.de

DR. KATHLEEN HELMERT  
Deutscher Wetterdienst  
Referat Verfahrensentwicklung Fernerkundung  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
kathleen.helmert@dwd.de

U. GERMANN, M. SARTORI, A. HERING, M. BOSCACCI, L. CLEMENTI, B. CALPINI

# 7 Radarmeteorologie – Herausforderungen im Gebirge

## Radar Meteorology – Challenges in a Mountainous Region

### Zusammenfassung

Wegen der steilen Hänge, der starken orografischen Niederschläge und der hohen Häufigkeit von Sturzfluten, Hangrutschungen und Murgängen ist in den Alpen die Nachfrage nach hochaufgelösten Wetterradarmessungen von Regen, Schnee, Hagel- und Gewitterzellen besonders hoch. Aber der Bau und Betrieb von Radaren und die Auswertung der Daten sind in den Bergen mit großen Herausforderungen verbunden. Dieser Artikel liefert eine Einführung in die Thematik mit Fokus auf die Schweizer Alpen.

### Summary

Due to the steep slopes, heavy orographic precipitation and the high frequency of flash floods, landslides and debris flows, the demand for high-resolution weather radar measurements of rain, snow, hail and thunderstorm cells is particularly high in the Alps. However, the construction and operation of radars and the analysis of the data are associated with major challenges in the mountains. This article provides an introduction to the topic, focussing on the Swiss Alps.

## 1 Einleitung

Viele Herausforderungen der Radarmeteorologie gelten in einer Bergregion gleich wie im Flachland. Einige hingegen betreffen besonders stark oder ausschließlich die Radar-anwendung im Gebirge. Die Wetterphänomene, die es zu beobachten, und die Naturgefahren, vor denen es zu warnen gilt, werden stark von der Orografie beeinflusst. Die Häufigkeit und die Intensität von Murgängen und Sturzfluten beispielsweise hängen direkt von der Hangneigung ab, weshalb diese gravitativen Naturgefahren geradezu typisch sind für die steilen Hänge einer Bergregion. Die Landnutzung der Menschen und die daraus abgeleiteten Bedürfnisse und die Anforderungen an die Radardaten sind in den Bergen ebenfalls anders als im Flachland.

Bei der Wahl des Standortes für den Bau eines Wetterradars spielt die Abschattung des Radarstrahles durch die Berge eine zentrale Rolle. Auch der Zugang, die Stromversorgung, die Datenübermittlung und die Baubedingungen vor Ort können die Wahl des Standortes stark einschränken, insbesondere bei Standorten über 2000 Metern über Meer (Abbildung 7-1). Bei der Datenprozessierung gibt es in einer Bergregion weitere große Herausforderungen. Das wohl prominenteste Beispiel ist die Unterdrückung einer außerordentlich hohen Anzahl starker Bodenechos. Unter Bodenechos versteht man die aus der Rückstreuung des Radarstrahles an der Erdoberfläche resultierenden Störsignale im Radarbild. Eine weitere große Herausforderung steckt in der Interpretation der Radarmessungen in den entlegenen Tälern, wo die unteren Schichten der Atmosphäre

infolge der Abschattung verborgen bleiben. Die Niederschlagsbestimmung ist besonders stark betroffen, da in abgeschatteten Regionen nur Radarechos aus der Höhe vorliegen, welche nur beschränkt korrelieren mit dem Niederschlag am Boden.

Die meisten Länder fokussieren beim Design der Wetterradare, bei deren Konfiguration und bei der Entwicklung der Algorithmen auf die Anwendungen im Flachland. Nur wenige befassen sich mit den spezifischen Herausforderungen der Radaranwendung im Gebirge. Die Schweiz ist geprägt von Hügeln und Bergen in allen Regionen, hat



Abbildung 7-1: Wetterradar in der Südwestschweiz auf der Pointe de la Plaine Morte auf 2937 Metern über Meer.

selbst in den Alpen eine relativ dichte Besiedlung und starke Landnutzung und muss sich seit der ersten Radarinstallation Ende der 50er Jahre den besonderen Herausforderungen in einer Bergregion stellen und Lösungen für die Probleme suchen. Dieser Artikel orientiert sich an den in der Schweiz in sechs Jahrzehnten der operationellen Radaranwendung gemachten Erfahrungen und erlaubt einen Einstieg in die Thematik. Für eine detaillierte wissenschaftliche Besprechung wird auf den Review-Artikel GERMANN et al. (2022) und die dort zitierte Literatur verwiesen.

## 2 Zweck der Radarmessung im Gebirge

Der Zweck der Radarmessung hängt stark von den für eine Region typischen Wetterphänomenen sowie der Bedürfnisse der Anwender ab. Die Alpen können auf der windzugewandten Seite intensive und langanhaltende Stauniederschläge verursachen. Die Grenze zwischen einem Gebirge und einer sich im Sommerhalbjahr stark aufheizenden Ebene ist ein bevorzugter Ort für die Entstehung von Gewittern, Mesozyklonen, Starkniederschlags- und Hagelzellen. Das wird beobachtet an der Südflanke der Alpen am Rande der Poebene, auf der Nordseite zwischen den Voralpen und dem Schweizer Mittelland und auf beiden Seiten des Juras. Auch die Lebensdauer, Verlagerungsgeschwindigkeit und Zuglinie dieser konvektiven Systeme werden entscheidend von der Orografie beeinflusst. Je stärker der Niederschlag und je langsamer die Verlagerung, desto größer sind die am Boden auftreffenden Wassermengen und das Risiko für Sturzfluten und Hangrutschungen. Trifft der starke Niederschlag einen steilen Hang mit losem Gesteinsmaterial oder gar schmelzendem Permafrost, muss mit Murgängen und Bergstürzen gerechnet werden. In der Schweiz werden Radarmessungen seit zwei Jahrzehnten für Warnungen eingesetzt (HERING et al. 2004; MOSER 2023). Der Zusammenhang zwischen der Orografie und Gewittern, Hagel, Mesozyklonen und Starkniederschlägen kommt bei klimatologischen Studien in den Alpen klar zum Vorschein (PANZIERA und GERMANN 2010; PANZIERA et al. 2015, 2018; NISI et al. 2016, 2018; FELDMANN et al. 2021, 2023).

Besonders kritisch und interessant für die Radaranwendung sind konvektive Systeme, also Gewitter und die damit verbundenen Phänomene Hagel, Starkniederschlag, Blitze, Sturzfluten und Murgänge. Gewitter sind räumlich beschränkt und zeichnen sich durch starke räumliche Gradienten und eine schnelle zeitliche Veränderung aus. Derzeitige operationelle numerische Wettervorhersagemodelle erlauben einen oder mehrere Tage im Voraus Aussagen, ob in einer bestimmten Region an einem Tag mit starken Gewittern zu rechnen ist oder nicht. Solche Aussagen zur Wahrscheinlichkeit basieren auf der gleichzeitigen Berechnung von mehreren Läufen des Vorhersagemodells, sogenannten Ensembles. Das ist eine wertvolle Information, um sich frühzeitig auf mögliche Unwetter vorzubereiten. Dank der Assimilation der Radardaten (ROSSA et al. 2010)

liefern hochaufgelöste Vorhersagemodelle auch auf der Skala bis zu einigen Stunden wichtige Informationen über das Auftreten von Gewittern. Aber die präzise Vorhersage von Ort und Zeit eines Gewitters ist wegen der schnellen Entwicklung und der nicht-linearen Prozesse, Stichwort deterministisches Chaos, nicht oder nur sehr schwer möglich (NERINI 2019). Zuverlässige Warnungen für einen exakten Ort können derzeit nur sehr kurz vor dem Ereignis ausgelöst werden, wenn das Gewitter bereits vom Radar erfasst wurde und dessen Intensität, Entwicklung und Verlagerung aus den Messungen und Modellen abgeschätzt werden kann. Für beispielsweise die Sperrung einer Straße ist es entscheidend, ob das Gewitter das steile Gerinne mit losem Gesteinsmaterial oberhalb der Straße trifft, oder sich nur wenige Kilometer entfernt auf der anderen Seite des Bergkammes entlädt. Daher ist im Gebirge die möglichst exakte Lokalisierung von großer Bedeutung. Je nach Anforderung werden bei solchen Anwendungen die Echtzeit-Wetterradarwarnungen durch lokale Überwachungssysteme ergänzt, beispielsweise Pegelmessungen mit Mikrowellen oder Reißleinen. Das Wetterradar kann Gewitter flächendeckend und in Echtzeit zuverlässig bis auf Distanzen von 150 Kilometern erfassen und bildet, kombiniert mit Modellen, das primäre System für die landesweite Überwachung und Warnung vor Naturgefahren, welche aus Gewittern, Hagel- und Starkniederschlagszellen resultieren. Laut Auskunft der Fachleute für Naturgefahren in den Bergkantonen Graubünden und Wallis scheint bei der Auslösung von Murgängen durch Gewitter auch der Hagel eine Rolle zu spielen (M. Keiser und J.-Y. Délèze, persönliche Mitteilung), eine Beobachtung, die noch weiter analysiert werden muss. Die nächste Generation von hochaufgelösten Vorhersagesystemen wie SINFONY (siehe Beitrag 1 in diesem Heft) wird einen großen Fortschritt bringen, aber die Aussagen werden immer mit einer Angabe der Unsicherheit verbunden sein.

## 3 Abschattung und Standortwahl

Das Radarsignal ist eine elektromagnetische Welle. Für die Erfassung von Niederschlägen eignen sich Wellenlängen zwischen 3 und 10 Zentimetern, siehe auch Beitrag 2 in diesem Heft. Bei diesen Wellenlängen ist die Atmosphäre transparent. Auch die Niederschlagswolken sind beinahe transparent, wäre da nicht der kleine Teil der Energie des Radarstrahles, welcher vom Niederschlag Richtung Radar zurückgestreut, von der Antenne empfangen, und im Empfänger in ein digitales Signal umgewandelt wird, welches die Basis für die Radarmessung bildet. Genau genommen sind es die kleinen, mittleren und großen Regentropfen, die Schneeflocken, Graupel, Eiskristalle und Hagelkörner, welche das Radarsignal zurückstreuen; wir nennen diese zusammenfassend Hydrometeore. Der große Rest der Energie des Radarstrahles propagiert weiter. Das Radar kann also im Gegensatz zum menschlichen Auge durch alle Arten von Wolken hindurchsehen und erstellt gewissermaßen eine dreidimensionale Radiographie der Niederschlagswolken.

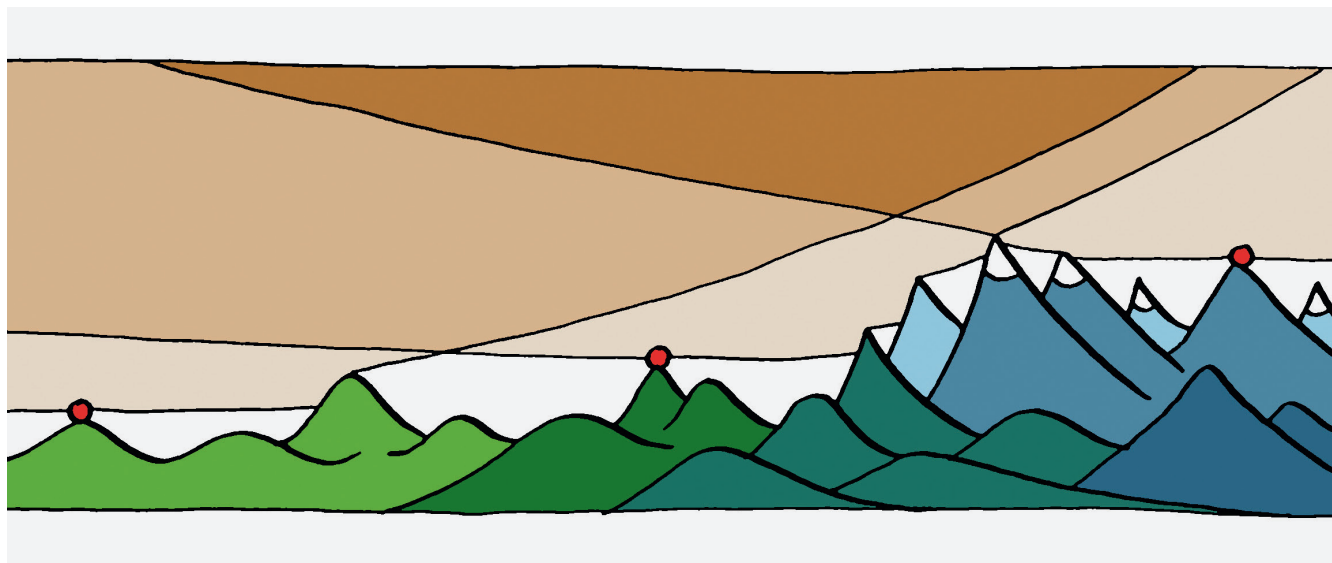


Abbildung 7-2: Die Standorte für Wetterradare zur Abdeckung einer Bergregion können vereinfacht in drei Gruppen unterteilt werden: Ein Hügel (roter Punkt links) für die Abdeckung im Vorland des Gebirges; ein Berg auf mittlerer Höhe (roter Punkt in der Mitte), möglichst etwas entfernt vom Hauptkamm des Gebirges; und ein Berg im Zentrum des Gebirges (roter Punkt rechts). Die Brauntöne unterteilen die Atmosphäre in Regionen, die von einem, zwei, bzw. allen drei Radaren abgetastet werden. Die Radarstrahlen sind in dieser Darstellung wegen der Erdkrümmung und der Refraktion leicht nach oben gekrümmt.

Das Radar kann aber nicht durch Berge hindurchschauen. Es wird durch die Berge gestoppt, ein Teil der auftreffenden Energie wird absorbiert und in Wärme umgewandelt, der Rest wird zurückgestreut. Das von den Bergen zum Radar zurückgestreute Signal verursacht starke Echos im Radarbild, sogenannte Bodenechos (*ground clutter*). Die Hydrometeore in der Atmosphäre hinter dem Berg bleiben dem Radar verborgen. Wir sprechen von Abschattung.

Die Abschattung ist eine der größten Herausforderungen im Gebirge und hängt stark vom Standort des Wetterradars ab. Die Wahl des Standortes eines neuen Radars entscheidet also maßgebend über die Qualität der Daten und die Region, welche mit dem Radar abgedeckt werden kann. Bergketten, die tiefer liegen als das Radar sind kein Problem, da aus noch zu besprechenden Gründen die Antenne kaum negative Elevationswinkel abtastet. Kritisch sind höhere Berge in der nahen Umgebung des Radars, da diese den Radarstrahl abschatten und die Hydrometeore dahinter verborgen bleiben.

Für die Bestimmung der am Boden auftreffenden Niederschlagsmenge und -art ist es wichtig, mit dem Radar die Hydrometeore so nah am Boden wie möglich zu erfassen. Aus dieser Betrachtung müsste man das Radar auf dem Talboden installieren, was aber dazu führen würde, dass das Radar wegen der Abschattung eine nur sehr kleine Region abdecken könnte. Den maximalen Umkreis erreicht man, wenn das Radar auf dem höchsten Punkt eines Gebirges installiert wird. Das wäre in den Alpen wegen Gletscher, Permafrost und hohen Kosten für Bau, Zugang und Stromversorgung keine realistische Option. Zudem ist es nicht von Vorteil, wenn das Radar zu hoch liegt, weil dann kaum mehr Messungen in der flüssigen Phase des Nieder-

schlags unterhalb der Nullgradgrenze möglich sind. Die Standortwahl ist eine Optimierung vieler Parameter. Das Radar soll möglichst frei von nahen Hindernissen sein, um eine große Region abdecken zu können. Daher kommen nur Standorte auf Hügelzügen oder Bergen in Frage. Gleichzeitig soll es möglichst tief liegen, um die bodennahen Schichten erfassen zu können. Es kommen weitere Faktoren wie Bau, Naturschutz, Zugang, Stromversorgung, Datenanbindung und elektromagnetische Verträglichkeit mit anderen Systemen in Sichtverbindung dazu.

Etwas vereinfacht gesagt können die Radarstandorte in einer Bergregion wie beispielsweise der Schweiz in drei Gruppen unterteilt werden (Abbildung 7-2). Für die Abdeckung der Ebenen im Vorland der Alpen eignen sich Hügelzüge wie der Albis bei Zürich auf 900 Metern oder Bric della Croce bei Torino (Italien) auf 700 Metern über Meer. In den Voralpen eignet sich ein Berg auf mittlerer Höhe, welcher den Alpen vorgelagert und möglichst weit entfernt von den höheren Bergketten liegt. Je tiefer der Standort liegt, desto größer ist die Anzahl Messungen unterhalb der Nullgradgrenze, ein entscheidender Faktor, da gerade die Voralpen geprägt sind von starken Stauniederschlägen und Gewittern. Zu dieser zweiten Gruppe gehören die Schweizer Radare auf Monte Lema (1625 m) und La Dôle (1675 m). In den inneren Regionen der Alpen kommen wegen der Abschattung durch die vielen Drei- und Viertausender nur noch Standorte über 2800 Metern über Meer wie der Weissfluhgipfel (2840 m), die Pointe de la Plaine Morte (2937 m) oder die Valluga (2811 m, Österreich) in Frage.

Diese Betrachtung gilt für volumenabtastende Radare mit großen Reichweiten über 200 Kilometern, also mit Wellenlängen von 5 oder 10 Zentimetern. Bei Radaren mit 3 Zen-

timeter Wellenlänge und Reichweiten von etwa 40 Kilometern dürfen die Distanzen zu den nächsten Hindernissen entsprechend kürzer sein.

Natürlich hängt die Standortwahl auch von der Anwendung ab. Muss mit einem Radar nur gerade eine Stadt, ein Talabschnitt oder das Gebiet eines Sportanlasses überwacht werden, fällt die Wahl möglicherweise auf einen tiefergelegenen Standort mit weniger Reichweite, dafür aber besseren Messungen für die spezifische Region.

#### 4 Abtastung der Atmosphäre

Die Antenne bündelt beim Aussenden die Energie des Radarsignales in einer Keule, der sogenannten Hauptkeule (Abbildung 7-3). Dieselbe Bündelung erfolgt sowohl beim Senden wie auch beim Empfangen, wenn die Antenne die zurückgestreuten Signale auffängt. Die Breite der Hauptkeule bestimmt die räumliche Auflösung der Radarmessung und soll daher möglichst eng sein. Ein übliches Maß für die Breite ist die sogenannte 3-Dezibel (dB)-Strahlbreite. Diese beträgt bei vielen Radaren etwa 1 Grad ( $^{\circ}$ ). Nebst der Hauptkeule hat jede Antenne auch Seitenkeulen. Ein kleiner Teil der Energie wird also nicht in der Hauptkeule, sondern entlang der Seitenkeulen in allen möglichen Richtungen ausgesendet. Die Darstellung der Haupt- und Seitenkeulen wird Antennendiagramm genannt (Abbildung 7-3). Die Güte des Antennendiagrammes hängt von der Geometrie

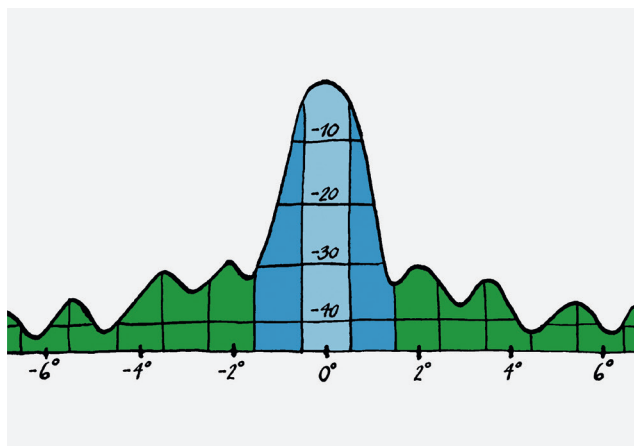


Abbildung 7-3: Beispiel eines Antennendiagramms eines operationellen Wetterradars. Auf der x-Achse ist die Abweichung vom Zentrum des Radarstrahles in Grad ( $^{\circ}$ ) aufgetragen; auf der y-Achse die Leistung in Bezug auf die Spitze im Zentrum des Strahles in Dezibel (dB). Die hell- und dunkelblauen Bereiche bilden zusammen die Hauptkeule, in hellblau ist die 3-dB-Strahlbreite gezeigt (hier  $1^{\circ}$ ). Die Seitenkeulen sind in grün dargestellt. Die erste Seitenkeule liegt bei etwa  $-30$  dB, hat also eine Intensität, die 1000-mal kleiner ist als die Spitze im Strahlzentrum. Da dieselbe Charakteristik auch beim Empfang gilt, werden die Echos in der Spitze der ersten Seitenkeule gegenüber der Hauptkeule um 60 dB unterdrückt (ein Faktor von 1 Million). Der grüne Bereich zieht sich über den hier dargestellten Bereich weiter bis  $\pm 180^{\circ}$ , aber die Werte fallen nach  $6^{\circ}$  schnell ab und pendeln zwischen  $-50$  und  $-60$  dB.

und Präzision der Antenne und von der Form, wie das Horn am Ende des Wellenleiters die Leistung der Radarwelle auf der Antenne verteilt, ab. Bei geeigneter Geometrie der Antenne und des Hornes sind die Seitenkeulen im Vergleich zur Hauptkeule sehr klein.

Mittels der Bewegung der Antenne in Azimut und Elevation kann die Atmosphäre schrittweise gemäß einem konfigurierbaren Programm abgetastet werden. In der Regel macht die Antenne volle  $360^{\circ}$ -Umdrehungen bei konstanten Elevationswinkeln. Die Wahl der Elevationswinkel, deren Anzahl und Reihenfolge, die Drehgeschwindigkeit der Antenne sowie eine Reihe weiterer Parameter bilden zusammen das sogenannte Abtast-Programm (Abbildung 7-4). Im Gebirge spielt die Wahl des Abtast-Programms wegen der vielen Bergketten, der starken Abschattung und der Bodenechos eine besonders zentrale Rolle. Je mehr Elevationswinkel abgetastet werden, desto höher ist die vertikale Auflösung der Radarinformation, aber desto länger dauert es auch, bis die Antenne das gesamte Abtast-Programm einmal durchlaufen hat. Die Dauer, welche für einen Durchlauf benötigt wird, bestimmt die Wiederholrate der Abtastung und damit die zeitliche Auflösung der Radarprodukte. Die Wahl der Abtastung ist also im Wesentlichen ein Kompromiss zwischen räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Bei Bergstandorten stellt sich die Frage, ob die Antenne auch negative Elevationswinkel fahren sollte. Es gibt verschiedene Gründe, weshalb das nur beschränkt Sinn macht. Die tiefste Elevation des Schweizer Abtast-Programms liegt aktuell bei  $-0,2^{\circ}$ , also zwei Zehntelgrad unter einer horizontalen Ausrichtung. Die Antennenmechanik würde Winkel bis  $-2^{\circ}$  zulassen, aber der Informationsgewinn einer Umdrehung bei  $-2^{\circ}$  wäre wegen der Abschattung durch nahe Hindernisse, der beschränkten Reichweite bis zur gegenüberliegenden Talseite und der vielen Bodenechos gering und stünde in keinem guten Verhältnis zum Zeitverlust.

Die Abtastung hängt nicht nur von den technischen Möglichkeiten und der Orografie, sondern entscheidend auch von der Anwendung und der Art des Niederschlags ab, der beobachtet werden soll. In der Entstehungsphase sind Gewitter von geringer Mächtigkeit, aber sie erreichen schnell eine große vertikale Ausdehnung. Für die Beobachtung von Gewittern sind Radarmessungen aus allen Schichten der Troposphäre wertvoll. Der Informationsgehalt der Radarmessung ist bis in die mittlere Troposphäre beinahe konstant (Kurve 1 in Abbildung 7-5). Gerade für die Charakterisierung von Gewittern, die Einschätzung der Gefahren (*severity ranking*) und das Erzeugen von Gewitterwarnungen sind Messungen aus den mittleren und oberen Troposphärenschichten entscheidend. Dasselbe gilt für die Identifikation von Hagelzellen und die Abschätzung der Hagelkorngrößen in Gewitterwolken. Das bedeutet, dass mit dem Radar Gewitter und Hagel auch dort zuverlässig erfasst werden können, wo die untersten ein oder zwei Kilometer der Atmosphäre abgeschattet sind. Gewitter- und Hagelzellen verändern sich im Bereich von Minuten.

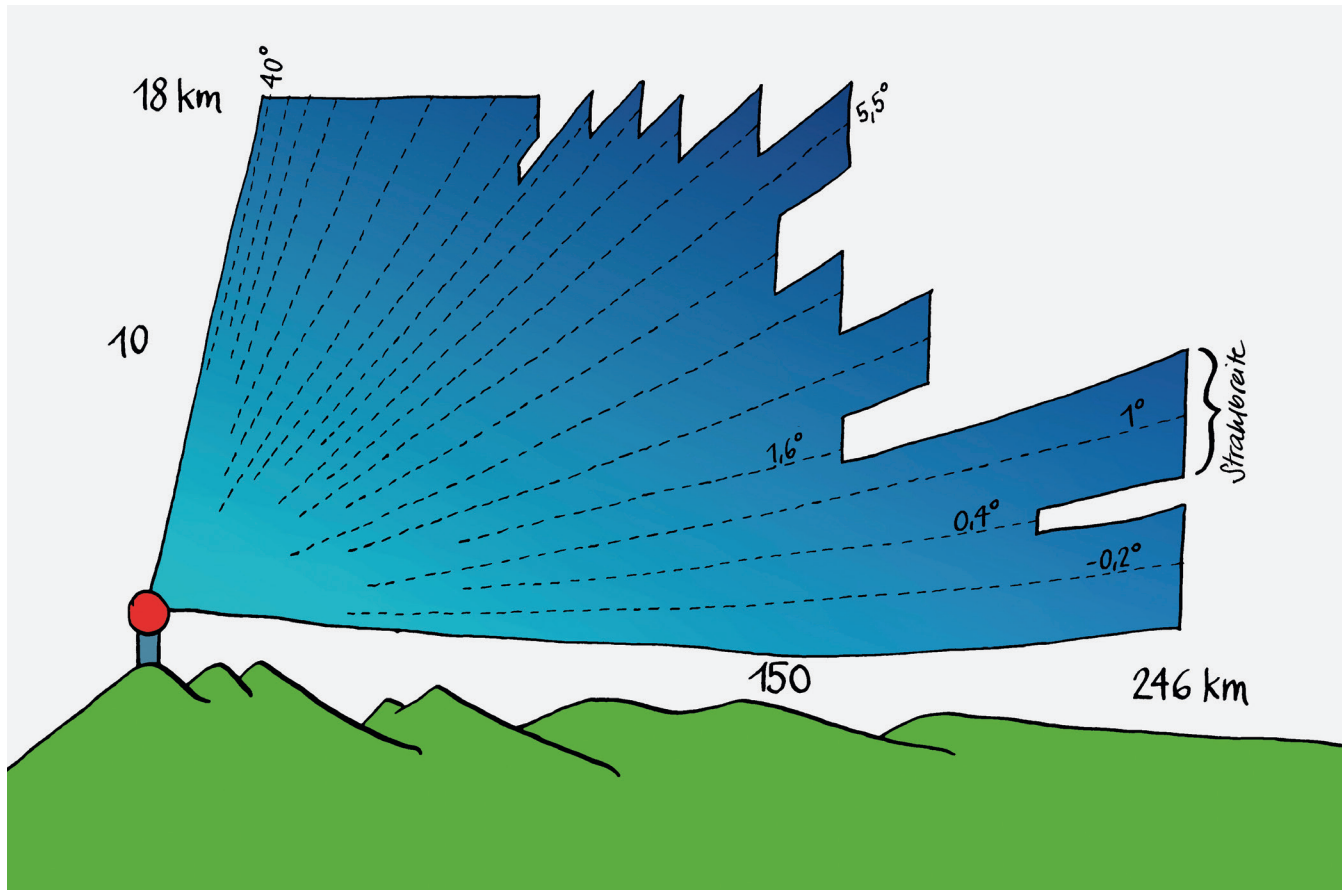


Abbildung 7-4: Abtast-Programm der Schweizer Wetterradare. Die Antenne hat eine 3-dB-Strahlbreite von 1° und macht volle 360°-Umdrehungen bei 20 verschiedenen Elevationswinkeln zwischen  $-0,2^\circ$  und  $40^\circ$ . Der ganze Durchlauf dauert 5 Minuten. Die maximale Distanz hängt von der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen ab. Bei tiefen Elevationen wird etwas länger gewartet, um bis 246 Kilometer Distanz messen zu können. Bei den höheren Elevationen wird bis etwa 150 Kilometer Distanz respektive 18 Kilometer Höhe gemessen, die Pulsrepetitionsfrequenz ist entsprechend höher als bei den tiefen Elevationen. Die Wahl des Abtast-Programms im Gebirge ist ein Kompromiss vieler Aspekte, siehe GERMANN et al. (2022).

Für deren Überwachung ist also nicht nur eine hohe horizontale und vertikale, sondern auch eine hohe zeitliche Auflösung ausschlaggebend (Abbildung 7-6). Dank einer verzahnten Reihenfolge der 20 Elevationen mit zwei Halbvolumen von je 10 Elevationen (*interleaved scan*) werden in der Schweiz die Radarprodukte mit einer zeitlichen Auflösung von 2,5 Minuten erzeugt.

Etwas anders verhält es sich mit der Bestimmung von Niederschlagsraten und -mengen am Boden. In diesem Kontext sind vor allem bodennahe Messungen von Nutzen. Der Informationsgehalt der Radarmessung für die Niederschlagsbestimmung nimmt rasch mit der Höhe ab. Dabei kann man unterscheiden zwischen konvektiven und stratiformen Niederschlägen. Bei stratiformen Niederschlägen gibt es einen abrupten Abfall des Informationsgehalts im Bereich der Nullgradgrenze (Kurve 3 in Abbildung 7-5). Bei konvektiven Niederschlägen (Gewittern) ist dieser Abfall präsent aber weniger abrupt (Kurve 2 in Abbildung 7-5). Die Wichtigkeit, den Niederschlag möglichst nah am Boden zu messen, wird zusätzlich verstärkt durch orografische Prozesse, also das orografisch bedingte Wachstum von Hydrometeoren in den unteren Schichten der Tropo-

sphäre. Kann der Niederschlag mit dem Radar wegen der Abschattung nur oberhalb von 4 oder 5 Kilometern Höhe über Meer beobachtet werden, dann wird die daraus abgeleitete Schätzung der Niederschlagsmengen am Boden mit großen Unsicherheiten behaftet sein. Solche Unsicherheiten können gut im Bereich eines Faktors 2 oder höher liegen (GERMANN et al. 2006). Um die Atmosphäre trotz Abschattung möglichst knapp über der Orografie abtasten zu können, wurde in der Schweiz bei den untersten Elevationswinkeln ein kleiner Abstand von nur  $0,6^\circ$  gewählt, also  $-0,2, 0,4, 1,0$  und  $1,6^\circ$  (Abbildungen 7-4 und 7-7). Benachbarte Elevationen überlappen sich also, sind aber wegen der verzahnten Abtastung zeitlich um 2,5 Minuten versetzt.

Nehmen wir an, die Abbildung 7-2 repräsentiere die Situation in einem Land und die drei Radare befänden sich auf 900, 1600 und 2800 Metern über Meer. Der Vertikalschnitt geht also von 0 bis 4300 Meter über Meer. Nehmen wir weiter an, dass die tiefste Elevation leicht negativ ist wie in Abbildung 7-4. Jetzt kann berechnet werden, welcher prozentuale Teil des Landes unterhalb der Erdoberfläche liegt (Relief), welcher Teil der Atmosphäre wegen der Abschattung den Radaren verborgen bleibt, und welcher Teil der

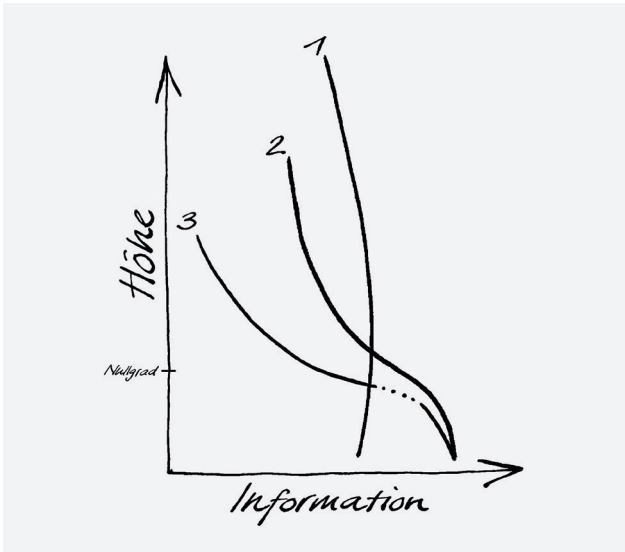


Abbildung 7-5: Informationsgehalt verschiedener Radarmessungen in Abhängigkeit von der Höhe. Für die Identifikation, die Charakterisierung und das Nowcasting von Gewittern und Hagel (Kurve 1) ist der Informationsgehalt der Radarmessung bis in mittlere Höhen der Troposphäre beinahe konstant und nimmt erst in der oberen Troposphäre ab. Für diese Anwendungen empfiehlt es sich daher, mit einer guten vertikalen Auflösung abzutasten. Hingegen sind für die Bestimmung des Niederschlags am Boden die Hydrometeore mit dem Radar möglichst nahe an der Erdoberfläche zu erfassen, dabei nimmt der Informationsgehalt rasch mit der Höhe ab. Das ist sehr ausgeprägt bei stratiformen Niederschlägen (Kurve 3), etwas weniger bei konvektiven (Kurve 2). Die Messungen aus dem Schmelzbereich stratiformer Niederschläge müssen besonders betrachtet werden und sind deshalb gestrichelt markiert (siehe Diskussion des *brightbands* in Abschnitt 8).

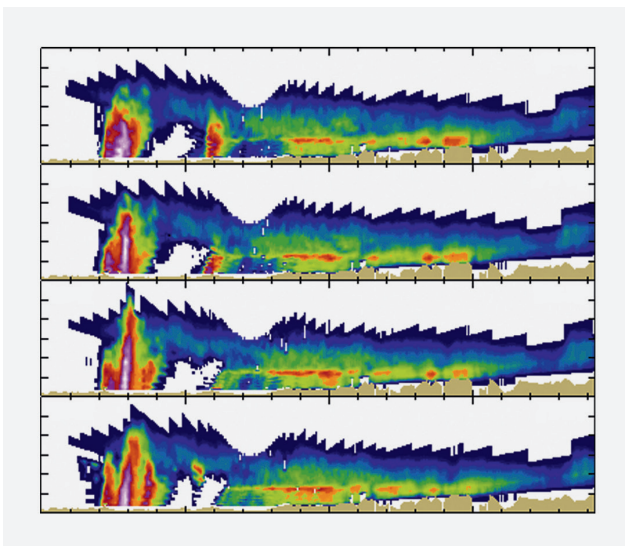


Abbildung 7-6: Vertikalschnitt der Reflektivität des Albis-Radars bei Zürich am 12. Juni 2014 um 19:20 UTC, 19:25 UTC, 19:30 UTC, 19:35 UTC (von oben nach unten). Der Schnitt hat eine vertikale Ausdehnung von 15 Kilometern, ist 192 Kilometer lang und zieht von der Nordwestschweiz (links) bis in die Südostschweiz (rechts). Die mächtigen, sich schnell verändernden Gewitterzellen am Jura-Südfuß (links) verdeutlichen den Wert der hohen zeitlichen und vertikalen Auflösung (aus GERMANN et al. 2016).

Atmosphäre von einem, zwei oder allen drei Radaren sichtbar ist. Ein mögliches Resultat ist in Abbildung 7-8 dargestellt. Wenn wir beispielsweise einen horizontalen Schnitt auf 1800 Meter legen, erhalten wir approximativ folgende Werte: 40 % der Fläche werden von zwei Radaren abgetastet, 20 % von einem Radar (hellbraun), 4 % von keinem Radar (weiß) und die verbleibenden 36 % der Fläche liegen unter dem Relief (blau).

## 5 Bodenechos

Das Radarsignal wird nicht nur von den Hydrometeoren zurückgestreut, sondern auch von Insekten, Vögeln, Flugzeugen, Häusern, Hügeln und Bergen und anderen möglichen Objekten. Die Rückstreuung am Boden ist im Gebirge besonders kritisch, da die Bodenechos erstens sehr stark sind, zweitens kontinuierlich auftreten, und drittens eine große Fläche betreffen. Dabei ist es nicht nur die Hauptkeule, die Bodenechos verursacht, sondern auch die Seitenkeulen. Da letztere in verschiedene Richtungen schauen, können sie auch dann zu Bodenechos führen, wenn die Hauptkeule auf einer Elevation mehrere Grad über dem Horizont abtastet. Ein Radar wird so gewählt und konfiguriert, dass Bodenechos so weit wie möglich vermieden werden. Dabei helfen eine kleine Strahlbreite, schwache Seitenkeulen und eine kurze Pulslänge. In der Schweiz wurde aus diesem Grunde eine besonders kurze Pulslänge von 0,5 Mikrosekunden gewählt, was einer radialen Auflösung von 75 Metern entspricht. Damit beschränkt sich das Bodenecho radial auf einen sehr kurzen Abschnitt. Bei einer Pulslänge von 2 Mikrosekunden wäre die von der Rückstreuung eines Berges in der Radarkeule gestörte Fläche viermal größer. Die Wellenlänge spielt für die Bodenechos auch eine Rolle, worauf wir später noch zu sprechen kommen.

Trotz geeigneter Antenne, Pulslänge und Wellenlänge wird in einer Bergregion wegen der Positionierung der Radare auf Bergen ein beachtlicher Teil des gesamten Messvolumens von Bodenechos gestört (Abbildung 7-9). Diese Störechos können durch raffinierte Datenprozessierung eliminiert werden (JOSS und LEE 1995). Die Unterdrückungsrate muss beinahe perfekt sein, da selbst eine kleine Anzahl von Falschechos, welche nicht unterdrückt würden, in den Anwendungen wie der automatischen Gewitterwarnung verheerende Folgen hätte. Bei der Unterdrückung der Bodenechos in den Schweizer Alpen hat sich die Einführung der doppelten Polarisation ab 2011 als besonders wertvoll erwiesen (GERMANN et al. 2022).

## 6 Wahl der Wellenlänge

Für die Beobachtung von Niederschlag und Gewittern kommen Wellenlängen von 3, 5 und 10 Zentimetern zum Einsatz. Die 3-Zentimeter-Wellen (X-Band, 10 GHz) werden von großen Tropfen, schmelzendem Schnee und Hagel stark abgeschwächt und eignen sich daher nur für kurze

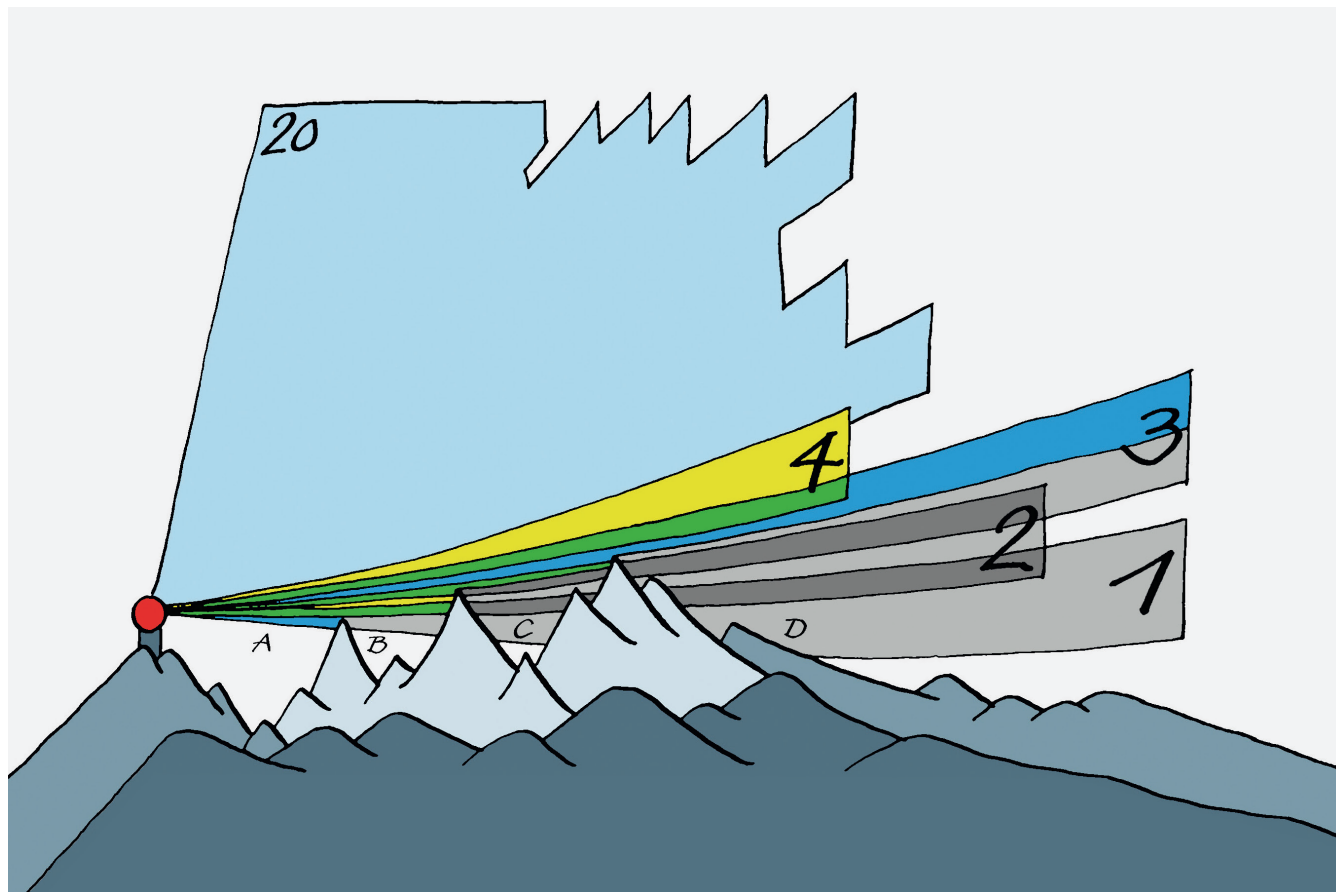


Abbildung 7-7: Für die Niederschlagsbestimmung sind die untersten Elevationen besonders wichtig. In blau dargestellt ist die 1-Grad-Strahlbreite der tiefsten und drittiefsten, in gelb der zweit- und viertiefsten Elevation des Schweizer Abtast-Programms (siehe auch Abbildung 7-4). In grün markiert sind die überlappenden Bereiche und in grau der von den Bergen abgeschattete Teil. In der Region „C“ beispielsweise ist die tiefste Elevation ganz, die zweitiefste stark, die drittiefste schwach und die viertiefste nicht abgeschattet. Die verbleibenden 16 Elevationen sind hellblau eingefärbt. Die beste Schätzung des Niederschlags am Boden erhält man durch eine Korrektur der Teilabschattung, des vertikalen Profils und einer gewichteten Kombination der Messungen auf allen Elevationen (GERMANN et al. 2006).

Reichweiten. Bei Wellenlängen von 10 Zentimetern (S-Band, 3 GHz) kann die Abschwächung mit Ausnahme von Hagel vernachlässigt werden, was der primäre Vorteil dieser Wellenlänge ist. Ein weiterer Vorteil von großen Wellenlängen ist das große Nyquist-Intervall für die Dopplermessungen der Windgeschwindigkeit.

Bei gleicher Strahlbreite nimmt der Durchmesser der Antenne linear mit der Wellenlänge zu. Die Fläche der Antenne ist bei einer Wellenlänge von 10 Zentimetern demnach viermal größer als bei 5 Zentimetern. Für den Einsatz in einer Bergregion hat sich die Schweiz aus mehreren Gründen für 5,5 Zentimeter entschieden (C-Band, 5 GHz). Bei einem 10-Zentimeter-Radar würde eine Antenne mit einem Durchmesser von 9 Metern und entsprechend ein Radom von 12 Metern benötigt, eine Dimension, welche für Bergstandorte aus baulichen und finanziellen Gründen kaum eine Option ist. Bei gegebener Antennengröße hat ein 5-Zentimeter-Radar gegenüber einem 10-Zentimeter-Radar eine zweifach bessere Strahlbreite und tiefere Seitenkeulen. Auch das Verhältnis der Intensität der Wettersignale gegenüber Bodenechos ist bei 3 und 5 Zentimeter besser als bei 10 Zentimetern. Kleine Strahlbreite, schwache Seitenkeu-

len und gutes Verhältnis zwischen Wetterechos gegenüber Bodenechos sind drei wichtige Faktoren, um den Einfluss von Bodenechos in den Bergen zu minimieren.

### 7 Kalibrierung, Überwachung und Wartung

Kontinuierliche Kalibrierung und Überwachung der Radarhardware sind unabdingbar für alle Radarnetze, deren Daten für kritische Anwendungen wie die Aviatik, Starkniederschlags- und Gewitterwarnungen verwendet werden. Das gilt im Gebirge gleich wie im Flachland. Die Schwierigkeit im Gebirge liegt darin, dass die Anreise zum Radarstandort lang, der Zugang je nach Witterung nicht immer gewährleistet, die Arbeit auf über 2800 Metern über Meer umständlich und die effektive Arbeitszeit am Radar kurz ist. Die Kalibrierung und Überwachung müssen automatisch erfolgen und aus der Ferne bedient werden können. Wartungseinsätze am Radarstandort müssen sorgfältig geplant werden, um sicherzustellen, dass alle notwendigen Ersatzteile, Werkzeuge und Messinstrumente zur Hand sind. Das bedingt, dass die Überwachung viel Information über den Zustand der Hardware liefern muss, um aus der

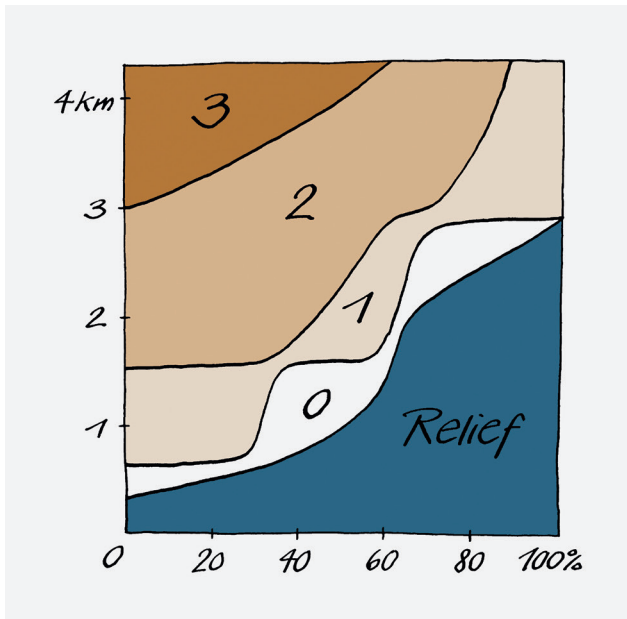


Abbildung 7-8: Radarsichtbarkeit in einer Bergregion in Prozent der gesamten Fläche (x-Achse) und in Funktion von der Höhe über Meer (y-Achse). Die hier dargestellte Radarsichtbarkeit entspricht in etwa der Region aus Abbildung 7-2. Für die drei Radarstandorte in Abbildung 7-2 wird eine Höhe von 900, 1600 und 2800 Meter über Meer angenommen. Die blaue Fläche entspricht dem Relief. Weiß eingezeichnet ist der Teil der Atmosphäre, der von keinem der drei Radare sichtbar ist. Der hellbraune Teil der Atmosphäre wird genau von einem Radar abgetastet. Die anderen beiden Brauntöne zeigen den prozentualen Teil, der von zwei respektive drei Radaren sichtbar ist. Im Idealfall würde der weiße Teil verschwinden.

Ferne gute Diagnosen erstellen zu können. Ebenso soll das Altern von Komponenten mit geeigneten Parametern möglichst frühzeitig erkannt werden. Bei der Kalibrierung empfiehlt es sich, nicht nur system-interne Verfahren wie das Einspeisen einer Rauschquelle zu benutzen, sondern auch externe unabhängige Quellen. Eine besonders interessante Lösung für die Überwachung der Antennenposition und die absolute Kalibrierung der Reflektivität in der horizontalen und vertikalen Polarisation ist die Sonnenstrahlung, deren Maximum zwar im sichtbaren Spektralbereich bei einer Wellenlänge von 0,5 Mikrometern liegt, die aber auch im Mikrowellenbereich der Radarwellenlängen genügend Leistung hat. Die Sonnenstrahlung ist nicht polarisiert und eignet sich somit auch für die Kalibrierung der differentiellen Reflektivität.

## 8 Meteorologische Algorithmen

Viele in der Radarmeteorologie diskutierte Themen und Lösungsansätze gelten unabhängig vom Standort des Radars. Die Problematik der Ableitung der Regenrate aus der Reflektivität unter Annahmen über die Größenverteilung der Regentropfen, die Abschwächung des Radarsignals im starken Regen, die Berechnung der Dopplergeschwindigkeit mittels *pulse-pair*-Algorithmus oder die Bestimmung der

Art der Hydrometeore aus den polarimetrischen Messungen gelten im Gebirge ebenso wie in einer flachen Region. Aber es gibt zwei wichtige Aspekte, welche die Radardaten in einer Bergregion massiv beeinträchtigen und bei der Erzeugung aller Produkte berücksichtigt werden müssen: Bodenechos und Abschattung, die zu einer komplexen vierdimensionalen Struktur der Messunsicherheiten führen.

Selbst bei einer nahezu perfekten Unterdrückung der Bodenechos wird es vereinzelt Falschsignale geben, die nicht unterdrückt werden. Da diese hohe Reflektivitätswerte haben können, muss mit zusätzlichen Qualitätskontrollen in den nachgelagerten Algorithmen sichergestellt werden, dass sie beispielsweise nicht fälschlicherweise als Hagel klassifiziert werden. Unter gewissen Umständen kann das Bodenecho subtrahiert werden ohne das Wetterecho im selben Pixel zu verlieren. In einer Bergregion, wo Bodenechos stark sind und große Flächen betreffen, hilft das nur beschränkt. In vielen Fällen hinterlässt das Bodenecho nach dessen Unterdrückung ein Pixel ohne Information (*missing value*), was bei allen nachfolgenden Schritten in der Datenprozessierung zwingend beachtet werden muss. Auch die Anwendungen polarimetrischer Messungen (*dual-polarisation*) werden beachtlich gestört durch Bodenechos (FRIEDRICH et al. 2009).

Das andere Problemkind der Radaranwendung im Gebirge ist die Abschattung des Radarstrahls durch Hügel und Berge. Genau genommen gibt es auch die Teilabschattung, das heißt, dass der untere Teil des Strahles durch eine Bergkette abgeschattet wird, während der Rest der elektromagnetischen Welle hinter dem Kamm weiterzieht. In teilabschatteten Regionen unterschätzt das Radar den wahren Wert der Reflektivität. Mit einem hochaufgelösten Geländemodell und unter Berücksichtigung des Antennendiagramms, des Abtast-Programms und der Propagation der Welle in der Atmosphäre kann die Abschattung und Teilabschattung mathematisch simuliert werden. Hindernisse in nächster Nähe wie Gebäude, Bäume oder Felsen, die im Geländemodell nicht abgebildet sind, müssen separat eingerechnet werden. Diese theoretischen Simulationen haben ein wesentliches Problem – die Refraktion, also die Beugung des Radarstrahls infolge von Dichtegradienten in der Atmosphäre. Diese Dichtegradienten variieren in der Zeit, insbesondere bei Inversionslagen, und können in einer Bergregion räumlich stark variieren. Da die Dichtegradienten und deren zeitliche und räumliche Variation nicht ausreichend bekannt sind, sind die Simulationen der Abschattung mit signifikanten Unsicherheiten behaftet. Oft werden die theoretisch simulierten Abschattungskarten, auch Sichtbarkeitskarten genannt, mit empirischen Verfahren ergänzt. Dazu werden Wetterechos über lange Zeitperioden akkumuliert. Liegt eine ausreichend genaue Karte der Teilabschattung vor, dann können die Reflektivitätswerte entsprechend korrigiert werden.

Auf jeden Fall muss die drei- (oder vier-)dimensionale Karte der Abschattung und Teilabschattung bei allen nachfolgenden Schritten in der Datenprozessierung beachtet

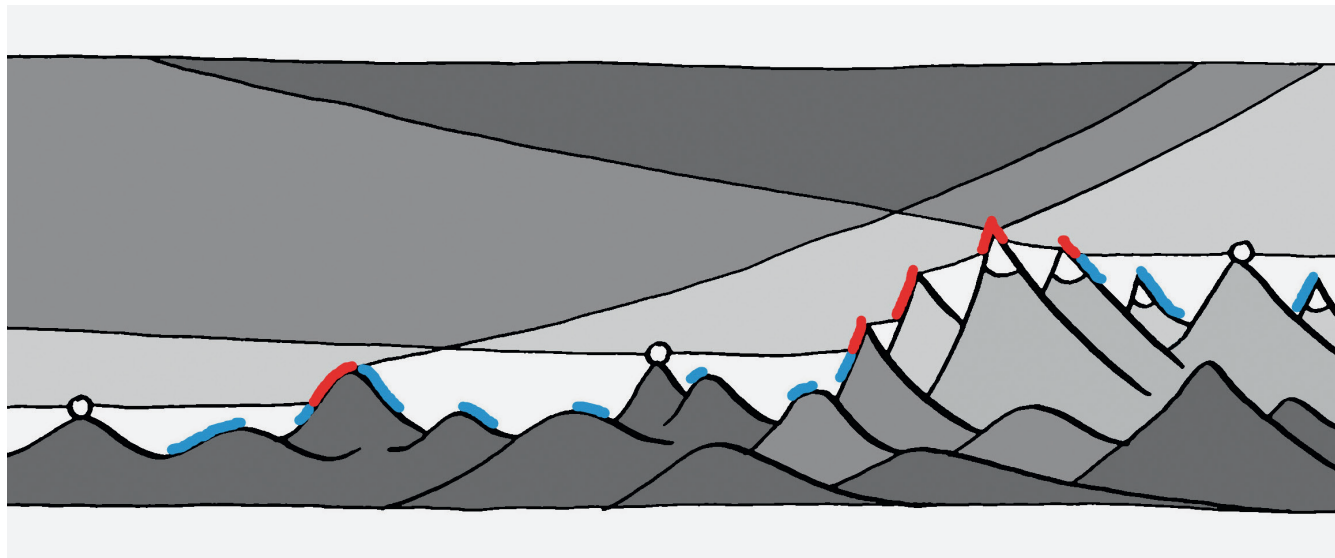


Abbildung 7-9: Entstehung von Störechos bei Radarmessungen im Gebirge. In den roten Zonen trifft die Hauptkeule direkt auf das Gelände, was mit Bestimmtheit starke, beinahe konstante Bodenechos erzeugt. In den blau markierten Zonen können Seitenkeulen auf den Boden treffen und, wenn die Rückstreuung genügend stark ist, ebenfalls zu Bodenechos führen. In den Radardaten werden diese Seitenkeulen-Bodenechos der Höhe der Hauptkeule zugeordnet. Dargestellt ist der gleiche Vertikalschnitt wie in Abbildung 7-2.

werden. Dasselbe gilt für die Karte der Bodenechounderdrückung. Das betrifft die Bestimmung der Niederschlagsraten und -mengen am Boden, die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und Korngröße von Hagel am Boden, die Berechnung des vertikalen Windprofils am Radarstandort, das Verfolgen und die Charakterisierung von Gewittern, die Identifikation von Mesozyklonen, die Erzeugung von Gewitter-, Hagel- und Starkniederschlags-Warnungen und beinahe alle anderen Produkte.

Die Bestimmung des Niederschlags am Boden wird zusätzlich erschwert durch die Tatsache, dass in den Bergen der unterste Teil der Troposphäre dem Radar verborgen bleibt und der Niederschlag aus den Messungen aus der Höhe abgeleitet werden muss. Dazu werden die Messungen aus der Höhe gewissermaßen auf den Boden extrapoliert, man spricht von der Korrektur des vertikalen Reflektivitätsprofils. Die Reflektivität nimmt in stratiformen Niederschlägen oberhalb der Nullgradgrenze rasch ab. Auf der Höhe, wo Schnee und Eis schmilzt, also knapp unter der Nullgradgrenze, zeigt das Reflektivitätsprofil eine Anomalie, das sogenannte helle Band (*brightband*). Die schmelzenden Schneeflocken haben beim Fallen für eine kurze Zeit noch den großen Durchmesser und die langsame Fallbewegung der Flocken, aber bereits die hohe Dielektrizität des Flüssigwassers. Aus dieser Kombination resultiert eine um mehrere Dezibel höhere Reflektivität, welche im Vertikalschnitt die Form eines horizontalen Bandes annimmt (siehe auch Abbildung 7-6), daher der Begriff *brightband*. Da das vertikale Reflektivitätsprofil nicht exakt bekannt ist, führt dessen Korrektur unweigerlich zu Unsicherheiten in der Bestimmung des Niederschlags am Boden. In der Schweiz wird die Teilabschattung und das Reflektivitätsprofil seit den Neunzigerjahren operationell korrigiert (JOSS und LEE 1995). In 2001 wurden die Algorithmen

nochmals verbessert (GERMANN et al. 2006). Im Jahr 2009 wurde ein Algorithmus entwickelt für die Berechnung der Unsicherheiten der Radarniederschlagsraten in den Bergen mittels eines Ensemble-Ansatzes und der Verwendung einer Fehlerkovarianzmatrix und stochastischen Methoden (GERMANN et al. 2009; MANDAPAKA und GERMANN 2010). Das Ensemble wurde über viele Jahre in Echtzeit in ein hydrologisches Abflussmodell eingespeist, um die Propagation der Unsicherheiten in einem hydro-meteorologischen Vorhersagesystem zu untersuchen (LIECHTI et al. 2013). Die Problematik der Abschattung konnte mit dem Bau von zwei zusätzlichen Radaren im Zentrum der Alpen im Projekt *Rad4Alp* markant verringert werden (GERMANN et al. 2022).

## 9 Aktuelle Forschungsfragen

Die Weiterentwicklung der Algorithmen entlang der gesamten Linie von der Hardware-Kalibrierung und der Signalprozessierung über die meteorologische Interpretation zur automatischen Starkniederschlags- und Gewitterwarnung und den nachgelagerten Anwendungen in der numerischen Wettervorhersage, der Hydrologie, der Aviatik und den anderen Sektoren wird die Forschenden an den Universitäten und den Wetterdiensten noch eine Weile beschäftigen, auch in Bezug auf die besonderen Herausforderungen im Gebirge. Es gibt aber einige Forschungsschwerpunkte, die an Bedeutung gewonnen und großes Potenzial haben:

- Lange war die Beobachtung von Hagel nur mit dem aufwändigen Einsatz von *Hailpads* möglich. Seit 2015 werden in der Schweiz neue Methoden eingesetzt: Hagelmeldungen aus der Bevölkerung über die App (*crowd-sourcing*; BARRAS et al. 2019), ein Netz von

automatischen Hagelsensoren (KOPP et al. 2023) und eine mit einer hochauflösenden Kamera ausgerüstete Drohne. Die daraus gewonnenen Hagelraten bieten neue Möglichkeiten für die Verifikation, Eichung und Weiterentwicklung der Radar-Algorithmen für die Hagelbestimmung im Alpenraum.

- Dank der markanten Verbesserung der Qualität der Radardaten um die Jahrtausendwende und der seither stetigen Zunahme der Zeitreihen kommen Radardaten in den Schweizer Alpen vermehrt auch für klimatologische Studien zum Einsatz (FELDMANN et al. 2021, 2023; NISI et al. 2016, 2018; PANZIERA und GERMANN 2010; PANZIERA et al. 2015, 2018).
- Großes Potenzial hat auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz. Auch in diesem Kontext sind die Datenqualität und die langen Zeitreihen ausschlaggebend. Dieser Ansatz hat bereits vielversprechende Resultate hervorgebracht. Der von WOLFENSBERGER et al. (2021) entwickelte Algorithmus für die Niederschlagsbestimmung im Alpenraum verzichtet auf physikalische Verfahren wie die Korrektur des vertikalen Reflektivitätsprofils und basiert anstelle dessen auf künstlicher Intelligenz. Im Nowcasting kann maschinelles Lernen eingesetzt werden, um spezifische Zielgrößen wie die Wahrscheinlichkeit von Blitz, Starkregen und Hagel über der Topografie (LEINONEN et al. 2022, 2023) oder die orografische Verstärkung des Niederschlags (FORESTI et al. 2019) direkt aus einem Satz von Eingangsvariablen abzuleiten. Wenn bei den Eingangsvariablen gleichzeitig Messungen und Modellvorhersagen zum Einsatz kommen, wird der durch maschinelles Lernen trainierte Algorithmus implizit eine nahtlose Verschmelzung (*seamless blending*) von Messungen, deren Extrapolation und Modellvorhersagen liefern. Bisher wurde die Verschmelzung explizit mit statistischen Methoden erzielt (SIDERIS et al. 2020).
- Anwendungen werden zunehmend voll automatisiert. Warnungen vor starken Gewittern werden vollautomatisch erzeugt und an die Behörden und die Bevölkerung übermittelt, Warnungen vor Starkniederschlag lösen die automatische Sperrung einer Straße aus und die Flughäfen werden mit automatisch erzeugten METAR-Meldungen beliefert. Diese Art von Anwendung bedingt, dass im Hintergrund die Stabilität und Kalibrierung der Radartechnik nochmals markant verbessert werden muss.
- Fortschritte finden auch im Bereich der Radartechnik statt. Es laufen Anstrengungen, phasengesteuerte Gruppenantennen (*phased-array antenna*) für Wetterradare einzusetzen. Durch die Steuerung der Phasen der einzelnen Antennenelemente kann die Richtung und Form des Radarstrahls verändert werden, ohne die Antenne mechanisch zu bewegen. Das öffnet neue Möglichkeiten für eine dynamische Abtastung der Atmosphäre und allgemein höhere Abtastraten. Bevor die Technik

für Wetterradare in einer Bergregion operationell zum Einsatz kommt, müssen noch verschiedene Hürden überwunden werden, auch betreffend Kosten und Datenqualität. Bedeutend näher an der operationellen Anwendung ist die Entwicklung von Radarsendern mit Halbleitertechnologie (*solid-state transmitter*) als Ersatz der Magnetron-Vakuumpipen. Diese Technologie wird schon operationell eingesetzt, aber ob sie sich langfristig bewährt gegenüber den erprobten Magnetron-Systemen mit hohen Reichweiten und kurzen Pulsen, muss sich erst noch erweisen.

## Literatur

- BARRAS, H., HERING, A., MARTYNOV, A., NOTI, P.-A., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2019: Experiences with >50'000 Crowdsourced Hail Reports in Switzerland. *Bulletin of the American Meteorological Society* **100**, 1429–1440, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0090.1>.
- FELDMANN, M., GERMANN, U., GABELLA, M., BERNE, A., 2021: A characterisation of Alpine mesocyclone occurrence. *Weather and Climate Dynamics* **2**, 1225–1244, <https://doi.org/10.5194/wcd-2-1225-2021>.
- FELDMANN, M., HERING, A., GABELLA, M., BERNE, A., 2023: Hailstorms and rainstorms versus supercells – a regional analysis of convective storm types in the Alpine region. *npj Climate and Atmospheric Science* **6**, <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00352-z>.
- FORESTI, L., SIDERIS, I.V., NERINI, D., BEUSCH, L.E.A., GERMANN, U.R.S., 2019: Using a 10-year radar archive for nowcasting precipitation growth and decay: A probabilistic machine learning approach. *Weather and Forecasting* **34**, 1547–1569, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0206.1>.
- FRIEDRICH, K., GERMANN, U., TABARY, P., 2009: Influence of ground clutter contamination on polarimetric radar parameters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **26**, 251–269, <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1092.1>.
- GERMANN, U., BERENQUER, M., SEMPETORRES, D., ZAPPA, M., 2009: REAL – Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **135**, 445–456, <https://doi.org/10.1002/qj.375>.
- GERMANN, U., BOSCACCI, M., CLEMENTI, L., GABELLA, M., HERING, A., SARTORI, M., SIDERIS, I.V., CALPINI, B., 2022: Weather Radar in Complex Orography. *Remote Sensing* **14**, <https://doi.org/10.3390/rs14030503>.
- GERMANN, U., BOSCACCI, M., GABELLA, M., SCHNEEBELI, M., 2016: Weather radar in Switzerland. In: From weather observations to atmospheric and climate sciences in Switzerland, WILLEMSE, S., FURGER, M. (Hrsg.), *vdf*, Zurich, Switzerland, ISBN: 978-3-7281-3745-6, 165–188

- GERMANN, U., GALLI, G., BOSCACCI, M., BOLLIGER, M., 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **132**, 1669–1692, <https://doi.org/10.1256/qj.05.190>.
- HERING, A., MOREL, C., GALLI, G., SENESI, S., AMBROSETTI, P., BOSCACCI, M., 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, 206–211.
- JOSS, J., LEE, R., 1995: The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections. *Journal of Applied Meteorology* **34**, 2612–2630, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2612:TAORCT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2612:TAORCT>2.0.CO;2).
- KOPP, J., SCHRÖER, K., SCHWIERZ, C., HERING, A., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2023: The summer 2021 Switzerland hailstorms: weather situation, major impacts and unique observational data. *Weather* **78**, 184–191, <https://doi.org/10.1002/wea.4306>.
- LEINONEN, J., HAMANN, U., GERMANN, U., 2022: Seamless Lightning Nowcasting with Recurrent-Convolutional Deep Learning. *Artif. Intell. Earth Syst.* **1**, e220043, <https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0043.1>.
- LEINONEN, J., HAMANN, U., SIDERIS, I.V., GERMANN, U., 2023: Thunderstorm Nowcasting With Deep Learning: A Multi-Hazard Data Fusion Model. *Geophysical Research Letters* **50**, <https://doi.org/10.1029/2022GL101626>.
- LIECHTI, K., ZAPPA, M., FUNDEL, F., GERMANN, U., 2013: Probabilistic evaluation of ensemble discharge nowcasts in two nested Alpine basins prone to flash floods. *Hydrological Processes* **27**, 5–17, <https://doi.org/10.1002/hyp.9458>.
- MANDAPAKA, P.V., GERMANN, U., 2010: Radar-Rainfall Error Models and Ensemble Generators. In: Rainfall: state of the science, TESTIK, F., GEBREMICHAEL, M. (Hrsg.), ISBN: 978-0-875-90481-8, 247-264.
- MOSER, L.N.R., 2023: Radar-based warnings of heavy rainfall, flash floods and debris flows in small alpine and urban catchments. *M.Sc. thesis*, ETH, 96p.
- NERINI, D., 2019: Ensemble precipitation nowcasting: limits to prediction, localization and seamless blending. *Ph.D. thesis*, ETH.
- NISI, L., HERING, A., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2018: A 15-year hail streak climatology for the Alpine region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **144**, 1429–1449, <https://doi.org/10.1002/qj.3286>.
- NISI, L., MARTIUS, O., HERING, A., KUNZ, M., GERMANN, U., 2016: Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: A long-term, high resolution, radar-based analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **142**, 1590–1604, <https://doi.org/10.1002/qj.2771>.
- PANZIERA, L., GABELLA, M., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2018: A 12-year radar-based climatology of daily and sub-daily extreme precipitation over the Swiss Alps. *International Journal of Climatology* **38**, 3749–3769, <https://doi.org/10.1002/joc.5528>.
- PANZIERA, L., GERMANN, U., 2010: The relation between airflow and Orographic precipitation on the southern side of the Alps as revealed by weather radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136**, 222–238, <https://doi.org/10.1002/qj.544>.
- PANZIERA, L., JAMES, C.N., GERMANN, U., 2015: Mesoscale organization and structure of orographic precipitation producing flash floods in the lago maggiore region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **141**, 224–248, <https://doi.org/10.1002/qj.2351>.
- ROSSA, A., HAASE, G., KEIL, C., ALBERONI, P., BALLARD, S., BECH, J., GERMANN, U., PFEIFER, M., SALONEN, K., 2010: Propagation of uncertainty from observing systems into NWP: COST-731 Working Group I. *Atmospheric Science Letters* **11**, 145–152, <https://doi.org/10.1002/asl.274>.
- SIDERIS, I.V., FORESTI, L., NERINI, D., GERMANN, U., 2020: NowPrecip: localized precipitation nowcasting in the complex terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**, 1768–1800, <https://doi.org/10.1002/qj.3766>.
- WOLFENSBERGER, D., GABELLA, M., BOSCACCI, M., GERMANN, U., BERNE, A., 2021: RainForest: a random forest algorithm for quantitative precipitation estimation over Switzerland. *Atmospheric Measurement Techniques* **14**, 3169–3193, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3169-2021>.

## Kontakt

DR. URS GERMANN  
Ufficio federale di meteorologia e climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai Monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz  
[urs.germann@meteoswiss.ch](mailto:urs.germann@meteoswiss.ch)

DR. MAURIZIO SARTORI  
Ufficio federale di meteorologia e climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai Monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz  
[maurizio.sartori@meteoswiss.ch](mailto:maurizio.sartori@meteoswiss.ch)

DR. ALESSANDRO HERING  
Ufficio federale di meteorologia e climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai Monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz  
[alessandro.hering@meteoswiss.ch](mailto:alessandro.hering@meteoswiss.ch)

**MARCO BOSCACCI**

Ufficio federale di meteorologia e climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai Monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz  
marco.boscacci@meteoswiss.ch

**LORENZO CLEMENTI**

Ufficio federale di meteorologia e climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai Monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz  
lorenzo.clementi@meteoswiss.ch

**PROF. DR. BERTRAND CALPINI**

Ufficio federale di meteorologia e climatologia  
MeteoSvizzera  
Via ai Monti 146  
6655 Locarno-Monti  
Schweiz

# 8

K. STEPHAN

## Assimilation von Radarbeobachtungen in die NWV-Modelle des DWD

### Assimilation of Radar Observations into DWD's NWP Models

#### Zusammenfassung

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein hierarchisches Wettervorhersagesystem, das von einem globalen Modell (ICON) über ein regionales (ICON6-Nest) bis hin zu einer hochaufgelösten Variante (ICON-D2) reicht. Die Anfangsbedingungen der jeweiligen Modellrechnung werden durch die Datenassimilation bereitgestellt. Im Falle der hochaufgelösten Vorhersagen des ICON-D2 werden auch Radarbeobachtungen assimiliert. Dies geschieht in zwei unabhängigen, sich gegenseitig begünstigenden Verfahren. Durch die Assimilation dieser Beobachtungsdaten wird eine Verbesserung der Niederschlagsvorhersage erzielt.

#### Summary

At DWD a hierarchical model prediction system for different spatial scales is applied operationally (global model ICON, regional model for Europe ICON6-Nest and high resolution model ICON-D2). Assimilation of different source of observations provides the essential initial state of any forecast run. In the case of the high-resolution predictions of the ICON-D2, radar observations are also assimilated. Such data are currently assimilated in two independent approaches, which leads to an improvement in the precipitation forecast.

## 1 Einleitung

Die Vorhersage von Niederschlägen und insbesondere von konvektiven Starkregenereignissen ist nach wie vor eine der größten Herausforderungen der numerischen Wettervorhersage. Hierfür werden die Modelle immer feiner aufgelöst und die maßgeblichen Prozesse immer detaillierter beschrieben. Zur Initialisierung solcher konvektionserlaubenden Modelle sind allerdings geeignete Beobachtungsdaten notwendig, die dann mit den Verfahren der Datenassimilation in die Modelle integriert werden. Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung der Radarbeobachtungen stellen sie eine herausragende Datengrundlage zur Assimilation in die numerischen Wettervorhersagemodelle dar. Beim Deutschen Wetterdienst (DWD) werden derzeit zwei sich ergänzende Assimilationsmethoden in der operationellen Modellkette des ICON-D2 angewandt:

- (1) Assimilation von abgeleiteten Bodenniederschlägen (2D-Kompositdaten) mithilfe des Verfahrens *Latent Heat Nudging* (STEPHAN et al. 2008)
- (2) Assimilation von 3D-Volumendaten von Reflektivität und Radialwind der 17 Standorte des Radarverbundes des DWD im Rahmen einer Ensemble-Datenassimilation (BICK et al. 2016; SCHRAFF et al. 2016; WALLER et al. 2019)

Im Folgenden werden beide Methoden detaillierter beschrieben.

### 1.1 Assimilation von 2D-Kompositdaten mithilfe Latent Heat Nudging

Im Rahmen des sogenannten *Latent Heat Nudging* (LHN) wird versucht, das numerische Vorhersagemodell in die Lage zu versetzen, aus eigenem Antrieb Niederschläge zu simulieren, die den beobachteten Niederschlägen sehr nahekommen. Hierzu werden die aus den erfassten Radarmomenten abgeleiteten, bodennahen Niederschlagsraten mit den simulierten Niederschlägen verglichen. Basierend auf der Annahme, dass die Niederschlagsrate am Boden im Zusammenhang mit Prozessen wie Kondensation und Verdunstung, Gefrieren und Schmelzen steht, ist es möglich, relevante Informationen zur Anpassung des thermodynamischen Zustandes des Vorhersagemodells abzuleiten. Die genannten Prozesse gehen einher mit der Änderung der latenten Wärmeenergie. Diese Änderung kann innerhalb des Modells an jedem Modellgitterpunkt quantifiziert werden. Ein entsprechender beobachteter Wert ist zwar nicht vorhanden, kann allerdings folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$LH_{obs} = LH_{mod} + \Delta LH = \frac{LH_{mod} \cdot RR_{obs}}{RR_{mod}} \quad (1)$$

In Gleichung (1) bezeichnet  $LH_{obs}$  die abzuschätzende Rate der latenten Wärme, die bei der Bildung des beobachteten Niederschlages  $RR_{obs}$  umgesetzt wurde,  $LH_{mod}$  ist die Summe der Umsätze an latenter Wärme der entsprechenden Prozesse im Modell und  $RR_{mod}$  kennzeichnet den simulierten Niederschlag des Modells.

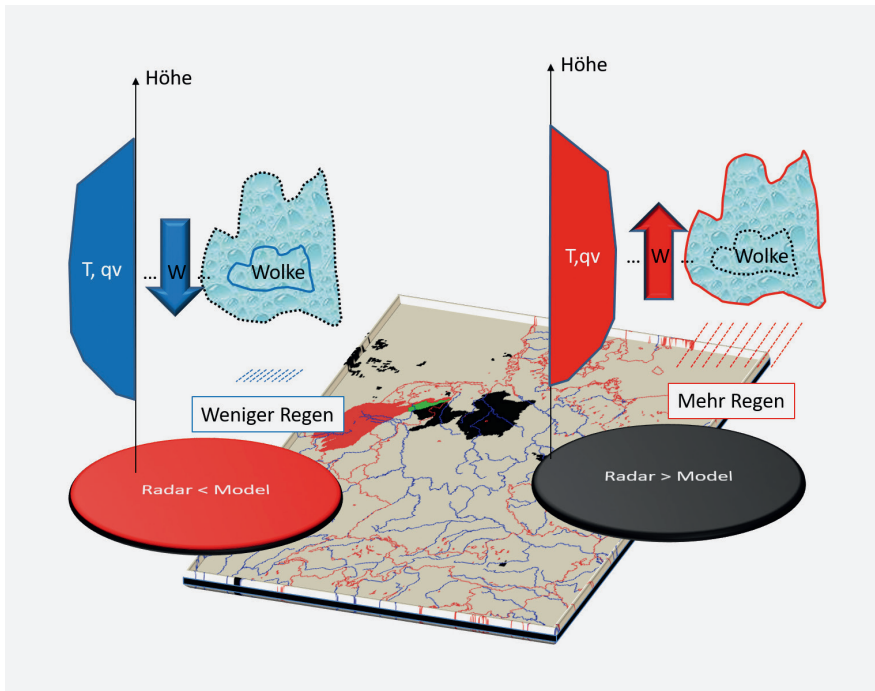


Abbildung 8-1: Schematische Funktionsweise des *Latent Heat Nudging*. Die Farben auf der zugrundeliegenden Karte stellen *Hits* (Treffer, grün), *Misses* (verpasste Ereignisse, schwarz) und *Falses* (Fehlprognosen, rot) des Modellniederschlags gegenüber einer Radarbeobachtung bezüglich eines bestimmten Schwellenwertes dar. Zu beachten ist, dass auch in den grünen Bereichen eine weitere Angleichung der Niederschläge vorgenommen wird, falls ein quantitativer Unterschied besteht.  $T$ : Temperatur,  $q_v$ : spezifische Feuchte,  $W$ : Vertikalgeschwindigkeit. Links wurde zu viel Niederschlag vom Modell simuliert (Temperaturinkrement negativ), rechts zu wenig (Temperaturinkrement positiv).

Aus dem Vergleich der abgeschätzten Wärmeenergie und der simulierten Wärmeenergie des Modells lässt sich ein Temperaturinkrement  $\Delta LH$  ableiten. Da die simulierte Wärmeenergie als Funktion der Höhe vorliegt, kann somit auch ein höhenabhängiges Inkrement abgeleitet werden. Ein solches Profil liegt an jedem Modellgitterpunkt vor. Diese Inkremente sind positiv, wenn zu wenig Niederschlag am Gitterpunkt simuliert wird und umgekehrt.

Dynamisch wirkt ein positives Temperaturinkrement als Quellterm konvektiver Energie, die mit einer Vergrößerung der Vertikalgeschwindigkeit und somit mit einem Aufsteigen der Luft im Modell verbunden ist. Aufsteigende Luft führt zu Kondensationsprozessen und letztendlich zur Niederschlagsbildung. Das Verfahren wirkt besonders effizient, wenn passend zum Temperaturinkrement auch ein Inkrement in der spezifischen Feuchte bestimmt und aufgeprägt wird. Ziel muss dabei sein, die ursprüngliche relative Feuchte durch das Temperaturinkrement unverändert zu lassen. In neueren internen und derzeit noch nicht veröffentlichten Studien konnte gezeigt werden, dass zumindest im Rahmen des numerischen Wettervorhersagemodells ICON-D2 die Veränderung der spezifischen Feuchte alleine ausreicht, um die gewünschten Effekte zu erreichen. Abbildung 8-1 zeigt schematisch die Funktionsweise des *Latent Heat Nudging*.

Ein entscheidender Nachteil des Verfahrens ist die fehlende Möglichkeit, die Wirkung des Prozesses zu beschränken. Zwar kann die Größe der Inkremente beschränkt werden, aber einmal in Gang gebracht, besteht kaum eine Möglichkeit zur Einflussnahme auf den Prozess. Des Weiteren werden die bestehenden räumlichen und zeitlichen Korrelationen zur anderen Modellvariablen nicht in Betracht gezogen.

Ungeachtet dessen ist das Verfahren in der Lage, die Qualität der Niederschlagsvorhersage deutlich zu verbessern (siehe Abbildung 8-4). Damit verbunden ist auch eine leichte Verbesserung in der Vorhersage der bodennahen Modellgrößen festzustellen. Demgegenüber stehen leichte Defizite in der Vorhersage der Feuchteprofile, insbesondere im Vergleich gegen die Messungen der Radiosondenaufstiege. Alles in allem überwiegen die positiven Effekte des Verfahrens und bilden die Grundlage für die langjährige Anwendung des Verfahrens (seit Einführung des Kurzzeitmodells LMK, später COSMO-DE und nun COSMO-D2 genannt) in der operationellen Wettervorhersage des Deutschen Wetterdienstes.

## 1.2 Assimilation von 3D-Volumendaten mithilfe Ensemble-Datenassimilation

Neben der oben beschriebenen Methode kommen auch die volumetrisch gemessenen Reflektivitäten und Radialwinde aus dem Radarverbund des DWD zur Anwendung, um die Analyse des atmosphärischen Zustandes abzuleiten. Mittels eines LETKF (*Localized Ensemble Transform Kalman Filter*) werden hierbei Differenzen zwischen Beobachtung und Modell in einer gewissen Umgebung um die Beobachtungsorte statistisch auf Korrekturen (Inkremente) der Modell-Zustandsvariablen (Temperatur, Wind, Feuchte, Hydrometeorvariablen) aller Member (derzeit 40 Stück) und des deterministischen Laufs der jüngsten Vorhersage (*first guess*) transformiert. Des Weiteren wird die, für das Verfahren notwendige, Kovarianzmatrix ( $K$ ) aus dem Vorhersage-Ensemble abgeschätzt. Diese Matrix beschreibt die vorliegenden räumlichen Korrelationen bezüglich einer Modellvariable aber auch zwischen den verschiedenen Modellvariablen. Es entstehen so, in einem stündlichen Zyklus aus abwechselnd kurzer Vorhersage und Korrekturschritt,

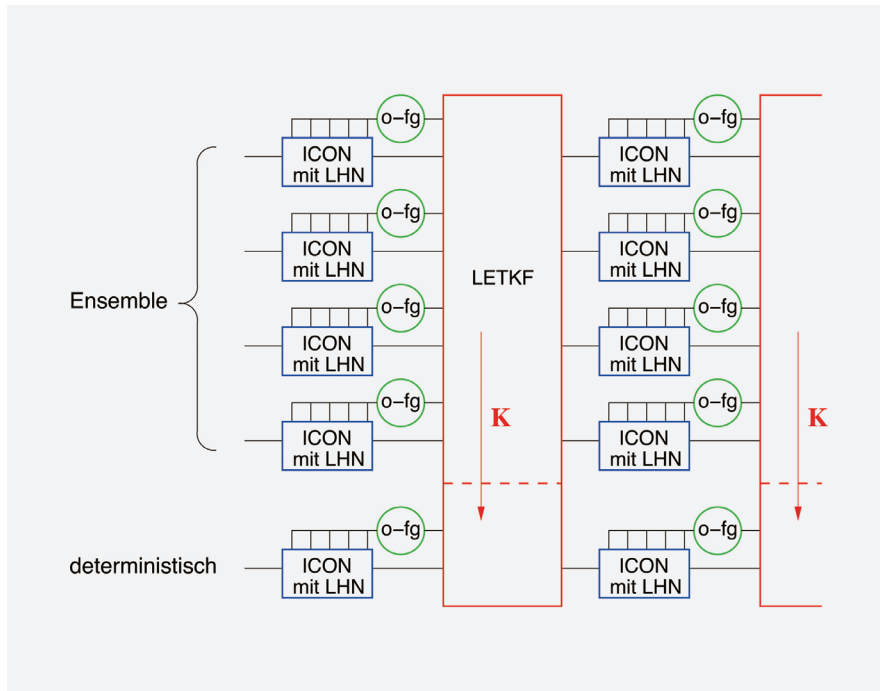


Abbildung 8-2: Schematische Darstellung des Ablaufs des derzeit operationellen Assimilationszyklus des ICON-Modells mit LHN (*Latent Heat Nudging*). *K* kennzeichnet die aus dem Ensemble abgeleitete Kovarianzmatrix, *o-fg* steht für den Vergleich zwischen Beobachtung (*o*) und Modell (*fg* = *first guess* = Einstundenvorhersage).

Analysen für jedes Ensemble-Member sowie den deterministischen Lauf, bei denen jedes Mal näher an die Beobachtungen gezogen wird (siehe Abbildung 8-2). Gleichzeitig ist es notwendig, Maßnahmen zur Erhaltung des Ensemble-Spreads vorzunehmen. Wie stark herangezogen wird, bestimmt das Verhältnis aus Modellfehler und Beobachtungsfehler. Ersterer wird beim LETKF aus dem Ensemble geschätzt, letzterer ist wie früher schon beschrieben eine Kombination aus Mess- und Repräsentationsfehler.

Um den Analysezustand  $x^a$  zu ermitteln, muss das Gleichungssystem (2) gelöst werden. Hierzu wird auf Grundlage des vorliegenden Modellzustandes  $x^b$  (einstündiger *first guess* (*fg*)) des ICON-D2 ein Analyseinkrement berechnet. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Abweichungen aller Beobachtungen  $y$  zu ihren jeweiligen Modelläquivalenten  $H(x^b)$ . Hierin bezeichnet  $H$  den beobachtungsspezifischen Vorwärtsoperator, der die Aufgaben hat, die Modellinformation in den Raum der Beobachtungen zu transformieren. Des Weiteren kennzeichnen die Buchstaben  $B$  und  $R$  die Kovarianzmatrix des Modellhintergrundes und der Beobachtungen (dieser Term wird auch oft als Kalman-Matrix =  $K$  bezeichnet). Weiterführende Informationen finden sich in SCHRAFF et al. (2016) oder noch grundlegender in HUNT et al. (2007).

$$\bar{x}^a = \bar{x}^b + B^b H^T (H B^b H^T + R)^{-1} (y - H(\bar{x}^b)) \quad (2)$$

Derzeit gehen neben den Radarbeobachtungen Messungen aus dem synoptischen Netzwerk, Messungen der Radiosondenaufstiege (zumeist Aufstiegsdaten und wo sinnvoll nutzbar auch Abstiegsdaten), Flugzeugmessungen (AMDAR und ModeS), Messungen der Windprofiler und wenige Bojen oder Schiffsmessungen ein. Diese Daten werden seit

Kurzem durch weitere Fernerkundungsdaten ergänzt, nämlich seit März 2023 durch den sichtbaren Kanal (SCHECK et al. 2020) und seit Anfang 2024 durch zwei Infrarotkanäle des Seviri-Instrumentes der Meteosat-Satelliten. Eine Besonderheit des LETKF-Verfahrens ist die räumliche Begrenzung des Einflusses der einzelnen Beobachtungen (Lokalisierung genannt). Dadurch beeinflussen die Beobachtungen den Analysezustand nur in einer vorgegebenen Nachbarschaft.

Eine Herausforderung bei der Assimilation der Radardaten stellt die hohe räumliche und zeitliche Dichte der Beobachtungen dar. Daher müssen die Daten derzeit einer deutlichen Ausdünnung unterzogen werden. In der Horizontalen werden nur alle 10 km Daten verwendet. Hier erfolgt eine entsprechende räumliche Aggregation der Beobachtungsgrößen. In der Vertikalen wird nur etwa jede zweite Elevation in die Analyse einbezogen. Die zeitliche Auflösung ist derzeit auf eine Stunde beschränkt, d. h. es gehen nur die Radarbeobachtungen zum Zeitpunkt der jeweiligen Analyse ein. Zur Anwendung kommen dabei die bereits qualitätsgesicherten Beobachtungen (siehe voriger Abschnitt). Eine hohe Qualität der Beobachtungen ist eine notwendige Voraussetzung für eine gute Analyse.

Um die beobachteten Informationen mit dem Modell vergleichen zu können, ist ein weiterer Schritt essentiell. Radar-, und im Übrigen auch Satelliteninstrumente, messen nicht direkt die Zustandsvariablen, sondern im Grunde elektromagnetische Strahldichten und Phasen in verschiedenen Spektralbereichen, die von Emissions- und Streuvorgängen an Gasen und Hydrometeoren herrühren. Beim Radar leitet man daraus die Reflektivität, einen Radialwind und weitere Größen ab, beim Satelliten im sichtbaren Spektralbereich die Reflektanz und im Infraroten zum Beispiel die Hellig-

keitstemperatur. Diese Größen hängen in der Regel nicht-linear von den Modellzustandsvariablen ab. Anstelle des Versuchs, daraus vor der Assimilation die Zustandsvariablen rückzurechnen (*Retrieval*), verwenden wir sogenannte Vorwärtsoperatoren, um aus dem simulierten Modellzustand synthetische Messungen zu berechnen, die dann vom LETKF im Beobachtungsraum mit den tatsächlichen Messungen verglichen werden.

Die dafür notwendigen elektromagnetischen Streurechnungen wären in ihrer Reinform für unsere zeitkritische Anwendung viel zu langsam. Daher haben wir am DWD zusammen mit externen Partnern in den letzten Jahren sehr rechenzeiteffiziente und trotzdem ausreichend genaue Approximationen entwickelt, um dafür schnell genug zu sein: Für Radar zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) den *Efficient Modular VOlume scan RADar Operator* (EMVORADO; BLAHAK 2016; ZENG et al. 2016) und für Satellit im sichtbaren Spektralbereich zusammen mit der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München die *Method for FAsT Satellite Image Synthesis* (MFASIS; SCHECK et al. 2016, 2018). MFASIS ist inzwischen auch im international weit verbreiteten Satellitenoperator RTTOV (SAUNDERS et al. 1999) verfügbar, mit dem wir zusätzlich auch die Infrarotkanäle simulieren.

Um das Prinzip zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 8-3 beispielhaft die simulierte Reflektivität einzelner Elevationen von fünf Radaren des DWD für einen Zeitpunkt. Dabei liegen die Datenpunkte im Modell genau für dieselben Orte vor (Schrägentfernung, Azimut, Elevationswinkel), wie die der Beobachtung, und die wesentlichen Messeffekte eines Radars (gekrümmte Strahlausbreitung, Dämpfung, Pulsvolumen) können angemessen berücksichtigt werden – so als

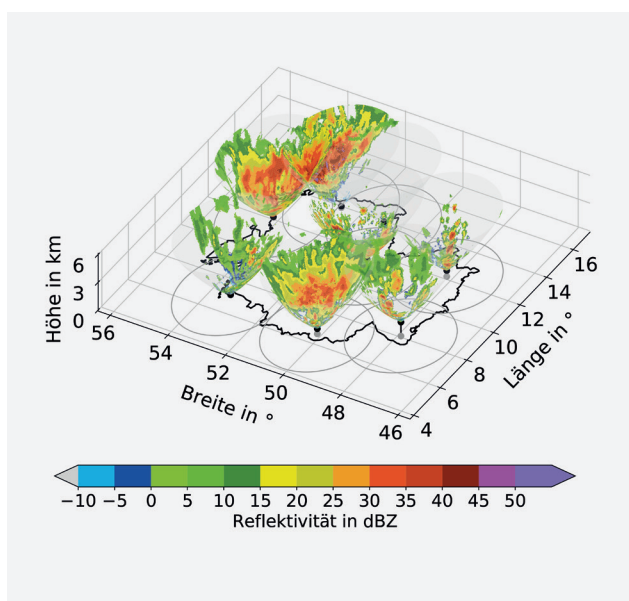


Abbildung 8-3: Beispiel simulierter Radarvolumenscans von fünf DWD-Radaren. Der Übersichtlichkeit halber wird nur eine Elevation gezeigt, EMVORADO (*Efficient Modular VOlume scan RADar Operator*) kann aber jegliche Elevationen simulieren.

hätte das Radar in der simulierten Atmosphäre gemessen. Ganz analog gibt es simulierte Radialwinde. Nach demselben Prinzip können auch Modelläquivalente für die Satellitendaten simuliert werden. Dieses Vorgehen vergrößert die Komplexität des Assimilationsvorganges um eine weitere Ebene. Die Qualität der Analyse hängt somit sowohl von der Qualität der Beobachtungen als auch von der Qualität der Vorhersage, des Vorwärtsoperators und des Assimilationsverfahrens ab.

## 2 Auswirkung auf die Qualität der Vorhersage

Die beiden vorgestellten Verfahren verändern den atmosphärischen Zustand des Modells auf sehr unterschiedliche Weise. Während das *Latent Heat Nudging* den Zustand in jedem Modell-Rechenschritt anpasst, erfolgt die Kalman-Filterung nur im eigentlichen Analyseschritt. Neben der Qualität der Beobachtungen spielen die Kovarianzen des Modellzustandes eine entscheidende Rolle für die Qualität der Analyse und der darauf aufbauenden Vorhersagen. Für die Abschätzung der notwendigen Kovarianzmatrix aus dem Vorhersageensemble ist eine ausreichende Variabilität zwischen den Ensemble-Membren (der sogenannte Ensemble-Spread) entscheidend. Insbesondere im Fall von konvektiven Niederschlägen kann dies eine Herausforderung darstellen. Sollte keines oder nur wenige Member am Ort einer beobachteten Niederschlagszelle einen passenden Niederschlag (hierbei ist die Reflektivität entscheidend) simulieren, wird es dem Verfahren nicht oder nur sehr schwer möglich sein, die beobachtete Information zu assimilieren. Zum Teil kann diese Herausforderung durch eine Kombination mit dem oben beschriebenen Verfahren verringert werden, da das LHN in der Lage ist, Konvektion im Modell an der Stelle der beobachteten Konvektion auszulösen (ZENG et al. 2022). Dies geht zum einen einher mit einer Reduktion der Variabilität des Ensembles, der durch das Aufprägen von Ensemblestörungen entgegengewirkt werden kann. Zum anderen können im LHN die vorliegenden Kovarianzen nicht berücksichtigt werden. Dies wiederum kann durch die kombinierte Assimilation mit den volumetrischen Radardaten verbessert werden.

Der Nutzen der Datenassimilation sollte sich in einer verbesserten Qualität der resultierenden Vorhersagen zeigen. Radarbeobachtungen werden dabei in erster Linie zu einer Veränderung der Vorhersage in Bezug auf den Niederschlag beitragen. Eine Abschätzung der Vorhersagequalität erfolgt im Rahmen der Verifikation. Auch hier bieten die räumlich sehr hochaufgelösten Radarbeobachtungen andere Herangehensweisen als bei der Verifikation gegen konventionelle Beobachtungen. Derzeit hat sich dabei die Verwendung von Nachbarschaftsmethoden, wie dem sogenannten *Fractional Skill Score* (FSS; ROBERTS und LEAN 2008) etabliert.

Abbildung 8-4 verdeutlicht den Einfluss der beiden Verfahren auf die Qualität der Niederschlagsvorhersage, gemessen mithilfe des FSS in einer räumlichen Umgebung

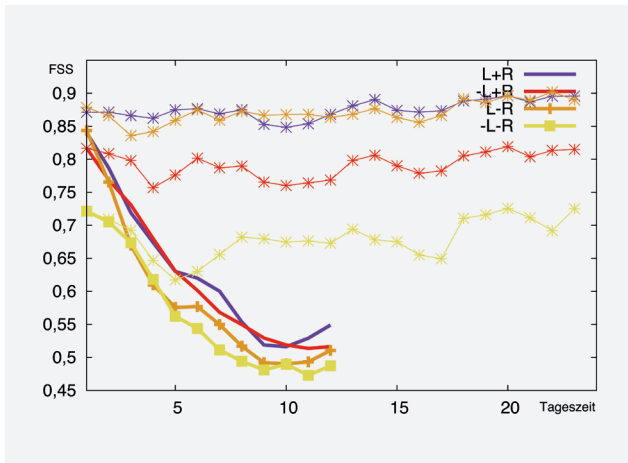


Abbildung 8-4: Verbesserung der Niederschlagsvorhersage durch die Assimilation der Radarbeobachtungen. Dargestellt ist der Fractional Skill Score (FSS; bestmöglicher Scorewert = 1) über einer räumlichen Skala von ca. 22 km<sup>2</sup> für einen Schwellenwert von 1 mm/h als Funktion der Tageszeit. Die dünneren, über 24 Stunden laufenden Linien zeigen den FSS bezüglich der einstündigen first guess-Läufe des Assimilationszyklus, die dickeren Linien den FSS der um 00 UTC startenden Vorhersagen mit einer Länge von 12 Stunden. Die verschiedenen Farben zeigen die Ergebnisse für eine unterschiedliche Nutzung von Radarbeobachtungen in der Assimilation. „L-R“ (gelb) verwendet keine Radarbeobachtungen, „L-R“ (orange) verwendet nur Latent Heat Nudging (LHN), „L+R“ (rot) assimiliert nur Volumendaten und „L+R“ (lila) verwendet beide Verfahren.

von elf Modell-Gitterpunkten (ca. 22 km<sup>2</sup>) für einen Niederschlagsschwellenwert von 1 mm/h. Es wird klar ersichtlich, dass die Verwendung beider Verfahren zur besten Niederschlagsvorhersage führt. Im Assimilationszyklus (dünne Linien und mit Stern markiert) dominiert das direkt wirkende LHN-Verfahren (gekennzeichnet mit „L+R“ und „L-R“). Der Einfluss der volumetrischen Radardaten ist hierbei relativ gering. Ohne Verwendung des LHN zeigt sich allerdings auch eine deutliche Verbesserung durch die Assimilation der volumetrischen Radardaten („L+R“ gegenüber „L-R“). Im Laufe der freien Vorhersage (dicke Linien) wird deutlich, dass die Assimilation der Volumendaten eine nachhaltigere Verbesserung der Umgebungsbedingungen bewirkt, wodurch die Vorhersagequalität nach den ersten zwei bis drei Stunden besser wird. Die Verwendung beider Verfahren zusammen zeigt die besten Ergebnisse. Auf die Verifikation weiterer Vorhersageparameter wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Es sei aber erwähnt, dass sich auch dort ein leicht positiver Einfluss zeigt.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Assimilation von Radarbeobachtungen führt insbesondere im Niederschlag zu einer Verbesserung der Vorhersagequalität. Trotzdem bleibt Raum für weitere Optimierungen. Dies kann sowohl durch weitere Anpassungen in der Modellierung, als auch im Assimilationsschritt geschehen.

Daher wird derzeit nicht nur intensiv an der Operationalisierung anderer physikalischer Parametrisierungen gearbeitet (z.B. Verwendung der 2-Momente-Mikrophysik im SINFONY-Projekt des DWD), sondern auch an Optimierungen in den Verfahren der Assimilation und an der Einbeziehung weiterer Beobachtungsgrößen geforscht. Die Assimilation polarimetrischer Radarmomente als auch die Einbeziehung ausländischer 3D-Radardaten wird derzeit intensiv untersucht und erweist sich als erfolgsversprechend.

### Literatur

BICK, T., SIMMER, C., TRÖMEL, S., WAPLER, K., HENDRICKS FRANSSEN, H.J., STEPHAN, K., BLAHAK, U., SCHRAFF, C., REICH, H., ZENG, Y., POTTHAST, R., 2016: Assimilation of 3D radar reflectivities with an ensemble Kalman filter on the convective scale. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **142**, 1490–1504, <https://doi.org/10.1002/qj.2751>.

BLAHAK, U., 2016: RADAR MIE LM and RADAR MIELIB – calculation of radar reflectivity from model output. *Technical Report* **28**, URL: <https://www.cosmo-model.org/content/model/cosmo/techReports/docs/techReport28.pdf>, Abruf: 18.07.2024.

HUNT, B.R., KOSTELICH, E.J., SZUNYOGH, I., 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena* **230**, 112–126, <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>.

ROBERTS, N.M., LEAN, H.W., 2008: Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Monthly Weather Review* **136**, 78–97, <https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1>.

SAUNDERS, R., MATRICARDI, M., BRUNEL, P., 1999: An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **125**, 1407–1425, <https://doi.org/10.1002/qj.1999.49712555615>.

SCHECK, L., FRÈREBEAU, P., BURAS-SCHNELL, R., MAYER, B., 2016: A fast radiative transfer method for the simulation of visible satellite imagery. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **175**, 54–67, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.02.008>.

SCHECK, L., WEISSMANN, M., BACH, L., 2020: Assimilating visible satellite images for convective-scale numerical weather prediction: A case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146**, 3165–3186, <https://doi.org/10.1002/qj.3840>.

SCHECK, L., WEISSMANN, M., MAYER, B., 2018: Efficient methods to account for cloud-top inclination and cloud overlap in synthetic visible Satellite images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **35**, 665–685, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0057.1>.

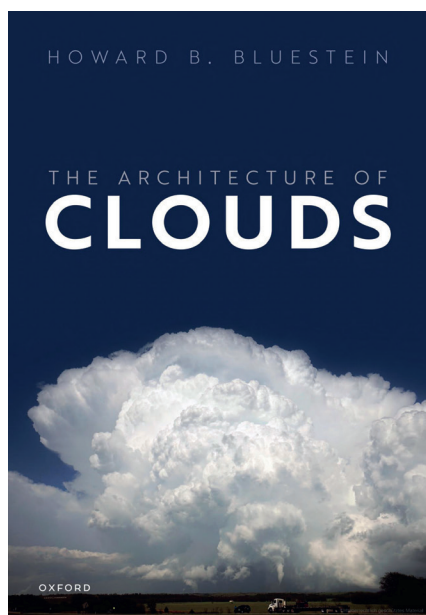
SCHRAFF, C., REICH, H., RHODIN, A., SCHOMBURG, A., STEPHAN, K., PERIÁÑEZ, A., POTTHAST, R., 2016: Kilometre-scale ensemble data assimilation

- for the COSMO model (KENDA). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **142**, 1453–1472, <https://doi.org/10.1002/qj.2748>.
- STEPHAN, K., KLINK, S., SCHRAFF, C., 2008: Assimilation of radar-derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **134**, 1315–1326, <https://doi.org/10.1002/qj.269>.
- WALLER, J.A., BAUERNSCHUBERT, E., DANCE, S.L., NICHOLS, N.K., POTTHAST, R., SIMONIN, D., 2019: Observation error statistics for doppler radar radial wind superobservations assimilated into the DWD COSMO-KENDA system. *Monthly Weather Review* **147**, 3351–3364, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0104.1>.
- ZENG, Y., BLAHAK, U., JERGER, D., 2016: An efficient modular volume-scanning radar forward operator for NWP models: description and coupling to the COSMO model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **142**, 3234–3256, <https://doi.org/10.1002/qj.2904>.
- ZENG, Y., FENG, Y., DE LOZAR, A., STEPHAN, K., SCHECK, L., KHOSRAVIANGHADIKOLAEI, K., BLAHAK, U., 2022: Evaluating Latent-Heat-Nudging Schemes and Radar forward Operator Settings for a Convective Summer Period over Germany Using the ICON-KENDA System. *Remote Sensing* **14**, <https://doi.org/10.3390/rs14215295>.

## Kontakt

DR. KLAUS STEPHAN  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurt Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
[klaus.stephan@dwd.de](mailto:klaus.stephan@dwd.de)

## Buchbesprechung



HOWARD B. BLUESTEIN (2024):  
*The Architecture of Clouds.*  
Oxford University Press, 540 S.,  
ca. 25,99 Euro bzw. 25,00 Pfund,  
ISBN: 9780198870548.

Kein Architekt auf der Welt kann so viel Fantasie haben, um beim Bauen die unzähligen, beinahe unendlich vielen Erscheinungsformen der Wolken in unserer Atmosphäre nachahmen zu können. Deshalb erweckt ein Buch mit dem Titel „The Architecture of Clouds“ große Aufmerksamkeit. Es zeigt und beschreibt auf insgesamt 540 Seiten alle möglichen Wolkenformen und -formationen, vermutlich wirklich alle. Ein renommierter Meteorologieprofessor, Howard B. Bluestein (kurz: Howie „Cb“ Bluestein) aus den USA, hat das Buch, das in diesem Jahr im bekannten Wissenschaftsverlag Oxford University Press erschien, verfasst. Die meisten Wolken hat der Autor in den Bundesstaaten Oklahoma und Colorado, darüber hinaus aber auch in anderen Erdteilen, entdeckt und fotografiert. Er will, so sagt er, mit dem Werk die Leserinnen und Leser zu eigener Wolkenbeobachtung inspirieren, und ich denke, das gelingt ihm ziemlich gut.

Denn er hat einen ganz eigenen persönlichen und manchmal schon poetischen

Zugang zu diesem Naturphänomen. Das Kompendium ist somit auch kein Ersatz für Wolkenatlanten, zum Beispiel den Online-Atlas der WMO. Nein, wenn man durch die Seiten blättert, liest und schaut, wird schnell die Faszination klar, mit der Bluestein sein Metier betreibt. Er verbindet immer wieder die Ästhetik und Schönheit der Wolke mit deren physikalischem Entstehungsgrund, wenn auch das Buch im Wesentlichen doch eher deskriptiver Natur ist.

Bluestein unterscheidet prinzipiell „Non-buoyant Clouds“ von „Buoyant Clouds“, eine Begriffsbildung, die im Deutschen nicht allzu gängig ist. Beim erstgenannten Typ sind „glatte“, „flache“ und zu „schweben“ scheinende, also eher schichtförmige Wolken gemeint, beim zweitgenannten die „blasigen“, „blumenkohlartigen“, mithin eher haufenförmigen (konvektiven) Wolkentypen. Bei letztgenannter Wolkenform separiert er noch zwischen Wolken, die Niederschlag bringen, und solchen, die keinen Niederschlag produzieren. Die Sondercharakteristik „rotierender Wolken“, die die Ursache für Tornadoerscheinungen aller Art sind, behandelt er in einem eigenen Artikel recht ausführlich. Das überrascht nicht, zumal sie in den USA eine besondere Relevanz haben.

In einem abschließenden Abschnitt geht er noch kurz auf die Zukunft der Wolkenbeobachtung ein, auch unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Und im Anhang (Appendix 2) gibt er etliche persönliche Tipps für die richtige Technik beim Fotografieren von Wolken.

Es wird eine Vielzahl von bemerkenswert schönen, zuweilen auch spektakulären Fotos gezeigt. Der Arten-, Formen- und Farbenreichtum lässt einen Meteorologen immer noch staunen, hat man sich doch schon viele Bücher, Kalender oder Ausstellungen zum Thema angeschaut. Manchmal sind die Bilder im Buch allerdings ein

bisschen klein und die Schärfe lässt etwas zu wünschen übrig. Aber das kann die Online-Ausgabe (E-Book) vermutlich wettmachen.

Ein wenig irritiert ist man vielleicht, dass Bluestein auch Schneetreiben bzw. -fegen („blowing snow“) unter dem Begriff Wolke subsummiert (Figure 2.8). Schade zudem, dass es leider auch editorische Unzulänglichkeiten gibt, zum Beispiel dass die Seitenangabe der Beschreibung des *Alto cumulus castellanus* (S. 236-244) nicht zu dem Ort der wunderbaren Ac-Fotos passen will (demgegenüber erst auf S. 251-253). Aber das ist sicher nur ein wenig Jammern auf hohem Niveau, also nur am Rande wichtig.

„The Architecture of Clouds“ ist eines der detailliertesten Veröffentlichungen über Wolken, wenn auch eher aus klassischer phänomenologischer Sicht, aber nicht ohne den wissenschaftlichen Kontext zu vernachlässigen. Und das zu einem niedrigen Preis.

Jörg Rapp

# Examina im Jahr 2023

## Bachelor-, Diplom- und Masterarbeiten, Dissertationen und Habilitationen in der Meteorologie und verwandten Fächern aus dem deutschsprachigen Raum

---

### Universität Basel

---

#### *Bachelorarbeiten*

HÖSLI, Leo: Semi-mobile PM-Messungen in innerstädtischen Wohngebieten.

SCHWITTER, Timothy: Eine Windklimatologie mit Sodar-Daten aus Gobabeb (Namibia).

SPAHR, Roman: 10 Jahre Albedo-Messungen an der BSRN Station Gobabeb, Namibia.

#### *Masterarbeit*

BECK, Quirin: Evaluation of SUEWS (Surface Urban Energy and Water balance Scheme) for basel flux towers' energy and CO<sub>2</sub> fluxes.

#### *Dissertation*

UTINGER, Battist: Developing An Instrument To Quantify Aerosol Toxicity.

---

### Universität Bayreuth

---

Keine Meldungen

---

### Freie Universität Berlin

---

#### *Bachelorarbeit*

1 Arbeit

#### *Masterarbeiten*

5 Arbeiten

#### *Dissertationen*

2 Arbeiten

---

### Universität Bonn

---

#### *Bachelorarbeit*

MEURER, Pascal: Attribution von Hitze- wellen und Dürren über Europa.

#### *Masterarbeiten*

BAUR, Charlotte Clara: A vertical profile correction applied to the rainfall algorithm R(AH) an R (AH, KDP) to overcome the impact of vertical gradients of warm-rain precipitation: the flood in western

Germany on July 14, 2021.

RADLWIMMER, Antonia Louise: Snow Depth around Longyearbyen, Svalbard.

#### *Dissertationen*

BYAMBAA, Oyunnmunkh: Climate variability and change in the Altai-Dzungarian region and its hydrological impact.

CHEN, Ju-Yu: Advances in quantitative precipitation estimation with polarimetric C-Band radar networks.

HARTICK, Carl: Integrated terrestrial simulations over Europe: Groundwater-atmosphere feedbacks with altered water tables including the effect of recent droughts.

LEUFEN, Lukas Hubert: Time filter assisted deep learning to predict air pollution.

NETZEL, Timon: Quantitative paleoclimate reconstructions in the European region based on multiple proxies.

REIMANN, Lucas: Assimilation of 3D polarimetric microphysical retrievals with an ensemble Kalman filter in Germany.

TESCH, Jan Tobias: Interpretable deep learning for studying the earth system.

---

### Universität Bremen

---

#### *Masterarbeit*

VISARIUS, Thomas: Contributions to the extension of TCCON in the mid-infrared spectral region.

#### *Dissertation*

THIELKE, Linda: Winter sea ice characteristics in the central Arctic from thermal infrared imaging.

#### *Habilitation*

WERNER, Martin: Exploiting water isotopes for an improved understanding of climate changes.

---

### Technische Universität Dresden

---

#### *Masterarbeiten*

CHEN, Baixi: Vegetation modeling for numerical simulations of urban climate with focus on trees: Developing and parame-

trization of allometric functions based on terrestrial laser scanning data.

KYNAST, Kerstin: Grün Sta(d)t Grau – Die Wirkungen von Straßenbäumen auf den thermischen Komfort in urbanen Siedlungsräumen. Analyse mobiler Klimamessungen im Stadtgebiet Dresden und Vergleich mit Modellsimulation in PALM-4U.

VALLEJO SERNA, Julio Eduardo: The cooling potential of green roofs as a function of their distribution and structure in typical European urban structures.

#### *Dissertationen*

QUESADA CHACÓN, Dánnell: Deep Learning Based High-Resolution Statistical Downscaling to Support Climate Impact Modelling. The Case of Species Distribution Projections.

PÖSCHMANN, Judith: Exploring German Radar Data for Consistency and Potential Scaling in Time and Space.

---

### Universität Frankfurt

---

#### *Bachelorarbeiten*

BERNTHEUSEL, Moritz: Feuchteabhängigkeit der Clusterverteilung in einem Nitrate-CIMS bei CLOUD15.

VIEIRA FISCHER, Frederik: Exploring cloud adjustments in south-east pacific subtropical stratocumuli using geostationary satellite data.

#### *Masterarbeiten*

HIRTH, Felix: Characterization of an electro-spray ion source for chemical ionization mass spectrometry with further development for reproducible results.

KLEBACH, Hannah: New-Particle Formation driven by Methanesulfonic Acid and Dimethylamine during the CLOUD15 campaign.

KNOP, Irmgard: Impact of Gravity Waves on Tracer Transport.

KISTNER, Irina: Entwicklung und Test eines automatisierten Probensammlers für flugzeuggetragene Messungen.

MEIXNER, Katharina: A comparison of

halocarbon observations between the Zugspitze and other European stations.  
SCHUBERT, Natalie: Comparison of short-lived brominated hydrocarbons at selected European measurement sites.

*Dissertationen*

CAUDILLO-PLATH, Lucia: Application of a Thermal Desorption-Differential Mobility Analyzer (TD-DMA) coupled to a nitrate chemical ionization-atmospheric pressure interface-time-of-flight (CI-API-TOF) for measuring nanoparticles at the CLOUD Chamber at CERN.  
DANKER, Jessica: Climatology of Morphology and Cloud-Radiative Properties of Marine Low-Level Mixed-Phase Clouds.  
JESSWEIN, MARKUS: Global Analysis of halogenated trace gases in the UTLS: from long-lived to short-lived substances.  
PFEIFER, Joschka: Ammonia and ion studies in the CERN CLOUD chamber.  
UNGEHEUER, Florian: Chemical characterization and source attribution of aviation-related ultrafine particles.  
WEINKÄMMERER, Jan: Large-eddy simulations of the mountain boundary layer: Daytime exchange processes and nocturnal fog formation.  
ZAUNER-WIECZOREK, Marcel: Airborne measurements of gaseous sulfuric acid, atmospheric ions, and air pollutants in the troposphere and lower stratosphere above Europe.

---

Technische Universität  
Bergakademie Freiberg

---

*Masterarbeit*

SANCHEZ GASSO, Agnes Ines: Investigation of future extreme temperatures over Europe influencing extreme precipitation and links to synoptic circulations.

*Dissertation*

HERRERA-LORMENDEZ, Pedro: Identification of changes in large-scale weather patterns over Europe.

---

Universität Freiburg

---

*Bachelorarbeiten*

BRAUN, Moritz: Verteilung, Variabilität und Trend der Globalstrahlung in Ruanda.  
EPP, Katharina: Assessment of indoor heat hotspots in Freiburg's University Hospital based on indoor measurements during

summer 2023.  
GERTSEN, Carlotta: Urban-rural differences in the vertical structure of the atmospheric boundary layer during a hot summer day in Berlin, Germany.

JAHNS, Camilla: Analysis of the differences in the NDVI fraction of 54 European cities.  
MONTAG, Lennard: Anwendung und Weiterentwicklung des empirischen Ansatzes zur UHI-Bestimmung mit Hilfe von Landnutzungsdaten nach Krähenmann et al.  
MALLÉE, Esra: Auswirkungen von Bäumen auf das Klima in Städten.  
OBERHARDT, Felix: Niederfrequente Luftdruckschwankungen – Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sowie exemplarische Analyse von Luftdruckdaten für Freiburg im Breisgau.  
PFENNING, Mattis: Messen von windinduzierter Torsion an einer Gelbkiefer.  
QUASS, Lara: Evaluation der Elemente in Hitzeaktionsplänen mit sozialen Dimensionen und deren Wirksamkeit zur Verringerung hitzebedingter Gesundheitsrisiken: Eine systematische Literaturrecherche.  
SCHMITTHENNER, Nick: Entwicklung eines Verfahrens zur Normalisierung des thermischen Bioklimas.  
SCHRAML, Kilian: Untersuchung von Interaktionen zwischen Windgeschwindigkeit, Luftdruck und windinduzierten Baumreaktionen an einer freistehenden Rotbuche.  
THEISEN, Jacques: Assessment of climate reanalysis surface air temperature data on communal level.

WESTPHAL, Julian: Literaturstudie zu den gesundheitlichen Auswirkungen des Wetters auf Atemwegserkrankungen.  
WIECHMANN, Annika: Quantifizierung des globalen Windenergiepotenzials: ein Überblick über die 40 Länder mit der höchsten installierten Onshore-Kapazität.  
WÖRNER, Tabea: Veränderungen im Mikroklima eines Kiefernforstes als Folge zunehmender Dürren.

*Masterarbeiten*

HOLTZUM, Sophie: Analyse der Verwendung von Geodaten für Hitzeanpassungsstrategien am Beispiel der Stadt Freiburg.  
REES, Fabian: Analysis of long-term changes in evapotranspiration of a pine tree forest suffering from drought using the Bowen ratio energy balance and eddy covariance approach.  
SANDER, Leon: Wind and solar resource-centered multi-criteria assessment of renewable energy priority zones in Germany.

*Dissertation*

SULZER, Markus: Real-time monitoring, short-term predictions, and climate projections of indoor human thermal comfort using low-cost sensors and artificial neural networks.

---

Universität Göttingen

---

*Bachelorarbeiten*

BIRK, Nils: Evaluierung von Methoden zur Schließung von Datenlücken in automatischen Bodenrespirationsmessungen.  
FRANKE, Leon: Analysis of photosynthetically active radiation below and above canopy at Hainich national park.  
HÖHL, Elisabeth: Fotosyntheseleistung des Unterwuchs im Nationalpark Hainich.  
HOLZER, Alex: Vergleich zweier meteorologischer Stationen am Reinshof.  
PREDATSCH, Paul: Potentielle Evapotranspiration in einem Buchenwald, am Waldrand und auf einer Wiese.  
RÜTER, Maira: Control variables for growth dynamics in Hainich National Park before, during and after the 2018/2019 drought period.  
TEMPUS, Richard: Mikroklimatische Einflüsse durch Wechselwirkung von Topografie und Vegetationsstruktur im tropischen Tiefland der Provinz Jambi, Sumatra, Indonesien.

*Masterarbeiten*

HANGGARA, Bayu Budi: Analysis of the dynamics of land-use gradient intensity on the greenhouse gas emissions, surface energy balance, and water efficiency in Southeast Asian forest and plantation systems.  
MASSARO, Simone: Evaluation of Kalman Filter for meteorological time series imputation for Eddy Covariance applications.

*Dissertation*

EMAD, Anas: Flux measurements at the land-atmosphere interface: Extending the theory and implementation of the true eddy accumulation and eddy covariance measurement techniques.

---

Universität Graz

---

*Bachelorarbeiten*

BAUER, Cornelia: Die Auswirkungen von Klimawandel und Extremwetter auf die Landwirtschaft in Europa.

- DWORSCHAK, Marena: Geoengineering in Österreich.
- FREYTAG, Clemens: Optimizing manual snow avalanche detection based on two consecutive Sentinel-1 SAR images.
- GASCHNIG, Lea: Strahlungshaushalt der Erde.
- GRINSCHGL, Fabian: Climate change in the past and future with a focus on the Austrian Alpine region.
- KNOCH, Kilian: Veränderung alpiner Gefahren in den Alpen durch den Klimawandel.
- KÖNIGSHOFER, Nikolaus: Die Rolle der Schnee- und Eisschmelze an einem süd-exponierten Gletscher (Beispiel Ködnitzkees).
- KOLLER, Melanie: Polarlichter.
- KOO, Paul Alexander: Changes in Sea Ice in the Polar Regions.
- LINDLMAYER, Martin: Radiation Measurements and Surface Energy Balance at Kapp Linné, Svalbard.
- MADERTHANER, Selina: Einfluss von Ernährungsstilen in Österreich auf das Klima.
- MAIER, Anna: Die Auswirkungen des Klimawandels auf Korallen.
- MONTHALER, Tobias: Shift in Hurricane-related landfall precipitation on the US Gulf & East Coast (1953-2012).
- NADAREVIC, Haris: Atmospheric pressure waves following the 2022 Hunga Tonga - Hunga Ha'apai eruption.
- OBERMAIER, David: Extreme Schneefallereignisse in Österreich.
- ORTNER, Nadja: Veränderung von Großwetterlagen in Österreich von 1999 bis 2021.
- PENDL, Matthias: Grüne Weihnachten – weiße Ostern: Die Entwicklung von Schneedecken.
- POLTNIG, Thomas: Niederschlagsentwicklung in Kärnten (1900-2020).
- RAMMER, Anja: Long-term snow cover trends in Austria.
- ROHR, Philipp Sebastian: Die Klimanormalperiode 1991-2020 an der Station Graz-Universität.
- SCHLAGER, Sebastian: Climate Change and the impacts on Austrian winter tourism.
- SCHWEIGER, Jana Maria Franziska: Entwicklung von Extremtemperaturen in Österreich, anhand der Städte Wien und Graz.
- STAFFLER, Matthias: Vergleich von Wetterdaten der Stationen Graz-Universität und Graz Universität/Heinrichstraße.
- STIFTER, Melissa: Photometeore – Atmosphärische Optik.
- ULZ, Stephan: Green's Function Method for the Analysis of Soil Heat Flux in the Mountain Group Gesäuse.
- VERHOUNIK, Martin Robert: Beobachtete und simulierte Sommerniederschläge des Jahres 2009 in der Südoststeiermark.
- WEISS, Gabriel: Klimatologischer Vergleich gerasteter Radiosondendaten.
- ZINGL, Josef: Wie werden tropische Wirbelstürme durch den Klimawandel beeinflusst?
- Masterarbeiten*
- BLEIBERSCHNIG, Simon: Sentinel-1 Time Series for Mapping Snow Cover and Snow Depth in a low Arctic Environment, South-Western Greenland.
- GABBERT, Anna Magdalena: Evaluation of X-band Doppler weather radar data based on station-based precipitation measurements in the central region of Styria.
- GEIDER, Rita: Lernen im Rauschen des Wassers – Wasserfallweg in Kolm-Saigurn.
- KRIEGL, Martin: Double jet stream states and impacts on European heatwaves with a special focus on Austria.
- KÜHROVÁ, Katerina: Remote sensing as a data source for urban greenery planning: insights from planning practice.
- MAIER, Linda Martina: Atmospheric Rivers - Characteristics and Impacts with Focus on High Latitudes.
- ONITSCH, Tobias Richard: Der Einfluss von unterschiedlichen Wetterphänomenen auf den Aufbau der Schneedecke und die damit einhergehende Gefahr von Lawinen.
- PICHLER, Moritz: Investigating atmospheric blocking and related extreme events in Austria using observation-based data sets.
- PÖMMER, Theresa: Der Klimawandel aus der Sicht der LandwirtInnen und Landwirte im Waldviertel.
- STAHL, Christina: How attribution science changes the landscape of private climate litigation.
- TRUMMER, Simon: A semi-automated approach for generating a high-resolution glacier inventory of peripheral Greenland.
- Dissertationen*
- ENGDAW, Mastawesha: Attribution of temperature and hydrological extreme events to human-induced climate change.
- SATYANARAYANA, Tani: Innovative statistical downscaling and error correction methods for extreme precipitation and impact studies in the Alpine regions.
- PLIEMON, Thomas: Analysis of the climate in the Little Ice Age based on early instrumental measurements, narrative data, and proxy data.
- RESCH, Gernot: Homogenization of snow measurements for robust socio-economic Snow climate indicators in the Alps.
- Habilitation*
- ABERMANN, Jakob: The Cryosphere of Greenland's Periphery in a Changing Climate – The value of interdisciplinary long-term monitoring.
- 
- Universität Hamburg
- 
- Bachelorarbeiten*
- AUSTEN, Dominik: Precipitation rates in Arctic moist air intrusions from airborne radar measurements.
- CARSTENSEN, Merit: Wie beeinflusst die CO<sub>2</sub>-Konzentration direkt die Oberkante konvektiver Wolken?
- HAFEZI RACHTI, David: Interpretable Machine Learning to Understand Meteorological Impacts on Ecosystem Carbon Uptake.
- LI, Bohong: Analyzing steep temperature drops using data from the Hamburg Weather Mast.
- MANN, Lennart: Zugbahnen von konvektiven Niederschlagszellen über Hamburg.
- NELLESEN, Leonie: New insight on Earth's longwave radiative feedback from CERES satellite observations.
- SOLL, Hans-Jürgen: Analyse von Morning Dips.
- Masterarbeiten*
- BUSCH, Thorben: Variabilität der Geostrophischen Windfeldes über der Deutschen Bucht.
- CHRIST, Svenja: The influence of the sea surface temperature gradient in the Gulf Stream region on cyclone development, warm conveyor belt ascent, and downstream ridge formation during the European winter 'heat wave' in February 2019.
- DIX, Christian: Der systematische Einfluss deutscher Großstädte auf Niederschlag.
- DZIOBAKA, Matthias: Vergleich von Winddaten des Wettermastes Hamburg mit ICON-D2 Prognosewerten im Kontext von Störfallausbreitungssimulationen.
- FIX, Fiona: How does dry air influence moist convection?
- KOWALCZYK, Lorena: Creating a long data record of Ice Water Path.
- PETERSEN, Jon: It st-ar-ts – Modelling the Transfer of Solar Radiation in Planetary Atmospheres.

RAGHUVANSHI, Nikhil: Wind Tunnel Measurements of Wind Induced Drag Forces Acting on Modelled Ice Surfaces – A Feasibility Study.  
SAMLAND, Mailin: Variability of aerosol particle concentrations in Hamburg from non-exhaust road traffic emissions.  
STOLLA, Katharina: Understanding the Intermodel Spread of Simulated Arctic September Sea-Ice Sensitivity.  
WU, Yuting: A machine learning approach to assess the coffee yield development yet to come – A case study for Brazil.

*Dissertationen*

BADEKE, Ronny: Small-scale modeling of dispersion and chemistry of ship plumes in urban areas.  
CHENG, Ge: Parameterization of canopy processes for atmospheric models.  
KARWAT, Alexia: Extra-Tropical Cyclones in a Warming Climate: Trends and Clustered Activity in the Northern Hemisphere.  
KRIEGER, Daniel: Predictability of German Bight Storm Activity.  
LANG, Theresa Claudia: On the Uncertainty in Modelling Tropical Relative Humidity.  
MICHEL, Simon Josef: Feasibility Study of Heavy Gas Dispersion Experiments in Complex Environments in Physical Modelling.  
RADTKE, Jule: On the relationship between precipitation and spatial organisation in the trades.  
SEITZER, Benedikt Paul Hermann: The Influence of Geometric Model Complexity on Near-Wall Flow Phenomena and their Resolution in Large-Eddy Simulations.  
STRIGUNOVA, Iana: Signatures of Eurasian heat waves in the global Rossby wave spectra in reanalyses and CMIP models.

---

Universität Hannover

---

*Bachelorarbeiten*

BRUNS, Nadja: Mögliche Pfade zur klimaneutralen Region Hannover.  
HERRMANN, Maja Pauline: Entwicklung eines Wärmesummenmodells für die Blattfläche von Maisbeständen.  
HAUSCHOPP, Jens Ole: Der Einfluss des Stadtwaldes Eilenriede auf das Stadtklima der Oststadt Hannovers.  
HAUSCHILD, Julia: Vergleich und Bewertung von kostengünstigen privaten Wetterstationen.  
HEMPEL, Tobias: Ertrag von verschiedenen ausgerichteten Solarmodulen bei variabler

Einspeisevergütung.  
SCHRADER, Tim: Analyse und Klassifizierung von Grenzschichtobservierungen während der ISOBAR Messkampagnen in Hailuoto, Finnland.  
SCHUMBURG, Christian: Entwicklung adressatengerechter Erklärungen zu Wärmepumpen im Rahmen eines Klimaschutzprojekts.  
STEDING, Alexander: Testing a forecasting system for the measuring sites Hannover-Herrenhausen and Ruthe based on neural networks.

*Masterarbeiten*

BRASSAT, Jannis Christian: Untersuchung der Mechanismen zur Staubteufelentstehung mittels Lagrange'sche Partikel – Eine LES-Studie.  
RUTTANAWONGCHAI, Siriphong: Ertrag von verschiedenen ausgerichteten Solarmodulen bei variabler Einspeisevergütung.  
URBACH, Erika: Radiation Effects on the Small-Scale Mixing in Warm Clouds.  
WU, Shize: LES Study on the Effect of Building Retrofitting on the Urban Microclimate.

*Dissertationen*

CRISOSTO GONZÁLEZ, Cristian: Solar Irradiance Forecast from All-sky images using Machine Learning.  
GIERSCH, Sebastian: High Resolution Numerical Simulations of Dust Devils in the Convective Boundary Layer – Effects of Detailed Process Representation on Vortex Development and Dust Release.  
MAAS, Oliver: Power output and wake effects of very large wind farms investigated by large-eddy simulations.  
SCHWENKEL, Johannes: Large-Eddy simulation of nocturnal radiation fog: Advances in microphysical representation and process-level evaluation.

---

Universität Hohenheim

---

*Bachelorarbeit*

BREUNINGER, Noah: Land-atmosphere coupling induced local convection initiation in central Europe, a study based on the heated condensation framework.

*Masterarbeiten*

ALBICKER, Lisa Anna: Exploring Pro-Environmental Behavior and Transformative Learning through Social Practice Theory in Organizations: A case study of

Fridays for Future.  
DAUBNER, Marcel: Simulating the impacts of agrophotovoltaic panels on crop radiation fluxes in Baden-Württemberg using the WRF-NOAHMP model.  
DEIEN, Andrea: The Impact of Afforestation on the Connection Between Heat Wave Characteristics and Climatological Pre-conditions in Europe.  
KIM, Yoolim: Comparing Vertical Wind Observations in Convective Boundary Layer Between Doppler Cloud Radar and Doppler Lidar.  
REMY, Erika: NO<sub>2</sub> and PM Exposure Assessment with Low-Cost Sensors / Bestimmung der NO<sub>2</sub>- und PM Exposition mit Low Cost Sensoren.  
SANNEMANN, Marius: Development of in-situ sampling and pH-measurement in hydrothermal treatment of manure and digestate.  
SHARMA, Prayati: Atmospheric Preconditioning of Surface-Triggered Convection in the Changing Climate in Europe.

*Dissertationen*

JACH, Lisa Lea: Sensitivity of land-atmosphere coupling strength in dependence of land cover and atmospheric thermodynamics over Europe.  
MORI, Paolo: Downscaling of ECMWF SEAS 5 seasonal forecast over the Horn of Africa using the WRF model.  
WARE, Markos Bubusa: Climate Dynamics: The Performance of Seasonal Ensemble Forecast for Improving Food Security in Ethiopia.

---

Universität Innsbruck

---

*Bachelorarbeiten*

BRÜCKNER, Lina: Modellevaluierung in komplexem Gelände – Auswahl eines Gitterpunktes anhand topographischer Eigenschaften.  
EICHHOLZER, Luis: Causes and Effects of Directional Wind Shear in Complex Terrain.  
EINKEMMER, Hermann: Analyse der CO<sub>2</sub>-Quellen im urbanen Umfeld anhand von in-situ Messungen am IAQ.  
FISCHBACHER, Roland: Bedeckungsgrad flacher Konvektion in der Passatwindzone während EUREC4A Auswertung der Radardaten und Datenvergleich mit den HALO-Daten.  
HILDEBRANDT, Malte: Wetterprognosequalität im Gebirge und Flachland im

- Vergleich Untersuchung am COSMO-1 Modell.
- LÄNGLE, Jessica: Untersuchung von Methanquellen im Stadtgebiet Innsbruck mittels Eddykovarianz Messungen am IAO.
- PFLÜGLER, Verena: Performance of regional Climate Simulations over Mountainous Terrain Comparison by the means of COSMO-CLM.
- THALLER Florian: Variabilität der Atmosphäre im Inntal. Ein Vergleich von vertikalen Temperaturprofilen entlang der Talachse.
- VIEBAHN, Tilman: Windregime und Stabilität in einem alpinen Seitental im Sommer. Eine Standortcharakterisierung im Rahmen der TEAMx Vorkampagne 2022.
- WIECH, Andrea: Methan-Konzentration am Sonnblick 2012-2021 (Vergleich mit Stadtgebiet Innsbruck IAO).
- ZELGER, Lena: Messungen von PM10-Feinstaubkonzentration und Aerosol optischer Dichte in Innsbruck im Jahr 2021 und 2022.
- Masterarbeiten*
- ALEXA, Almut Dorothee: Atmospheric boundary layer structure at the head of a small Alpine tributary valley detected with uncrewed aerial systems (UAS).
- BARBIERI, Silvia: Turbulent sensible heat flux in complex terrain: a comparison between parametrizations on Hintereisferner.
- BINDER, Michael: Non-orographic gravity waves above propagating tropopause depressions.
- CASTIGLIONE, Anna: From global warming to extreme precipitation: An attribution study of the Vaia storm (2018) to raise climate change risk-perception in the Trentino population.
- DEIDDA, Paolo: On the effect of tributary valleys on thermally driven winds in the main valley: a case study in the Inn Valley.
- ISIDORI, Dabih: Atmospheric Deserts and Severe Convection Over Europe: 7 Case Studies.
- FRITZ, Antonia: Scale Interaction of Simulated Thermally Driven Winds in the Inn Valley, Austria – Sensitivity to the Horizontal Grid Size and Planetary Boundary Layer Parameterization.
- KÖNIGER, Lennart: Case study of large snowfall event on the Tibetan Plateau associated with tropical cyclone activity.
- MAJER, Dominik: May the snow be with you: forecasting heavy snowfall in the Northern Tatra Mountains.
- ROURA ADSERIAS, Francesc: Toward ice-free Pyrenees: the case of Aneto glacier.
- SCHMACK, Judith: Seasonality of atmospheric new particle formation at Sonnblick Observatory – Analysis of the years 2019-2021.
- SCHROEDER, Marie: Snow Water Equivalent measured by a Cosmic Ray Neutron Sensor: A Case Study from Hintereisferner, Austria.
- TASCH, Raphael: Do Thunderstorm Environments actually Produce Thunderstorms?
- WINTER, Calum: Temporal and spatial trends in precipitation in the Rofental.
- Dissertationen*
- MORGENSTERN, Deborah: European Lightning conditions in all seasons explained by Thunderstorm Environments.
- STUCKE, Isabell: When lightning propagates upwards: Meteorological characteristics and risk assessment of upward lightning at tall structures.
- VOORDENDAG, Annelies: Investigating glacier mass balance and snow redistribution with long-range terrestrial laser scanning data at Hintereisferner.
- Habilitation*
- LEHNER, Manuela: Local flow effects in the atmospheric boundary layer over mountainous terrain.
- 
- Karlsruher Institut für Technologie
- 
- Bachelorarbeiten*
- ARNOLD, Laura: Laboruntersuchungen des Gefriervorgangs in unterkühlten Wassertropfen.
- GÖTZ, Simon: Characterization of Wood Burning Samples using Raman Microscopy.
- GRAMLICH, Kevin: Objektive Identifikation von Sting Jets am Beispiel von Sturm Friederike.
- REIMUS, Tim: Untersuchung der Verteilung von Spurengasen mit ICON-ART.
- Masterarbeiten*
- LI, Siyu: Development of a Machine Learning Model for Hail Prediction in Germany.
- LIPPMANN, Tim: Ice Nucleating Particle Measurements with a High Temporal Resolution in Svalbard During Spring-time 2023.
- SCHMID, Pablo Lenard: Quantification of Greenhouse Gas Emissions in Thessaloniki, Greece.
- TONN, Mathis: Impact of wind shear on aerosol-Cloud interactions and convective precipitation.
- VOIGT, Juliane: The Thermohaline Circulation and its Impacts on the European Storm Tracks.
- Dissertationen*
- AGEET, Simon: Predictability of Rainfall in Uganda from daily to sub-monthly timescales using multi-model ensemble forecasts.
- BORNE, Maurus: The impact of Aeolus wind observations on tropical-wave and precipitation forecasts.
- BRUCKERT, Julia Rebecca: The impact of Aeolus wind observations on tropical-wave and precipitation forecasts.
- BRUNO, Olimpia: Investigation of the Cloud Phase Distribution.
- DIETEL, Barbara Magdalena: Satellite observations of the phase of midlevel clouds.
- EISENSTEIN, Lea Andrea: Objective identification of dynamical features within European winter-storms, their climatologies and predictability.
- FENG, Jiang: Chemical characterization and optical properties of brown carbon aerosol.
- HAUSER, Seraphine: A local PV perspective on contributions to the amplification and maintenance of the anticyclonic anomaly of blocking regimes in the Atlantic-European region.
- HERKOMMER, Benedikt: Building a COCCON (COLaborative Carbon Column Observing Network) travel standard and using it to validate TCCON (Total Carbon Column Observing Network) sites worldwide.
- JUNG, Hyunju: Analyze behavior of wave-convection coupling for new data assimilation approaches in the tropics.
- MAIER-GERBER, Michael: Predictability of Tropical Cyclone Activity in the North Atlantic Ocean.
- SCHORR, Tobias: Assessing the Potential of Cirrus Cloud Thinning through Cloud Chamber Experiments and Parcel Model Simulation.
- ZHANG, Hengheng: spatial distributions of aerosol particles in and above the planetary boundary layer by scanning LIDAR measurements.
- 
- Universität Kiel
- 
- Bachelorarbeiten*
- BORN, Kim Sarina: Wind- und Temperaturvariabilität aus Beobachtungen und Reanalysen für den „Golf du Lion“.

BRECHTELSBAUER, Stefanie: Extreme Greenland Ice Sheet melt events in a warmer world: A storyline approach.  
 JOHNSEN, Thies: Impact of Ocean Model Resolution on the Representation of North Atlantic and European Blocking in FOCI-OpenIFS.  
 KUMMER, Lasse: Representation of double-gyre circulations in ocean models of varying horizontal resolutions.  
 LINDL, Mario: Klimaänderungen und Wetterextrema in Kiel aus Messungen und Reanalysedaten.  
 MEDER, Ludwig: Investigation of the Impact of Turbine Technologies on Wind Energy Yields in Future Wind Climates.  
 RHEIN, Janika: Southern Ocean Response to Idealized Ice Shelf and Iceberg Melting in the Climate Model FOCI.  
 SCHMITT, Katharina: Convective and Gravity Wave Momentum Transport during EUREC4A.

*Masterarbeiten*

BUBMANN, Sebastian: Is statistical downscaling of seasonal forecasts worth the effort?  
 RAHM, Tabea: How will the dominant weather regimes change under the influence of climate warming?  
 SCHREIBER, Lukas: What Drives the Salinity in the Global Ocean under Changing Climate Forcing? Responses in Climate-Models within an Experiment of a Model-Intercomparison Framework.

*Dissertation*

KRÜGER, Julian: On the Role of North Atlantic Sea Surface Temperatures for European Heat Events.

---

Universität Köln

---

*Bachelorarbeiten*

BAUMANN, Nadja: Kaltluftausbrüche und Niederschlag während COMBLE.  
 DRUDE, Johanna Ursula: Wolkenklassifizierung während der HALO-(AC)<sup>3</sup>-Kampagne über Ny-Ålesund.  
 PROBST, Carolin: Vergleich sommerlicher Ahrhochwasser hinsichtlich meteorologischer und hydrologischer Faktoren.  
 RESKE, Luisa: Darstellung des „Urban-Heat-Island“-Effektes in lokalen ICON-Simulationen.

*Dissertationen*

LANG, Cong: A Study of Convective Turbu-

lent Dust Dry Deposition: Parameterization and application.  
 JHO, Linh Tran Thuy: Extremes in wind and photovoltaic power production in Europe analysed using synoptic weather patterns.  
 STEINHEUER, Julian: Vertical wind gust profiles.  
 YIN, Xin: A Study of Convective Turbulent Dust Dry Deposition: Parameterization and application.

---

HS Bund im FB Wetterdienst Langen

---

*Diplomarbeiten*

FINDEISEN, Sarah: Analyse der Bodenwasserverfügbarkeit eines sächsischen Waldstandorts mit Fokus auf die Jahre 2017 bis 2022.  
 HILLEBRAND, Nico: Untersuchung zum Einfluss des Wetters auf die Einsatzverfügbarkeit von Hubschrauberkräften der Bundespolizei unter Verwendung von Einsatzdaten der Bundespolizeifliegerstaffel-Ost im Jahr 2022.  
 LESSMANN, Niklas Felix: Untersuchung des Lake Effektes über der Ostsee anhand einer Fallstudie.  
 SCHMIDT, Julia: Strukturierung von Eingangsparametern in das FIALA Physiological Comfort Modell im Rahmen der Adjustierung des UTCI auf den militärischen Anwendungsfall.  
 SEELIGER, Yannick: West bei Südwest oder Ost bei Nordost – Statistische Auswertung von Windrichtung und Windstärke im Zeitraum 1991-2020 als Entscheidungshilfe für die Segeltörnplanung zwischen Genua und Marseille.  
 UMBACH, Laura: Klimatologische Betrachtung der im Jahresverlauf stattfindenden Verschiebung der Kenntage.  
 WILLMANN, Velten Mathis: Auswertung vieljähriger Messdaten zum Wasserhaushalt von Zwischenfrüchten.  
 ZDUNEK, Dennis: Verifikation von flughafenbezogenen Windwarnungen und Anforderungen für die Zukunft.

---

Universität Leipzig

---

*Bachelorarbeiten*

ASSENBAUM, Amelie: Aufbau und Charakterisierung eines Experiments zur Untersuchung von Sekundäreisprozessen.  
 BENEDIKT, Leonard: Räumliche Variabilität des Niederschlags aus Messungen mit drei identischen Laserniederschlagsmonitoren.

FIEDLER, Rene: Validierung satellitengestützter Wolkenbeobachtungen mittels bodengebundener Fernerkundung während EUREC[h]4[h]A.  
 HAFTMANN, Lena: Erprobung einer neuen Methode zur Bestimmung mineralischer Eiskeime.  
 HARTMANN, Ralf: Boundary Layer Aerosol and Ice Formation.  
 HORN, Christian: Untersuchung der räumlichen Struktur von simulierten konvektiven Ereignissen über Deutschland.  
 KELLERMANN, Mona Sophia: Examining aerosol properties during an Arctic Haze event in Ny-Ålesund (Svalbard) using tethered balloon and ground based measurements.  
 LANGE, Charlotte: Derivation of particle size and liquid water fraction of Arctic snow surfaces from airborne measurements.  
 ROGGISCH, Lena: Relevance of anthropogenic Aerosol for fog occurrence and intensity.  
 STALLMACH, Anja Kathrin: Analysis of the meteorological situation during the pyroCb outbreaks of the Australian New Year Wildfire 2019/20.  
 THEMEL, Pauline: Welchen Einfluss haben Aerosole von Vulkanausbrüchen und Waldbränden auf das Auftreten von Zirruswolken?  
 URBAN, Jonas: Charakterisierung des Kronendurchlass und durchfallenden Niederschlags unter verschiedenen Baumarten.  
 SÜHRIG, Anna: Einfluss des Lockdowns im Frühjahr 2020 auf die Luftqualität in Deutschland.  
 WITTIG, Johanna Marie: Einfluss von Pollen auf die Niederschlagshäufigkeit von Mischphasenwolken.  
 WOLFRAM, Michelle Sophie: Bestimmung der Wolkenbasishöhe mit unterschiedlichen Methoden.

*Masterarbeiten*

AL HAJJAR, Mohammed Khaled: Dynamics of Arctic Oscillation in Aerosol Forcing Scenario: Implication to Lapse Rate Feedback.  
 BADER, Nico: Can Convective Initiation provide Indicators for Convective Severity?  
 GAST, Benedikt: Implementation of a fluorescence channel in a multiwavelength lidar system to measure biological particles in the atmosphere.  
 HAMANN, Thies: Modulation of air quality extremes due to vegetation in CMIP6 climate models.  
 HIRCHE, Pascal: Assessment of the uncer-

tainties of microwave radiometer retrievals based on soundings or Era5 model data by means of sensitivity studies.

- HOFFMANN, Rasmus: Particle deliquescence in a turbulent humidity field.
- KÄPPLINGER, Hannah: Simulation of rapid adjustments to aerosol-radiation interactions over land with ICON.
- KRAUTWIG, Thomas Martin: Influence of macromolecular composition of pollen grains on their ice nucleation potential.
- LÖBEL, Sophie: Biological ice nuclei in air and rainwater samples: studies on ice nucleating potential, macromolecular composition and morphology.
- ROSCHKE, Johanna: Towards discriminating between Drizzle or rain and sea salt in CloudNet for measurements over the Barbados Cloud Observatory.
- SEIDEL, Johanna: Is secondary ice production as consequence of collisions between supercooled droplets and ice particles a relevant process? – A laboratory investigation.
- THOBÖLL, Jakob: Potential of extinction-based retrievals for in situ measurements of liquid water content in arctic boundary layer clouds.
- WEIKERT, Hanna: Non-Parametric Supervised Machine Learning for Classification and Analysis of Simulated Cloud Distributions.

#### *Dissertationen*

- CHOUDHURY, Goutam: Cloud condensation nuclei concentrations from spaceborne lidar measurements – Methodology and validation.
- FAUST, Matthias: Modelling of Dust Emissions from Agricultural Sources in Europe.
- KRÜGER, Ovid Oktavian: Sources, spatio-temporal variation and co-variability of cloud condensation nuclei and black carbon.
- LOCHMANN, Moritz: Improving wind power predictions on very short-term scales by including wind speed observations in the power forecast.
- OHNEISER, Kevin: Lidar Observations of Record-breaking Stratospheric Wildfire Smoke Events in 2019-2021: Siberian Smoke over the Central Arctic and Australian Smoke over South America.
- TATZELT, Christian: Cloud Condensation Nuclei and Ice-Nucleating Particles over the Southern Ocean: Abundance and Properties during the Antarctic Circumnavigation Expedition.
- TZALLAS, Vasileios: Development and

applications of a cloud regime dataset over Europe using satellite observations.

---

#### Universität Mainz

---

#### *Bachelorarbeiten*

- BREINER, Jan Bosco: Automatische Erkennung des Wolkenbedeckungsgrades mit Hilfe von Webcambildern.
- DAMMERMANN, Lena: The Relationship between Wave Activity and Zonal Wind – Linear Regression Analysis.
- HERDT, Lisa-Katharina: Charakterisierung eines Ozonsensors für TPChange.
- HEY, Franz Moritz: Experimentelles Bestimmen der Verteilungskoeffizienten wässriger Malonsäurelösungen.
- JOST, Sina: Charakterisierung eines thermischen Anemometers zur Bestimmung der Durchflussraten durch einen passiv durchströmten optischen Partikeldetektor für Ballonsondierungen.
- JULIEN, Cédric: Bestimmung der Mischungsschicht-Höhe aus Ceilometer-Daten.
- REISCHMANN, Lucas: Validation of a MAX-DOAS instrument-based cloud classification algorithm.
- SCHITTHOF, Jana: Temperaturverteilung und Strahlstrom über Eurasien und Europa.
- SCHUH, Helena Zoe: Fractal Characteristics of Ice-Supersaturated Regions in the Tropopause Region.
- SCHULZ, Gina Valerie: Ozone trends in the upper troposphere and lower stratosphere from Hohenpeissenberg ozonesonde data.
- ZANGER, Florian: Herstellung, Charakterisierung und aerodynamische Eigenschaften von Graupel.

#### *Masterarbeiten*

- BASTANI, Elaheh: Detection of clouds by infrared measurements from the ground.
- BÜTTNER, Maximilian Alexander: Characterization of the laboratory version of the Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer with respect to aircraft operation.
- JESKE, Adrienne: Simulationen zu konvektivem Spurenstofftransport.
- RIAZ, Jahanzaib: Seasonal and interhemispheric differences of the transport in Extratropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere.
- WEYLAND, Franziska Maria: Ozone trends in the upper troposphere and lower stratosphere in observations and reanalysis data.

#### *Dissertationen*

- GROOT, Edward: An analysis of variability of organised deep convection and its divergent upper tropospheric outflow.
- KAISER, Katharina: Chemical Composition and transformation of submicron aerosol particles in the outflow of major population centres.

---

#### Universität München

---

#### *Bachelorarbeiten*

- BERNLOCHNER, Selina: Determination of Cloud Droplet size Distributions Using the Rainbow Fourier Transformation and Application to specMACS Measurements.
- GRIEME, Sebastian: Development and Implementation of a Convection Scheme for Use in One-Dimensional Radiative Convective Equilibrium Models.
- HUMER-HAGER, Julian: Verteilung von konvektiven Niederschlagszellen um München anhand einer 10-Jahres-Datenreihe von Wetterradardaten.
- KUESTNER, Philipp: Diagnostics to Distinguish Different Flavours in Baroclinic-Wave Life-Cycle Experiments.
- LEWIS, Joseph: Parameterizations of the Spatial Distribution of Diffuse Irradiance on the Ground for Cloudy Atmospheres.
- MUEHLEISEN, Ramona: Assessing the Impact of Oriented Ice Crystals in Ice Water Clouds on Earthshine Observations using Monte Carlo Simulations.
- WEHRUM, Cedric: Relevance of Polarized Reflection at Land Surfaces for the Interpretation of Earthshine Observations.
- VON HEYDEBRAND und DER LASA, Hannah: Interannual Ozon Variability in the Northern Hemisphere from Coupled Chemistry-Climate Models.
- ZIEMANN, Melanie: Exposure Studies for Different Everyday Situations.

#### *Masterarbeiten*

- BAUER, Julian: Understanding and Evaluating Clouds in Climate Models of Different Resolution.
- DAMATO, Sandro: Aspects of the Interannual Variability of the Polar Summer Circulation.
- ERDTMANN, Dennys: Remote sensing of arctic cirrus microphysics using hyperspectral reflectivity measurements and polarized imaging.
- GOETZ, Anna: Quantitative Classification of Atmospheric Circulation Regimes of Terrestrial Planets.

KÜHNE, Jens: Comparison of in Situ Measurements of Atmospheric Pollutants Using a Glider-Airplane with Measurements of a MAX-DOAS Spectrometer.

PARI, Orsolya: Retrieval of Cloud Properties Using Spectropolarimetric Simulations of Earthshine.

SAKELLARIOU, Felicitas: Assessing Soot Emission Reductions of Sustainable Aviation Fuel during the Airborne Research Campaign of the DLR Project ECLIF3.

SCHABEL, Julia: Differences in Microphysics of High Latitude Cirrus from Mid- or High Latitude Air Masses.

SESSELMANN, Maximilian: Studying Eddy Development in Double-Jet Configurations of Idealized Baroclinic-Wave Life-Cycle Experiments.

SIRBESCU, Marco: Troposphärische Signale vor und nach plötzlichen Stratosphären-erwärmungen in Langzeit-Ensemble-Vorhersagen.

SPERBER, Dario: Tropospheric Signatures Preceding and Following Sudden Stratospheric Warmings in Extended-Range Ensemble Forecasts.

TE WINKEL, Amber: Simulations of Entrapment and Mixing in a Convection Cloud Chamber.

UBELE, Alma: Consideration of the Radiative Impact of Complex Sloped Topography in Cartesian Model Grids.

VOLKMER, Lea: Validation of Cloud Top Height and Droplet Size Retrievals Using Simulated Observations of Polarized Radiance.

*Dissertationen*

BICKEL, Marius: Climate Impact of Contrail Cirrus.

GÖDDE, Felix: Predicting Short-term Solar Irradiance Variability combining Numerical Weather Prediction and Machine Learning.

GREGOR, Philipp: Short-term irradiance nowcasting based on camera and satellite images.

KILIAN, Markus: Sources of tropospheric ozone over Europe and East Asia.

KÖCHER, Gregor: Convective Cloud Microphysical Parameterizations in a Numerical Weather Prediction Model – An Evaluation with Polarimetric Radar Observations.

REICHEGGER, Andreas: Synergy of Radar, Lidar and Infrared Spectrometry to Retrieve Microphysical and Radiative Properties of Cirrus Clouds.

TEMPEST, Kirsten: Sampling uncertainty in ensemble forecasting: When do we have

enough ensemble members?

WOLF, Jennifer: Charakterisierung von Verschmutzungsaerosolen bezüglich der mikrophysikalischen Eigenschaften in Europa und Asien während der EMERGe-Kampagne.

*Habilitation*

GROSS, Silke: Characterizing aerosols and their effect on clouds.

---

Technische Universität München

---

*Bachelorarbeiten*

BLERSCH, Mara: Von der Konzeption bis zur praktischen Anwendung: Entwicklung und Evaluierung eines Klimarucksacks .

GRUBER, Fiona: Spätfrostsensitivität von Zukunftsbaumarten – Untersuchung der Schadwirkung von Frost auf 24 nicht-heimische Baumarten.

KAINDL, Amelie: Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Frühjahrsphänologie von alternativen Baumarten bei unterschiedlicher Kältebehandlung.

MORAD, Adella: Einfluss von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Mikroklima und Pflanzenwachstum: Eine Literaturrecherche.

MÜHLBAUER, Teresa: Analyse herbstphänologischer Beobachtungen von 38 sommergrünen Baumarten im Weltwald Freising.

WEGMANN, Alexander: Analyse des Einflusses meteorologischer Bedingungen im Tagesverlauf auf das Verhalten von Rehkitzen in Bezug auf die Wahl von Liegeplätzen mit Hilfe des Klima-Rucksacks im Studiengebiet Oettingen.

*Masterarbeiten*

CARRASCO PUGA, Gabriela: Land Use – Groundwater Link in the Chilean Mediterranean Climate.

NÜRRENBACH, Jens: Three-Dimensional Modelling of Incident Solar Radiation to Predict the Temperature Effect of Tree Shade on Exterior Building Walls.

RADWAN, Mohamed: Recent and future risks for late spring frost in Bavaria.

SCHWINDL, Michael: Investigating the frost risk of tree species with different life strategies and phenological stages using a simulated late frost event.

TOLBAS, Hakan: Kartierung und Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Waldbrandrisiko in der Provinz Izmir, Türkei. Ein GIS-basierter Ansatz.

---

Universität Trier

---

*Bachelorarbeiten*

FROST, A.: Atmosphärische Antriebe für die Bildung von Meereis-Rinnen in der Antarktis.

RASIC, M.: Der Einfluss der Arktischen Oszillation auf die Eisrinnenbildung im Beaufort-Wirbel.

*Masterarbeit*

MICHELS, M.: Model-based analysis of low-level jets in the Arctic during MOSAiC.

*Dissertation*

ZENTEK, Rolf: Regional climate simulations in the Weddell Sea region (Antarctic): Verifications and evaluation of low-level jets.

---

Universität Wien

---

*Bachelorarbeiten*

DOMENIG, Jakob: Extracting forced warming signals from daily temperature patterns across different scales.

HAJEK, Stephan: Analyse eines Fehlers in der Definition der Hitzemetrik Cumulative Heat.

HIRT, Carolin: Meridionaler Wärmetransport im subpolaren Nordatlantik.

HÖCHTL, Valentina: Is it possible to detect CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from North American wildfires at the Sonnblick Observatory?

KRAINER, Diana: Bifacial module performance during radiative enforcement.

PRASCH, Laura: Evaluierung modelierter Schwefelhexafluorid-Konzentrationen anhand von Flugzeugmesskampagnen.

SCHUHBAUER, David: Tägliche Niederschlagsvariabilität in der Sahelzone in Simulationen mit expliziter und parametrisierter Konvektion.

SPLECHTNA, Paul: Identification and characterization of cloud objects using connected component labelling in nextGEMS cycle 3 ICON simulations.

*Masterarbeiten*

BAUER, Clemens: Alpinmeteorologische Effekte ausgelöst durch eine Hügellandschaft wie den Wienerwald.

HAHOFER, Judith: Case study on the identification of air traffic emissions in ice clouds during the Atmospheric Tomography (ATom) Mission.

HASLEHNER, Kerstin: Cloud Radiative Effects of High-Level-Clouds an their

Impact on Climate.

- JUNG, Lukas: High-resolution state estimation using Doppler Wind Lidar observations and WRF nudging.
- MALONE, Ethan: Measuring hydrogeologic properties of unconsolidated sediments in unsaturated and saturated conditions using nuclear magnetic resonance.
- RUBEL, Marcus: Energy transport in the atmosphere during an extreme event.
- SALMI, Michele: Verification of the Lightning Potential Index (LPI) in the COSMO-D2 ensemble prediction system.

---

*Dissertation*

- MAYER, Johannes: Diagnosed evolution of ocean surface energy fluxes in a warming climate.

---

Universität Würzburg

---

*Bachelorarbeit*

- BÖTSCH, Florian: Ein Zielartenkonzept für die Bayerische Rhön vor dem Hintergrund des regionalen Klimawandels.

*Masterarbeiten*

- HEIL, Johanna: Analyse der saisonalen Veränderungen des nordatlantischen Jetstreams zwischen 1940 und 2022.
- GEBHARD, Jasmin: Impact of heat stress on health in European cities.

*Dissertation*

- KEUPP, Luzia: Hochaufgelöste Erfassung zukünftiger Klimarisiken für Land- und Forstwirtschaft in Unterfranken.

---

ETH Zürich

---

*Dissertationen*

- BESSENBACHER, Verena: Data Science for Integrating Complex Earth Observations.
- CHTIRKOVA, Boriana: Decadal-scale internal variability of the shortwave flux components within Earth's energy balance.
- CUI, Ruoyi: Severe Convective Storms Over the Alpine-Adriatic Region in Kilometer-Scale Climate Simulations.
- ENZ, Bernhard: The Dynamical Tropopause Location as a Predictor for North Atlantic Tropical Cyclone Activity.
- HARTMUTH, Katharina: Arctic extreme seasons in a changing climate. HEIM, Christoph Edgar: Simulation of Tropical Marine Clouds in Kilometer-Resolution Atmospheric Models.

HEIM, Christoph Edgar: Simulation of Tropical Marine Clouds in Kilometer-Resolution Atmospheric Models.

- HEITMANN, Katharina: Characteristics and Impacts of Warm Conveyor Belts in Present-Day and Future Climate.
- HERMANN, Mauro: A seasonal weather perspective on forest vitality, vapor pressure deficit, and Greenland melt in a warming climate
- JANSING, Lukas: A Lagrangian perspective on the Alpine Foehn.
- KLEIN, Liviana: Virus Transmission in Respiratory Aerosol: The Roles of Trace Gas Uptake, Ion Diffusivity, Viscosity, and pH.
- LI, Guangyu: Determining the Abundance, Variability, Sources and Predictability of Ice Nucleating Particles in the Arctic.
- LIU, Shuchang: Understanding Cloud Feedbacks Over the Tropical and Sub-Tropical Atlantic Through Bias-Corrected Downscaling.
- MAYER, Stephanie: Impact of climate warming on future snow avalanche activity in the Swiss Alps.
- NATH, Shruti: Exploring the role of monthly earth system model emulators: Application areas and use cases.
- PROSKE, Ulrike: Simplifying the cloud microphysics and aerosol representation of a global aerosol climate model.
- ROEBROEK, Caspar Tobias Johannes: Exploring the limits of forest carbon storage for climate change mitigation.
- TULLY, Colin: Cirrus Climate Intervention: Sensitivity analysis of aerosol-ice-cloud interactions.
- WU, Rachel Wai-Ying: How predictable are sudden stratospheric warmings?
- ZEDER, Joel: Quantifying the intensity and frequency of very rare climate extremes in a changing climate.

---

Fachhochschule Zürich

---

*Bachelorarbeiten*

- MERZ, Jannis und FRANCONI, Darion: The Role of Seiches and Weather Phenomena in Cold-Air Pool Dynamics: A Case Study at Lake Sämtis.
- CHEDA, Arno: Interactions between valley wind and katabatic flow in the Fieschertal region.

---

Nachträge für das Jahr 2022

---

Universität Bonn

---

*Bachelorarbeit*

- MÜSELER, Vincent: Risikoanalyse für richtungsabhängige Windextreme für das Bonner Seilbahn-Projekt anhand von COSMO-REA6 Daten.

*Dissertationen*

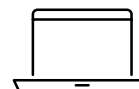
- LANGGUTH, Michael: Representation of deep convection at gray-zone resolutions – implementing and testing the HYbrid MASS flux Convection Scheme (HYMACS) in the ICON model.
- MA, Yueling: Machine learning for monitoring groundwater resources over Europe.

**Kontakt**


TANJA GLATZ  
Deutscher Wetterdienst  
Deutsche Meteorologische Bibliothek  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
tanja.glatz@dwd.de



# Print oder Digital?



Die Zeiten werden digitaler – auch **promet**? Ihre Meinung ist uns wichtig und wir laden Sie ein, an einer kurzen Umfrage teilzunehmen:

▶  QR-Code abschnappen und Online-Umfrage ausfüllen unter [www.survey-xact.de/LinkCollector?key=FKTZUYN7UNCK](http://www.survey-xact.de/LinkCollector?key=FKTZUYN7UNCK)

oder

▶ Diesen Zettel ausgefüllt per Post zurücksenden an: Redaktion „**promet**“, Deutscher Wetterdienst, Bildungszentrum, Am DFS-Campus 4, 63225 Langen

## Welche Form der Veröffentlichung bevorzugen Sie?

- Gedruckte Version
- Elektronische Version als PDF
- Beides
- Keine Angabe

## Haben Sie Anregungen oder Wünsche?

.....

.....

.....

.....

## Ich bin

- DWD-Mitarbeiter/Mitarbeiterin
  - FE
  - KU
  - WV
  - PB
  - TI
  - P/STB
- tätig an einer Universität/  
Forschungseinrichtung
- Student/Studentin
- im Ruhestand
- Sonstiges, nämlich  
.....
- Keine Angabe

## Ich beziehe das gedruckte Heft über

- den Deutschen Wetterdienst (DWD)
- die Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG)
- die Österreichische Gesellschaft für Meteorologie (ÖGM)
- die Schweizerische Gesellschaft für Meteorologie (SGM)
- die Bundeswehr
- die MeteoSchweiz
- einen anderen Weg, nämlich  
.....

Umfrage bis 31. Januar 2025

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!  
(Alle Daten werden anonym behandelt)





## **promet** **Vorschau auf die nächsten Hefte**

- Vorhersagbarkeit
- Treibhausgase – Beobachtungssysteme und Modellierung
- Das Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung (HErZ)

