



Schlussbericht (Teil II – Ausführlicher Bericht)  
des Teilprojekts

**Kombination von Radar- und Richtfunkdaten zur  
Niederschlagsmessung für die Hochwasserfrühwarnung**

des Verbundprojekts

**Hochwasserfrühwarnung für kleine Einzugsgebiete mit  
innovativen Methoden der Niederschlagsmessung und –  
vorhersage (HoWa-innovativ)**

Antragsteller: Universität Augsburg  
Alter Postweg 118  
86159 Augsburg

Ausführende Stelle: Universität Augsburg - Fakultät für Angewandte Informatik - Institut  
für Geographie - Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie

Teilprojektleiter: Prof. Dr. Harald Kunstmann

Förderkennzeichen: 13N14826

Laufzeit des Vorhabens: 1.8.2018 – 31.10.2021

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14826 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## 1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundprojekts „HoWa-innovativ“ war der Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie für das Teilvorhaben „Kombination von Radar- und Richtfunkdaten zur Niederschlagsmessung für die Hochwasserfrühwarnung“ zuständig. Übergeordnetes Ziel war die Verbesserung einer echtzeitfähigen Niederschlagsmessung für die Anwendung in der Hochwasservorhersage durch die Projektpartner. Das Teilvorhaben war in zwei Arbeitspakete aufgeteilt.

AP1 „Online-Niederschlagsmessung mit CMLs“ hatte zum Ziel die Prozessierung der Dämpfungsdaten der Richtfunkstrecken (CMLs) zu verbessern und in eine kontinuierliche Prozessierungskette zu integrieren. Für eine detaillierte Validierung war der Aufbau von Pluviometern direkt unter den CMLs in den Fokuseinzugsgebieten in Sachsen geplant. AP1 war in folgende Teil-APs unterteilt.

- AP1.1: Aufbau Pluviometer
- AP1.2: Robustere Echtzeit-CML-Prozessierung und Interpolation
- AP1.3: Implementierung kontinuierliche CML-Prozessierungskette
- AP1.4: Testbetrieb und Validierung kontinuierliche CML-Prozessierung

AP2 „Radar-Aneichung mittels CML-Daten“ hatte zum Ziel eine echtzeitfähige Kombination von Wetterradar- und CML-Daten mittels einer Erweiterung des RADOLAN-Verfahrens zu entwickeln und diese dann mit den CML-Daten aus AP1 kontinuierlich durchzuführen. AP2 war in folgende Teil-APs unterteilt:

- AP2.1: Offline RADOLAN-CML-Aneichung
- AP2.2: Schnittstellendefinition beim DWD
- AP2.3: Implementierung kontinuierliche RADOLAN-CML-Aneichung
- AP2.4: Testbetrieb und Validierung kontinuierliche RADOLAN-CML-Aneichung

## 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt

Basierend auf der Kooperation des Lehrstuhls für Regionales Klima und Hydrologie von Prof. Kunstmann mit dessen AG Regionales Klima und Hydrologie am KIT waren zu Projektbeginn CML-Daten und einfache CML-Prozessierungsmethoden verfügbar. Beim assoziierten Partner DWD, der in AP2 eingebunden war, wurde über mehrere Jahre das RADOLAN-Verfahren entwickelt und kontinuierliche für die Aneichung von Radar- mit Stationsdaten betrieben. Expertise und Dokumentation zum RADOLAN-Verfahren war daher gegeben. Sowohl die vorhandenen CML-Prozessierungsmethoden, also auch das RADOLAN-Verfahren stellten zu Projektbeginn den aktuellen wissenschaftlichen Stand der Technik dar.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitspakete und Meilensteine wurden entsprechend des Teilprojektantrages fast vollständig abgearbeitet, auch wenn während der Projektlaufzeit einige Anpassungen an den Arbeitsplänen nötig waren.

In AP1 wurden zusammen mit den Projektpartnern erfolgreich drei Fokuseinzugsgebiete in Sachsen identifiziert und an 12 Standorten, direkt unter den Pfaden von CMLs, mit jeweils drei redundanten Pluviometern versehen. Die Pluviometer wurden dann über den Projektzeitraum hinweg zusammen mit den Partnern der TU Dresden betrieben und gewartet. Für die CML-Datenprozessierung wurde ein adaptives Verfahren, das sich an das Rauschlevel der Zeitreihen anpasst, entwickelt und deutschlandweit erfolgreich validiert. In Synergie mit einem am KIT ansässigen Teilprojekt der DFG Forschergruppe RealPEP wurde die Prozessierung mittels eines neu entwickelten Deep Learning Verfahrens weiter verbessert. Alle Verfahren wurden in der open-source CML-Toolbox pycomlink integriert. Ein Testbetrieb für die Echtzeitanwendung wurde wie geplant aufgesetzt und testweise kontinuierlich betrieben.

In AP2 wurde im engen Austausch mit dem assoziierten Partner DWD das RADOLAN-Verfahren, für das nur eine schwer modifizierbare C++-Version vorliegt, in Python neu implementiert. Basierend darauf wurde das Verfahren erweitert um die pfadgemittelte Niederschlagsinformation der CMLs verarbeiten zu können und damit eine zusätzliche Radaraneichung durchführen zu können. Parallel dazu wurden die Schnittstellen zu den Stations-, Radar- und CML-Daten beim DWD fixiert und implementiert. Hier war insbesondere die einfache und schnelle Transformation der Radar-Daten zwischen verschiedenen Dateiformaten wichtig. Das neue RADOLAN-CML Aneichverfahren wurde für die Jahre 2018 und 2019 angewandt. Die Auswertung zeigte den Vorteil einer zusätzlichen Aneichung mit CMLs, insbesondere in Regionen die entfernt von den existierenden DWD-Aneichstationen liegen. Für eine kontinuierliche Prozessierung wurde der Echtzeit-Bezug von Radar- und Stationsdaten auf einem DWD-Server eingerichtet und damit eine RADOLAN-Aneichung mit der neu entwickelten Python-Software aufgesetzt. Die geplante kontinuierliche zusätzliche Aneichung mit CML konnte wegen Problemen mit der Robustheit des CML-Datenflusses nicht realisiert werden.

Der Grund für die Probleme des CML-Datentransfers lag im historisch gewachsenen Prozess der Datenübertragung über viele verschiedene Server hinweg. Hinzu kam der Totalverlust der Echtzeit-CML-Datenbank im Sommer 2020, die wegen pandemiebedingter Überlastung der zuständigen Stellen, nur mit starker Verzögerung neu aufgesetzt und aus dem Archiv befüllt werden konnte. Dies führte dazu das ein kontinuierlicher robuster CML-Datentransfer zum DWD nicht realisiert werden konnte und die RADOLAN-CML Aneichung nur retrospektiv evaluiert werden konnte.

## 4 Wesentliche Ergebnisse

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens für die beiden bearbeiteten Arbeitspakete AP1 und AP2 aufgeführt.

### 4.1 AP1 Online-Niederschlagsmessung mit CMLs

#### 4.1.1 Mehrjährige Messreihen von dediziertem Pluviometermessnetz direkt unter CMLs

Die installierten Pluviometer an den 12 Standorten in Sachsen haben über den Projektzeitraum hinweg, bis auf wenige Ausnahmen, stabil Daten geliefert. Mit Hilfe einer automatisierten Kombinationsmethode die Messfehler und -ausfälle erkennt (<https://github.com/cchwala/cologaugue>) wurden die Daten der drei Pluviometer je Standort kombiniert (siehe Abb. 1). Mit Hilfe dieser Daten wurde die Niederschlagsschätzung der CMLs lokal validiert. Außerdem wurden die Daten vom Projektpartner TU Dresden auch direkt als Antrieb für die entwickelten hydrologische Modell verwendet. Aktuell werden die Daten im DFG Projekt SpraiLINK weiter genutzt um ein neues Korrekturverfahren für den „wet antenna effect“ bei der CML-Niederschlagsmessung zu entwickeln.

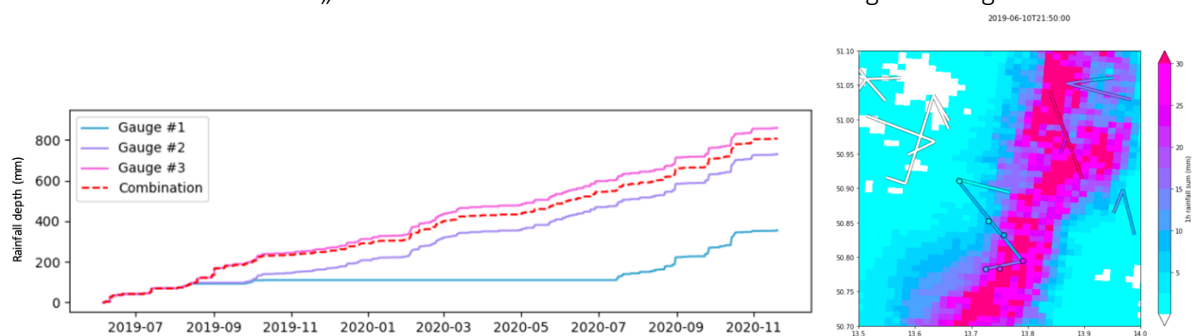


Abb. 1: (links) Beispielhafter Vergleich der akkumulierten Niederschlagsdaten für drei redundante Pluviometer und deren automatische Kombination nach Detektion von Messfehlern und -ausfällen. (rechts) Beispielhafter Vergleich der stündlichen Niederschlagssumme von Pluviometern (Kreise), CMLs (Linie) und RADOLAN-RW (Kacheln).

#### 4.1.2 Neue adaptive CML-Prozessierungsmethode zur Detektion von Regenereignissen

Einer der wichtigsten Schritte bei der Niederschlagsmessung mit CML-Daten ist die Detektion von Niederschlagsereignissen in den verrauschten und artefaktbehafteten CML-Rohdaten. Hierfür wurde

ein adaptives Verfahren entwickelt das sich dem Rausch-Niveau der einzelnen CML-Zeitreihen anpasst. In Kooperation mit einer am KIT angesiedelten Doktorarbeit im Projekt DigitalEarth wurde die Methode für den deutschlandweiten CML-Datensatz mit 4000 CMLs über ein gesamtes Jahr angewandt und ausgewertet (Graf et al., 2020). Die Ergebnisse konnten zeigen, dass die CML-Niederschlagsmessung eine ähnliche Qualität wie RADOLAN-RW hat, wenn direkt entlang der CMLs (CML-based) ausgewertet wird. Bei der Auswertung auf Kartenbasis (Map-based) zeigt sich eine Unterschätzung der CML-basierten Niederschlagskarten. Grund dafür ist die räumliche Interpolation die zur Erstellung der Karten aus den CML-Linienmessungen notwendig ist. Kleinräumige Niederschlagspeaks, die in Regionen mit niedriger CML-Dichte oft nicht voll von den CMLs erfasst werden, werden in den interpolierten Niederschlagskarten unterschätzt. Im aktuell laufenden DFG Projekt SpraiLINK wird, basierend auf den hier gezeigten Ergebnissen, daran gearbeitet die Erstellung von Niederschlagskarten aus CML-Daten mit stochastischen Methoden zu verbessern.

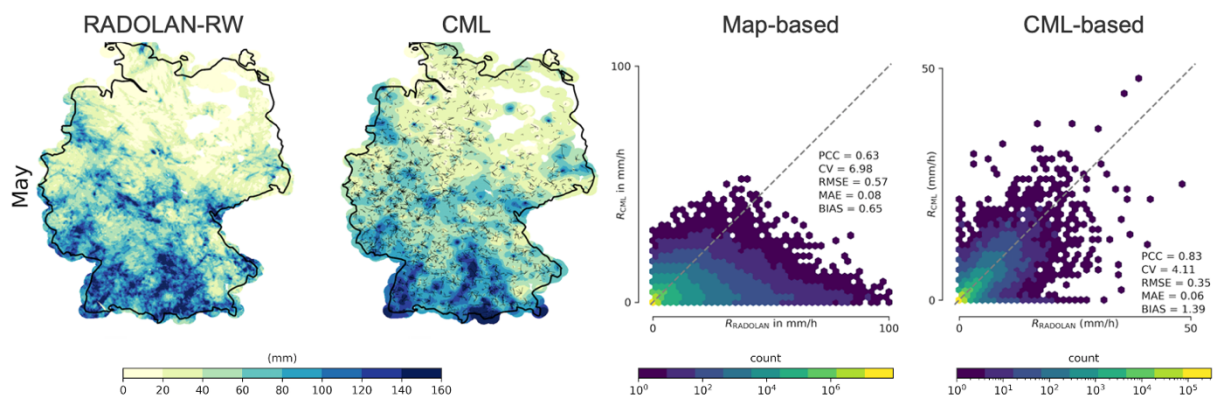


Abb. 2: Vergleich der monatlichen Niederschlagsdaten von CMLs und RADOLAN-RW, aus Graf et al. (2020).

#### 4.1.3 Deep Learning CML-Prozessierungsmethode zur Detektion von Regenerereignissen

Da die Detektion von Regenerereignissen einen solch wichtigen Schritt bei der Niederschlagsmessung mit CMLs darstellt wurde in Kooperation mit HoWa im Rahmen einer am KIT angesiedelten Doktorarbeit der DFG Forschergruppe RealPEP an einer zusätzlichen Verbesserung geforscht. In diesem Fall kamen dafür Methoden des Deep Learning zum Einsatz. Es wurde eine Zeitreihen-Mustererkennung mittels Convolutional Neural Networks (CNN) entwickelt und für eine Sommersaison ausgewertet (Polz et al., 2020). Die Ergebnisse konnte eine klare Steigerung der Detektionsperformance, basierend auf dem Matthews-Correlatoin-Coefficient (MCC), zeigen, siehe in Abb. 3. Durch die verbesserte Detektionsperformance konnte die Menge an Niederschlag durch falsch-positive Detektion um über 50% reduziert werden. Die neu entwickelten CML-Prozessierungsmethoden wurden in die open-source CML-Toolbox <https://github.com/pycomlink/pycomlink> integriert.

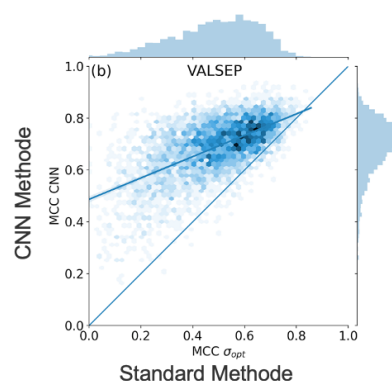


Abb. 3: Vergleich des Matthews-Correlation-Coefficients (MCC) für die wet-dry Klassifikation der Standard CML-Prozessierungsmethode mit der neu entwickelten CNN-Methode, aus Polz et al. (2020).

#### 4.1.4 Echtzeit CML-Prozessierungssystem und Visualisierung

Alle CML-Prozessierungsschritte, inkl. der oben erwähnten Neuentwicklungen, wurden in ein echtzeitfähige kontinuierliches Prozessierungssystem integriert. Das Gesamtsystem wurde testweise kontinuierlich betrieben und mittels eines dynamischen Web-interfaces auf mehreren Konferenzen (z.B. Meteorologen-Tagung DACH2019) live vorgestellt.

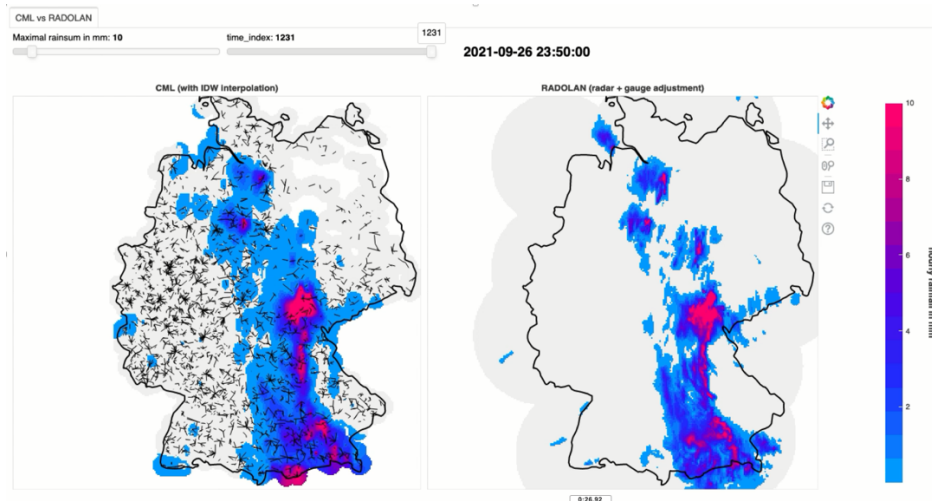


Abb. 4: Beispielhafter Screenshot des prototypischen Web-Interfaces zur Visualisierung der Echtzeit-CML-Prozessierung, live vorgestellt auf der DACH Tagung 2019 (Siehe List der Vorträge in Kapitel 10)

## 4.2 AP2 Radar-Aneichung mittels CML-Daten

### 4.2.1 Neuimplementierung des RADOLAN-Verfahrens im Softwarepaket pyRADOLAN in Python

Für die Integration von CML-Daten in das RADOLAN-Verfahren war eine fundamentale Erweiterung des Verfahrens notwendig, da die pfadgemittelte CML-Niederschlagsmessungen nicht mit den existierenden Methoden verarbeitet werden konnten. Da der vorhandene Quellcode des RADOLAN-Verfahrens in C++ zu kompliziert und starr für eine schnelle und dynamische Weiterentwicklung war, wurde das Verfahren durch den Projektmitarbeiter der Universität Augsburg mit fachlicher Unterstützung des assoziierten Partners DWD in Python als Paket pyRADOLAN nachimplementiert. Hierbei war auch wichtig die Laufzeit der Prozessierung in Python möglichst gering zu halten um eine später Anwendung in Echtzeit zu ermöglichen. Dies wurde erreicht. Zur Verifizierung der Korrektheit der Neuimplementierung pyRADOLAN wurde eine Vergleichsstudie über mehrere Monate durchgeführt. Für RADOLAN-RW (stündliche Aneichung von Radar- mit Stationsdaten) zeigte die Version die mit pyRADOLAN erstellt wurde eine sehr hohe Übereinstimmung mit der Version die mit der DWD-eigenen Software erstellt wurde, siehe Abbildung 5. Kleine Abweichungen rühren von minimalen Unterschieden in der exakten Implementierung, z.B. der Interpolation der Aneichgewichte oder der unterschiedlichen Anzahl an Glättungsläufen vor der Aneichung.

Basierend auf pyRADOLAN wurde separater Quellcode für die RADOLAN-CML-Aneichung entwickelt, der pfadgemittelte Niederschlagsmessungen bei der Aneichung nutzen kann. Dieser Code wurde für die Auswertung der RADOLAN-CML Aneichung genutzt (siehe Punkt 4.2.3) aber aus Zeitmangel nicht final in pyRADOLAN integriert.

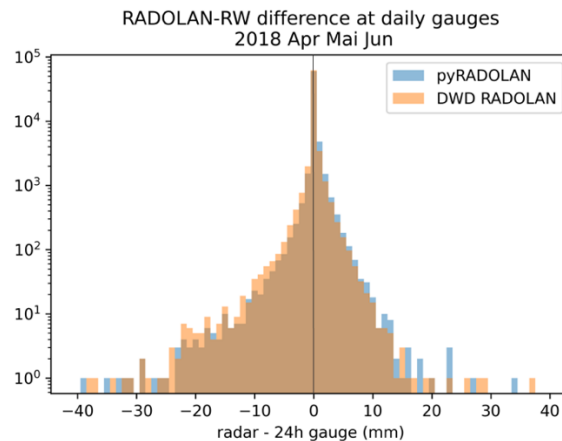


Abb. 5: Vergleich des RADOLAN-RW Produkts (stündliche Aneichung von Radar- mit Stationsdaten) prozessiert mit der existierenden DWD-RADOLAN-Software (orange Balken) und der Neuimplementierung pyRADOLAN (blaue Balken).

#### 4.2.2 Dateiformatkonverter zwischen DWD-binär-Format und NetCDF

Sowohl die existierende RADOLAN-Software des DWD als auch die hydrologischen Vorhersagesysteme beim Projektpartner Landeshochwasserzentrum (LHWZ) Sachsen nutzen das RADOLAN-Binärformat für die RADOLAN-Produkte. Für eine performante und flexible Arbeit mit den notwendigen großen Datenmengen haben standardisierte Dateiformate aus den Geowissenschaften wie, z.B. NetCDF, jedoch große Vorteile und können von Python aus auch leicht genutzt werden. Daher wurde ein Dateiformatkonverter entwickelt der schnell und konsistent in beide Richtungen zwischen NetCDF und RADOALN-Binärformat transformieren kann. So war es möglich mit pyRADOLAN direkt an die Daten des DWD-Radararchivs anzudocken, intern Daten in NetCDF-Archiven abzulegen, und die prozessierten RADOALN Produkte wieder für die Partner im RADOLAN-Binärformat bereitzustellen. Der Code des Dateiformatkonverters ist open-source und unter [https://github.com/cchwala/radolan\\_to\\_netcdf](https://github.com/cchwala/radolan_to_netcdf) verfügbar; er ist auch für andere DWD Radarprodukte, z.B. die Radarklimatologie RADKLIM-YW, nutzbar.

#### 4.2.3 RADOLAN-CML Aneichung für das Jahr 2018 und 2019

Mit dem entwickelten RADOLAN-CML Code wurde basierend auf Radar-, Stations- und CML-Daten für die Jahre 2018 und 2019 ein RADOLAN-RW (Radar + DWD-Pluviometer) und RADOLAN-RW-CML (Radar + DWD-Pluviometer + CML) erstellt. Wegen der großen Datenmengen war eine Parallelisierung der Prozessierung notwendig um schnell Ergebnisse zu erhalten. Da bei der RADOLAN-Aneichung jeder Zeitschritt separat behandelt werden kann, konnte dies über die Python-Schnittstelle `dask` erzielt werden, die die einzelnen Zeitschritte auf den CPUs des genutzten DWD-Servers verteilt und parallel behandelt. Die Laufzeit betrug so nur 30 Minuten für einen Monat Prozessierung und erlaubte damit auch die mehrfache Iteration des verwendeten Quellcodes.

Die Validierung der Ergebnisse wurde mit den manuellen DWD-Niederschlagsmessstationen durchgeführt die nur Tagesdaten liefern und nicht in die stündliche Radar-Aneichung eingehen. Diese Auswertung konnte zeigen, dass die zusätzliche Aneichung mit CMLs insbesondere in Regionen die entfernt von den existierenden DWD-Aneichstationen liegen, von Vorteil ist. Je nach CML-Dichte und Nähe der CMLs zu den manuellen DWD-Niederschlagsmessstationen können die Abweichungen des Radar-Niederschlagsprodukts zum Teil signifikant gesenkt werden, siehe die Visualisierung der Differenzen in Abbildung 6.

Ein ähnliches Bild zeigt die Auswertung über längere Zeiträume hinweg, siehe Abbildung 7. Die Streuung der Wertepaar Radarniederschlagsfeld-vs-Tagesstationsdaten wird durch die CMLs in der Aneichung reduziert. Insbesondere erhöht sich die Zahl der Wertepaare mit einer Abweichung nahe Null.

Es verbleiben jedoch bisher noch nicht untersuchte lokale Fälle bei denen die Korrektur durch die Aneichung nicht zum gewünschten, von den manuellen Messstationen vorgegebenen, Ergebnis führt. Aus AP1 ist bekannt, dass trotz großer Fortschritte bei der CML-Prozessierung, immer noch einzelne CMLs und einzelne Zeitperiode durch erratische Signalfluktuationen falsche Niederschlagsinformation produzieren. Für die zukünftige Anwendung der RADOLAN-CML Aneichung ist daher die Nutzung der



Radars-Daten zur zusätzlichen Qualitätssicherung der CML-Daten, z.B. zur Unterscheidung zwischen trockenen und regnerischen Perioden in den CML-Zeitreihen, geplant. Außerdem ist eine Plausibilitätsprüfung der Referenzdaten, hier von den manuellen Tagesniederschlagsmessstationen, in Fällen von auffälliger Abweichung angeraten.

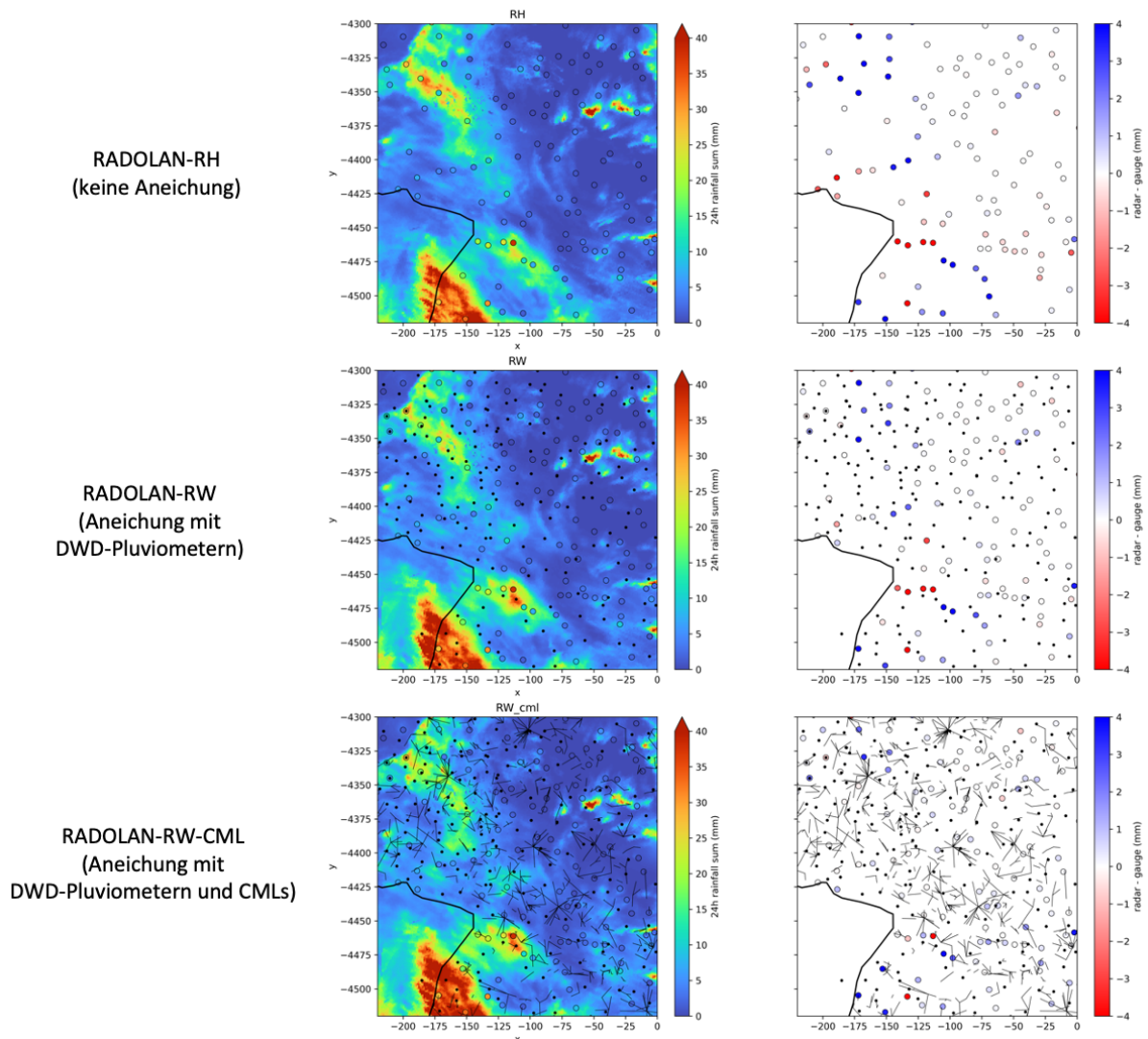


Abb. 6: Vergleich von RADOLAN-RH, RADOLAN-RW und RADOLAN-RW-CML in der Region um Karlsruhe für Tagesniederschlagssummen am 10. Mai 2018. Die Karten links zeigen die verschiedenen RADOLAN-Niederschlagsfelder. Die eingefärbten Punkte sind unabhängige Tages-Niederschlagsmessstationen. Die schwarzen Punkte und Linien sind automatische DWD-Pluviometer und CMLs die in die Aneichung eingehen. Die Karten rechts zeigen die Abweichung der RADOLAN-Niederschlagsfelder an den unabhängigen Niederschlagsmessstationen mit Tagesdaten.

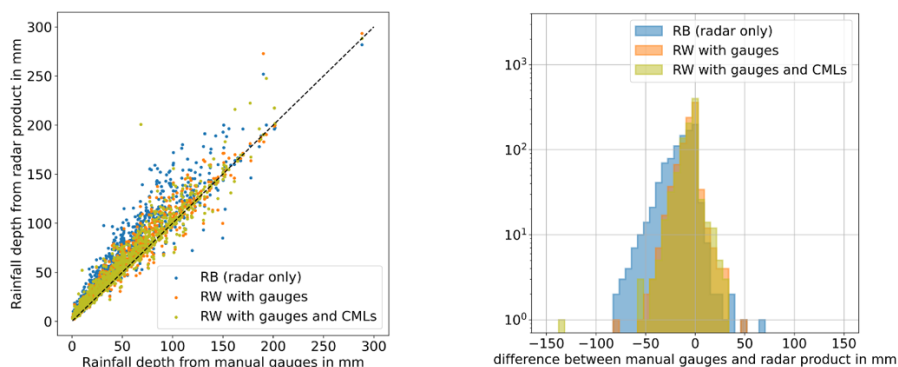


Abb. 7: Vergleich von RADOLAN-RH, RADOLAN-RW und RADOLAN-RW-CML mit den unabhängigen manuellen Niederschlagsmessstationen für einen Monat. Man beachte die logarithmische Skala der y-Achse im Histogramm.

#### **4.2.4 Kontinuierliche RADOLAN-Aneicherung mit eigenem Workflow mittels pyRADOLAN**

Mit dem Ziel die neu entwickelte Software für die RADOLAN-Aneicherung kontinuierlich in Echtzeit zu betreiben wurde ein automatisierter Bezug von Radar- und Stationsdaten auf einem DWD-Server eingerichtet. Dort wurde dann eine stündliche Prozessierung mit pyRADOLAN konfiguriert. Dieses System ist seitdem kontinuierlich im Einsatz und produziert eine eigene Version von RADOLAN-RW die auch für die Partner über einen Testkanal des standardisierten DWD-Datenverteiler-Systems verfügbar gemacht wurde und immer noch wird. Die geplante kontinuierliche zusätzliche Aneicherung mit CML konnte wegen Problemen mit der Robustheit des CML-Datenflusses nicht realisiert werden. Um dieses Problem zu lösen soll im Nachfolgeprojekt HoWa-PRO zusammen mit Ericsson eine direkt CML-Datenanbindung des DWD erfolgen.

#### **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen des Verbundprojekts fand eine enge Zusammenarbeit mit allen beteiligten Verbundpartnern statt. Zusammen mit der Landeshochwasserzentrale und der TU Dresden wurden wie geplant die Fokuseinzugsgebiete identifiziert und die notwendigen Arbeiten im Feld durchgeführt. Ebenso wurde wie geplant eine Evaluierung der neuen Niederschlagsprodukte durch die Projektpartner durchgeführt. Der Austausch mit dem assoziierten Partner DWD war in AP2 sehr eng und erfolgreich. Alle Arbeiten zu AP2 konnte remote und direkt auf Servern des DWD durchgeführt werden. Mit dem assoziierten Partner Ericsson wurde weiter an der Steigerung der Robustheit der CML-Datenerfassung und des CML-Datentransfers gearbeitet.

#### **6 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der zahlenmäßige Nachweis umfasste im Wesentlichen die Kostenpositionen Personal und Reisen und wurde bereits im April 2022 separat versandt.

#### **7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Das Projekt verlief entlang der im Projektantrag formulierten Planung; die gesetzten Ziele konnten, mit Ausnahme der kontinuierlichen RADOLAN-CML-Aneicherung beim DWD, mit Hilfe der beantragten Mittel erreicht werden. Absolut notwendig und grundlegend für den Erfolg diese Teilprojekts war die Entwicklungsarbeit zur Robustheit und Echtzeitfähigkeit der CML-Datenprozessierung in AP1, die im Rahmen von HoWa-innovativ durchgeführt wurde. Ebenso absolut notwendig und grundlegend war die in AP2 geplante Entwicklungsarbeit für die komplette Neuimplementierung des RADOLAN-Verfahrens in Python, ohne die keine schnelle Erweiterung mit einer Radar-CML-Aneicherung möglich gewesen wäre. In AP2 waren auch die eingeplanten Arbeitstreffen beim assoziierten Partner DWD essenziell für den Projektfortschritt.

Der angestrebte und umgesetzte modulare und strukturierte Aufbau der entwickelten Softwarekomponenten (pycomlink, pyRADOLAN, radolan\_to\_netcdf) bot während der Projektlaufzeit eine solide Grundlage für die durchgeführten Analysen. Dieser Aufbau schafft aber darüber hinaus die Basis für Weiterentwicklungen in anderen Projekten der Universität Augsburg und auch neue Möglichkeiten für den DWD (siehe Verwertung in Kapitel 8).

Die aus dem Projekt hervorgegangenen Publikationen und die während des Projekts erfolgten Konferenzbeiträge, insbesondere der eingeladene Vortrag des Projektwissenschaftlers Dr. Christian Chwala bei der 13. Klimatagung des DWD (siehe Liste von Vorträgen in Kapitel 10), zeigen, dass die geplanten Forschungsansätze und die erzielten Ergebnisse einen hohen wissenschaftlichen Anspruch erfüllen. Das große Medienecho auf die beiden CML-Publikationen (Graf et al., 2020 und Polz et al., 2020) hat darüber hinaus die Forschungsarbeiten einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht.



## 8 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Bei der Beurteilung des Nutzens und der Verwertbarkeit der Ergebnisse unterscheiden wir zwischen technisch-wissenschaftlichen und strategischen Aspekten.

Technisch-wissenschaftlicher Nutzen und Verwertbarkeit:

- CML-Datenprozessierung: Die entwickelten Methoden für die CML-Datenprozessierung sind in vielerlei Hinsicht nützlich, da sie in alle laufenden und zukünftigen Projekte mit CML-Daten eingehen und dort zu Steigerung der Datenqualität beitragen.
- Datenfusion von CMLs und anderen Niederschlagsmessungen: Für Länder mit operationellem Wetterradar Netzwerk ist die Kombination von CML- und Radar Daten die logischste Anwendung von CML-Daten. Die Entwicklungen von RADOLAN-CML und die Präsentation der erzielten Ergebnisse haben daher schon das Interesse der meteorologischen Dienste anderer europäischer Länder geweckt.
- NetCDF Datenkonverter: Der entwickelte Konverter zwischen RADOLAN-Binärformat und NetCDF hat auch über HoWa-innovativ hinaus bei anderen Forschungsprojekten die mit großen Radar-Datenmengen arbeiten gute Dienste geleistet und wird dies weiterhin tun.
- Parallele Prozessierung großer Datenmengen: Um die großen anfallenden Datenmengen bei der RADOLAN-CML Prozessierung zu bewältigen und eine schnelle Iteration bei der Entwicklung von Prozessierungsmethoden zu erlauben wurden Workflows entwickelt um mit minimalem Aufwand auf einer Vielzahl von CPUs parallel Arbeiten zu können. Diese Workflows können synergetischen in vielen weiteren Forschungsprojekten mit großen Datenmengen genutzt werden.

Strategischer Nutzen und Verwertbarkeit:

- Kooperation mit DWD: Die enge Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner DWD hat nicht nur wichtige fachliche Einblicke in die Radarniederschlagserfassung geben, sondern auch das Wissen und Verständnis bzgl. der Herausforderungen der operationellen hydrometeorologischen Warnung gestärkt. Darauf aufbauend ergeben sich neue Projektideen.
- Nachfolgeprojekt HoWa-PRO (BMBF, beantragt): Die Kooperation in HoWa-innovativ und die hervorragende gemeinsame Forschungsleistung hatte zum Ergebnis, dass die Einreichung des Nachfolgeprojekts HoWa-PRO im Rahmen der Fördermaßnahme „Innovationen im Einsatz – Praxisleuchttürme der zivilen Sicherheit“ befürwortet wurde.
- HiPOSy (DFG, beantragt): Basierende auf den deutschlandweiten CML-Daten-Auswertung ist in einem neu eingereichten Projekt geplant Niederschlagsinformation in Kombination mit PWS-Daten weiter zu verbessern.
- RESEAD (HELMHOLTZ AI, bewilligt): Zum Thema Datenqualitätssicherung, wie es in HoWa-innovativ zum ersten Mal umfassend für CML-Daten bearbeitet wurde, ist aktuell ein neues Projekt bewilligt worden.
- EU COST Action OPENSENSE: Die deutschlandweiten CML-Datenanalysen und die RADOLAN-CML Aneicherung haben die Sichtbarkeit der Arbeitsgruppe international stark erhöht. In der im Jahr 2021 gestarteten COST Action OPENSENSE, die sich unter anderem mit der Niederschlagsmessung mittels CML-Daten beschäftigt ist der ehemalige HoWa-innovativ Projektwissenschaftler Dr. Christian Chwala führend für die softwaretechnische Zusammenführung verschiedener Prozessierungsmethoden zuständig.

## 9 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Die Anzahl an Ländern in denen CML-Daten zur Niederschlagserfassung genutzt werden steigt weiterhin an. Neuste Ergebnisse gibt es aus Sri Lanka, Italien, Australien, Nigeria, Kenia und Burkina Faso. Methodisch wurde vor allem an der Verbesserung der Korrektur der *wet antenna attenuation* gearbeitet, aber auch an der Frage z.B. nach der besten räumlichen Rekonstruktion von Niederschlagsfeldern aus CML-Daten. Im Bereich der Kombination von Radar- und CML-Daten sind keine methodischen Neuerungen veröffentlicht worden. Die meteorologischen Dienste von Frankreich

und Schweden arbeiten aber, ähnlich wie der DWD in HoWa-innovativ und im Nachfolgeprojekt HoWa-PRO, in Richtung einer operationellen Anwendung von CML-Daten zur Radar-Aneichung.

## 10 Veröffentlichung der Ergebnisse

### Publikationen in Fachzeitschriften

Graf, M., C. Chwala and J. Polz: Regenmessung im Mobilfunknetz – Opportunistische Erfassung meteorologischer Größen. Physik in unserer Zeit 52(2), <https://doi.org/10.1002/piuz.202001602>, 2021

Chwala, C. and H. Kunstmann: Landesweite Niederschlagsmessung mit Richtfunkstrecken des Handynetzes. Wasserwirtschaft 10/2020.

Polz, J., C. Chwala, M. Graf and H. Kunstmann: Rain event detection in commercial microwave link attenuation data using convolutional neural networks. Atmospheric Measurement Techniques, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3835-2020>, 2020

Graf, M., C. Chwala, J. Polz and H. Kunstmann: Rainfall estimation from a German-wide commercial microwave link network: Optimized processing and validation for one year of data. Hydrol. Earth Syst. Sci., <https://doi.org/10.5194/hess-24-2931-2020>, 2020

### Veröffentlichter Code

Chwala, C. and J. Polz: cchwala/radolan\_to\_netcdf. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4452204>, 2021

Chwala, C., Polz, J., Graf, M., Sereb., D., Blettner, N., Keis, F. and Y., Boose: pycomlink/pycomlink: v0.3.2 (0.3.2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4810169>, 2021

### Vorträge bei Konferenzen

Chwala, C.: Echtzeit-Niederschlagsmessung mit Richtfunkstrecken und Wetterradar. Thementag „Beyond the Wave“ des Kompetenzzentrums Digitale Wasserwirtschaft, online, 9. Nov 2021.

Chwala, C., T. Winterrath, M. Graf, J. Polz and H. Kunstmann: Country-wide CML rainfall estimation and CML-Radar combination in Germany, EMS Annual Meeting 2021, online, 6–10 Sep 2021, EMS2021-499, 2021

Chwala, C., M. Graf, J. Polz, S. Rothermel, L. Glawion, T. Winterrath, G. Smiatek and H. Kunstmann: Recent improvements of CML rainfall estimation and CML-Radar combination in Germany. EGU General Assembly, 2021

Chwala, C., T. Winterrath, G. Smiatek, M. Graf, J. Polz and H. Kunstmann: A country-wide combination of CML and radar data in Germany using the RADOLAN approach. 11<sup>th</sup> European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Locarno, Switzerland, 2020.

Chwala, C., G. Smiatek, M. Graf, J. Polz, T. Winterrath and H. Kunstmann: Current and future rainfall estimation in Germany: Improved data processing, real-time rainfall maps and fusion with weather radar data. EGU General Assembly, 2020.

Polz, J., C. Chwala, M. Graf and H. Kunstmann: Big commercial microwave link data: Detecting rain events with deep learning. EGU General Assembly, 2020.

Chwala, C., M. Graf, J. Polz, C. Hald and C. Moroder: Deutschlandweite Niederschlagsabschätzung auf Basis von Richtfunk-Daten: Gestern, Heute und Morgen. 13. Klimatagung »Starkregen – von der Messung zur Prävention«, DWD, Offenbach, 2019.

Graf, M., C. Chwala and H. Kunstmann: Performance analysis of more than one year of countrywide rainfall derived from commercial microwave link data in Germany. EGU General Assembly, 2019

Chwala, C., Winterrath, T., Graf, M., Smiatek, G., & Kunstmann, H.: Deutschlandweite Niederschlagsmessung mit kommerziellen Richtfunkstrecken: Herausforderungen der Echtzeitprozessierung und zukünftige Kombination mit Radarmessungen, In Meteorologentagung DACH, Garmisch-Partenkirchen, Germany. 2019

## Poster bei Konferenzen

Polz, J., C. Chwala, M. Graf and H. Kunstmann: Pros and cons of weather radars as a rainfall reference data set for commercial microwave links. 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD) 2020, Locarno.

Graf, M., C. Chwala, J. Polz and H. Kunstmann: How to evaluate rainfall estimation performance? A discussion of metrics, thresholds and aggregations for one year of country-wide CML rainfall estimation. EGU General Assembly 2020

Chwala, C., G. Smiatek, M. Graf, J. Polz and H. Kunstmann: Real-time acquisition and processing of data from a country-wide network of commercial microwave links in Germany: Current status and challenges. EGU General Assembly 2019, Vienna.

Graf, M., C. Chwala und H. Kunstmann: Evaluierung und Analyse von Fehlerquellen für die deutschlandweite Niederschlagsmessung mit kommerziellen Richtfunkstrecken. DACH-Tagung 2019, Garmisch-Partenkirchen