

Opportunistische Erfassung meteorologischer Größen

Regenmessung im Mobilfunknetz

MAXIMILIAN GRAF | JULIUS POLZ | CHRISTIAN CHWALA

Die möglichst genaue Erfassung von Niederschlag stellt die Forschung durch seine raumzeitliche Variabilität vor Herausforderungen. Seit Kurzem können Daten des Mobilfunknetzes zur deutschlandweiten opportunistischen Erfassung des Niederschlags genutzt werden.



Abb. 1 Funkmast mit diversen Richtfunkantennen (Foto: C. Ruf, KIT).

Niederschlag beeinflusst unser Handeln auf vielen Ebenen, egal ob wir vor dem Spaziergang aus dem Fenster schauen, den Ertrag einer Ernte analysieren oder die Kanalisation einer Stadt planen: Immer stellen wir uns die Fragen: Hat es geregnet? Wenn ja, wie viel? Wird es in Zukunft mehr regnen oder weniger? Im Zuge des Klimawandels geht die Tendenz in Richtung Extreme. Aktuelle Beispiele wie die Dürresommer in Deutschland oder die massiven Überschwemmungen im Sudan im Herbst 2020 zeigen die Auswirkungen von zu wenig oder zu viel Niederschlag. Niederschlagsreiche Regionen erhalten noch mehr, trockene Regionen noch weniger Niederschlag [1].

Um Fragen im Zusammenhang mit Regen beantworten zu können, benötigt die Wissenschaft eine möglichst solide Datengrundlage. In Deutschland betreiben der Deutsche Wetterdienst (DWD) und diverse Landesämter ein Niederschlagsmessnetz aus Wetterradaren und Niederschlagstöpfen, sogenannten Pluviometern. Dieses Netzwerk ist im globalen Vergleich sehr dicht ausgebaut und kann doch die raumzeitliche Variabilität von Niederschlag nicht gänzlich darstellen. Die Gründe hierfür liegen in den spezifischen Nachteilen der jeweiligen Messmethode.

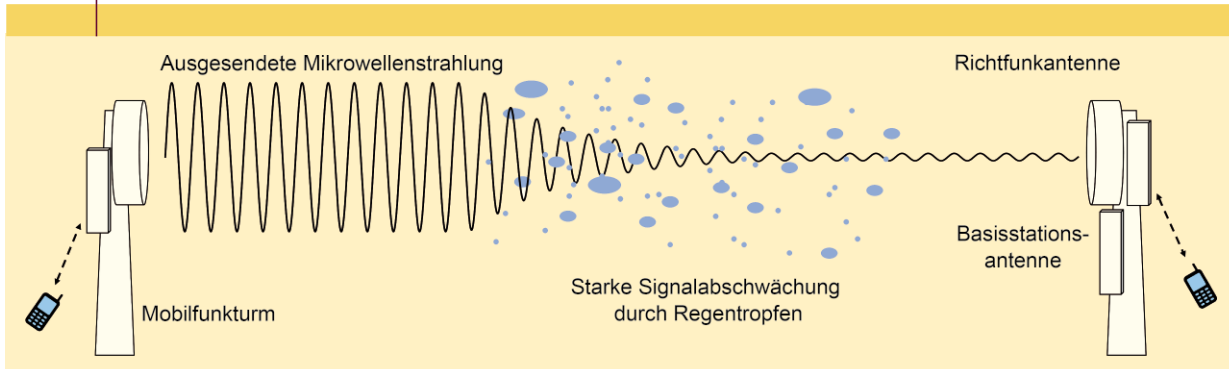
Bei der traditionellen Messung wird mit Pluviometern über eine Kippwaage die Niederschlagsmenge auf einer definierten Fläche ermittelt. Während Messfehler beispielsweise durch Wind, Schnee oder Verdunstung auftreten können, ist der größte Nachteil dieser Methode jedoch die fehlende räumliche Repräsentativität.

Wetterradare hingegen bieten eine räumlich und zeitlich gut aufgelöste Niederschlagsmessung, die 17 Wetterradare des DWD decken Deutschland mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu fünf Minuten ab. Für die Niederschlagsmessung muss von der gemessenen Radarreflektivität Z an Wassertropfen auf die Regenrate R geschlossen werden. Diese Z - R -Beziehung ist nichtlinear und stark abhängig von der Tropfengrößenverteilung. Da diese Verteilung bei der Messung unbekannt ist, führt das zu einer signifikanten Unsicherheit der Methode. Weitere Probleme ergeben sich durch die Messung in bis zu drei Kilometern Höhe, die nötig sein kann, um Abschattungseffekte und die Rückstreuung des Radarstrahls am Boden zu verringern.

Seit einigen Jahren wird die opportunistische Nutzung von Daten kommerzieller Richtfunkstrecken (Commercial Microwave Link, CML) des Mobilfunknetzes erforscht [2]. Dabei werden Daten, die nicht für die Erhebung von meteorologischen Variablen dediziert sind, als opportunistische Messungen bezeichnet. Beispiele sind neben der hier vorgestellten Richtfunkanwendung auch Temperatur- und Luftdruckmessungen mit Smartphones [3]. Abbildung 1 zeigt mehrere Richtfunkantennen an einem typischen Funkmast in Deutschland. Über die Dämpfung entlang des Richtfunkstrahls kann, wie in Abbildung 2 gezeigt, auf die Regenintensität entlang der Strecke geschlossen werden. Diese Methode bietet eine weitere Quelle für Niederschlagsinformationen, um die aktuelle Datengrundlage zu erweitern, zu verbessern und unabhängig validieren zu

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

ABB. 2 | RICHTFUNKSTRECKEN UND NIEDERSCHLAG



Viele Mobilfunktürme sind mit Richtfunkstrecken (CML) untereinander verbunden. Bei den typischerweise verwendeten Frequenzen von 15 GHz bis 80 GHz wird die ausgesendete Mikrowellenstrahlung stark von Regentropfen gedämpft. Aus der Messung dieser Dämpfung lässt sich dann auf die mittlere Regenrate entlang des Pfads rückschließen.

können. Ein entscheidender Vorteil liegt in der großen Anzahl potenziell nutzbarer CML, die beispielsweise laut Bundesnetzagentur in Deutschland bei circa 130000 liegt. In einer aktuellen Studie haben wir dieses Prinzip deutschlandweit über ein Jahr hinweg erprobt.

Auf der richtigen Wellenlänge

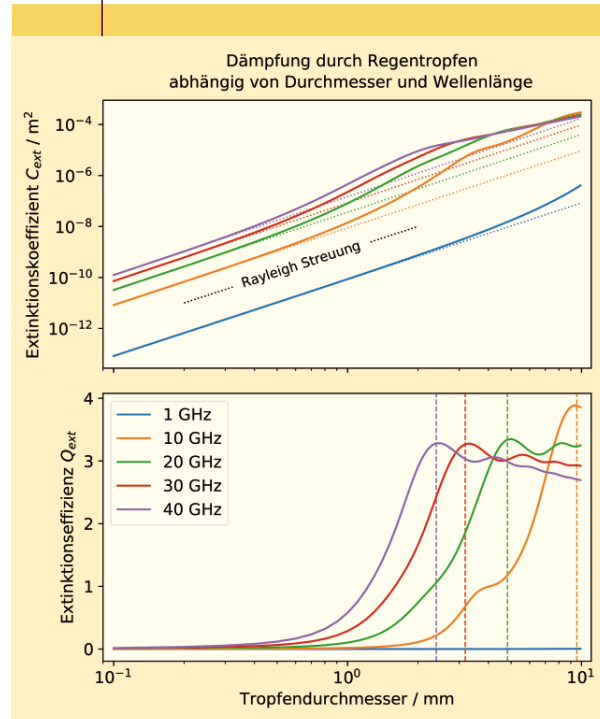
Anders als bei Radio- und Fernsehsendern nutzen Richtfunksysteme Wellen im Millimeterbereich, entsprechend Frequenzen von 15 GHz bis 80 GHz. Grund dafür ist einerseits, dass mit kleineren Wellenlängen auch kleinere Antennen bei gleichbleibender Richtcharakteristik verwendet werden können, was den Konstruktionsaufwand minimiert. Andererseits bieten kleinere Wellenlängen und damit höhere Frequenzen eine größere Bandbreite und damit höhere Datenübertragungsraten.

Als in den 1940er-Jahren die ersten Richtfunksysteme im Millimeterwellenbereich in Betrieb gingen, wurde schnell klar, dass Regen zu einer starken Signalabschwächung führt. Für die Planung und Auslegung eines Richtfunksystems ist dieser Effekt ärgerlich, da deswegen mit großen Reserven beim Empfangspegel geplant werden muss, um einen Betrieb während Regenperioden zu gewährleisten. Für hydrometeorologische Anwendungen ist es hingegen ein glücklicher Zufall, dass die verwendeten Richtfunkfrequenzen, insbesondere bei Frequenzen oberhalb von 10 GHz, so sensitiv auf Regen reagieren.

Physikalisch lässt sich dieser Effekt wie folgt erklären. Regentropfen haben Durchmesser von 0,1 bis 6 mm. Kleinere Tropfen fallen nicht als Regen zu Boden, größere Tropfen zerplatzen beim Fallen typischerweise wieder und teilen sich in kleinere auf. Für die Wechselwirkungen mit einer sich ausbreitenden elektromagnetischen Welle ist das Verhältnis von Wellenlänge und Durchmesser des Regentropfens entscheidend. Ist die Wellenlänge groß genug gegenüber dem Durchmesser eines solchen Streukörpers, kann die Interaktion von elektromagnetischer Strahlung mit dem Streukörper als Rayleigh-Streuung betrachtet werden. Sind Wellenlänge und Streukörper ähnlich groß, spricht

man von Mie-Streuung. Es kommt zu Resonanzeffekten, und der Extinktionskoeffizient C_{ext} , ein Maß für die dämpfende Wirkung des Streukörpers, steigt stark an (Abbildung 3). Die stärkste Resonanz tritt auf, wenn der Tropfen-

ABB. 3 | DÄMPFUNG DURCH REGENTROPFEN



Darstellung der dämpfenden Wirkung von Regentropfen, hier bei 10 °C und horizontaler Polarisation. Angegeben ist der volumenäquivalente Tropfendurchmesser der mit zunehmender Größe immer abgeflachter werdenden Regentropfen. Der Extinktionskoeffizient C_{ext} , ein Maß für die dämpfende Wirkung, weicht für höhere Frequenzen und große Tropfendurchmesser von der Rayleigh-Näherung (gepunktete Linie) ab. Die Extinktionseffizienz, die Normierung von C_{ext} mit dem geometrischen Querschnitt der Tropfen, zeigt den Resonanzeffekt der Mie-Streuung dort, wo der Tropfenumfang der Wellenlänge entspricht (gestrichelte Linie).

umfang gleich der Wellenlänge ist. Dies verdeutlicht die in Abbildung 3 gezeigte Extinktionseffizienz, die genau bei dieser Kombination aus Wellenlänge und Durchmesser ein lokales Maximum erreicht. Bei Frequenzen oberhalb von 10 GHz, also bei Wellenlängen kleiner als 3 cm, wie sie typischerweise bei modernen CML verwendet werden, fallen große Regentropfen demnach in den Bereich der Mie-Streuung, und der Beitrag zur Abschwächung nimmt überproportional zu. Das ist der Grund für den stark dämpfenden Effekt von Regen auf die Ausbreitung von Mikrowellenstrahlung.

Durch einen weiteren glücklichen Zufall lässt sich der Zusammenhang zwischen spezifischer Dämpfung k in dB/km und mittlerer Regenrate R in mm/h entlang eines Pfades gut durch ein fast lineares Potenzgesetz beschreiben (Abbildung 4) [4]. Dies hat den Vorteil, dass wegen der Linearität der Beziehung auch heterogen über die Strecke verteilte Niederschlagsintensität korrekt durch die integrierte Dämpfung entlang des Messpfades wiedergegeben wird. Der Grund für die fast lineare Relation zwischen k und R liegt im Zusammenhang beider Größen mit der Tropfengrößenverteilung von Regen in der Atmosphäre. Die Regenrate R

errechnet sich aus der Anzahl und dem Volumen der unterschiedlich großen Tropfen und deren Fallgeschwindigkeit. Die spezifische Dämpfung errechnet sich aus der Anzahl und dem Extinktionskoeffizienten C_{ext} (Abbildung 3) der unterschiedlich großen Tropfen. In beiden Fällen sind bei Frequenzen zwischen 15 GHz und 40 GHz die Beiträge pro Tropfendurchmesser sehr ähnlich. Die Strahlung von CML ist entweder horizontal oder vertikal polarisiert. Da Regentropfen beim Fallen nicht exakt rund, sondern oval sind, ändert sich die k - R -Beziehung je nach Polarisierung leicht. Außerdem ist die k - R -Relation im Vergleich zur Z - R -Relation beim Wetterradar unempfindlich gegenüber Schwankungen der unbekanntenen Tröpfchengrößenverteilung. Dies zeigt sich in der relativ geringen Streuung der Punkte in Abbildung 4.

Tausende zusätzliche Niederschlagssensoren

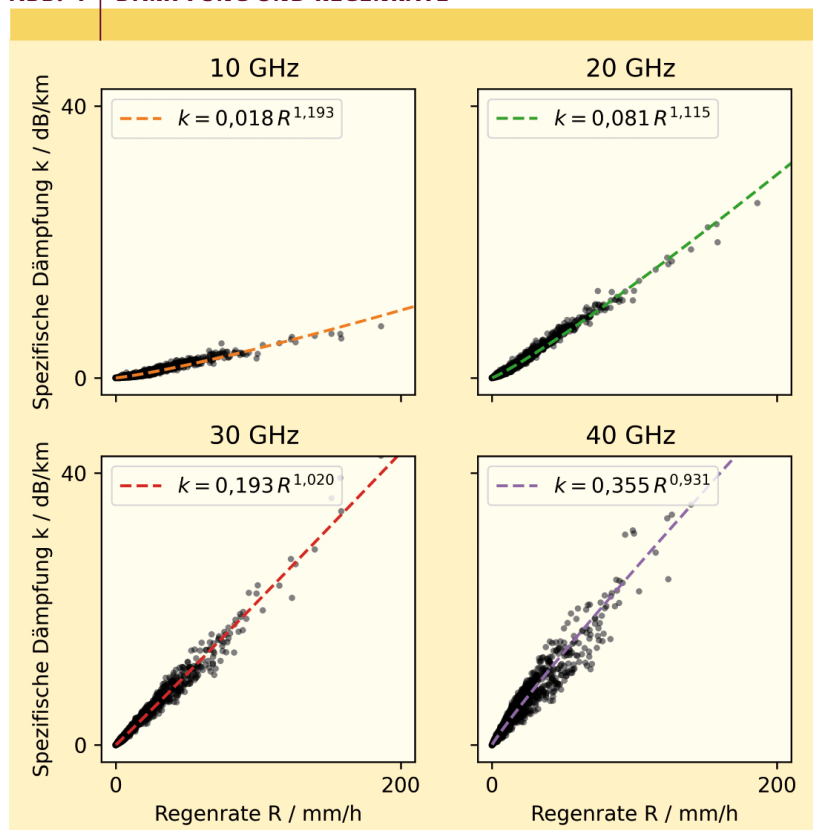
Im Zeitalter der Smartphones steigt die globale Abdeckung des Mobilfunknetzes immer weiter. Die meisten dicht besiedelten Regionen der Erde sind mittlerweile mobilfunktechnisch erschlossen, und trotz der vermehrten Nutzung von Glasfaserkabeln bilden CML nach wie vor eine kostengünstige Grundsäule der Kommunikationsinfrastruktur. Allein in Deutschland gibt es circa 130 000 CML verschiedener Netzbetreiber. Davon werden in Kooperation mit Ericsson aktuell circa 4000 CML am Campus Alpin des Karlsruher Instituts für Technologie zur Niederschlagsabschätzung verwendet. Abbildung 7 zeigt die Topologie dieses Teils des Richtfunknetzes über Deutschland. Die Unterschiede in der Dichte resultieren aus der vorläufigen Beschränkung unseres Projekts auf einen Hardwaretyp und einen Anbieter, nicht aus der allgemeinen Verteilung von CML in Deutschland. Die Dichte des CML-Netzes folgt grob der Bevölkerungsdichte [5].

Seit September 2017 werden einmal pro Minute die aktuellen Sende- und Empfangsleistungen dieser CML abgefragt und gespeichert [6]. Die Quantisierung der Empfangs- und Sendepiegel liegt beim verwendeten Hardwaretyp bei 0,3 und 1 dB. Diese Quantisierung hat Einfluss auf das untere Limit der Nachweisbarkeit von Niederschlag. Ein Großteil der 4000 CML arbeitet mit einer Frequenz zwischen 18 und 27 GHz bei einem mittleren Abstand der Antennen von drei bis sechs Kilometern, was bei der gegebenen Quantisierung zu einem Detektionslimit von circa 0,5 mm/h führt.

Aufwendige Prozessierung der Daten

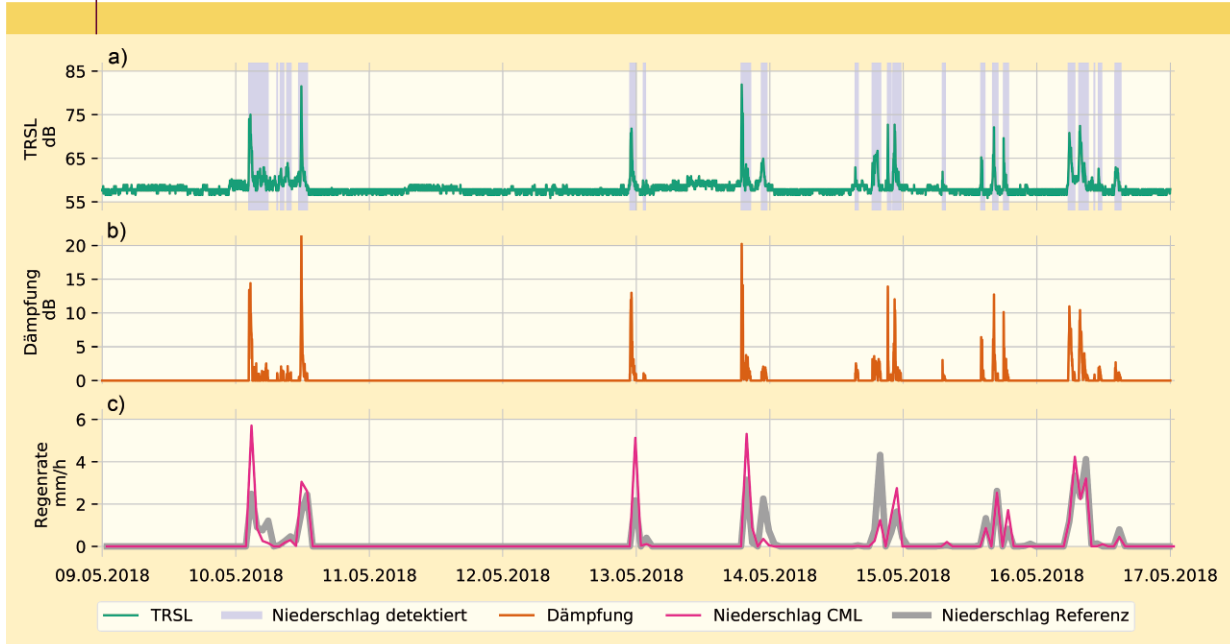
Trotz des günstig gelegenen Frequenzbereichs und der fast linearen Beziehung zwischen Dämpfung und Regenrate ist es nicht möglich, diese direkt aus der empfangenen Signalstärke abzuleiten. Eine aufwendige Prozessierung des rohen Signals ist notwendig, damit nur die durch Regen erzeugte Dämpfung zur Niederschlagsbestimmung eingeht. Die hierzu benötigten Signalprozessierungsschritte sind, in chronologischer Reihenfolge, das Bereinigen stark gestörter Signale, die Detektion von Regenperioden, das Festlegen eines

ABB. 4 | DÄMPFUNG UND REGENRATE



Darstellung der Relation zwischen spezifischer Dämpfung k in dB/km und der Regenrate R in mm/h. Die Werte für k und R sind aus den in situ gemessenen Tropfengrößenverteilungen berechnet. Ein Punkt entspricht der Messung über eine Minute. Insgesamt wurden Daten der Sommersaison 2011, 2012 und 2013 genutzt. Die gestrichelten Linien zeigen den Fit für die k - R -Relation. Die resultierenden Parameter sind in der Legende angegeben.

ABB. 5 | GEMESSENE ZEITREIHEN



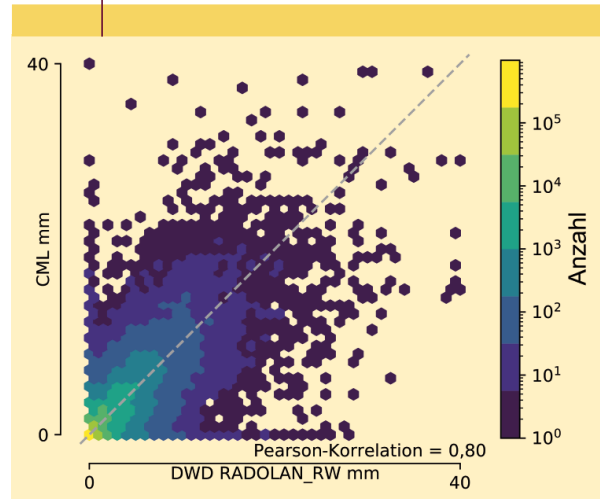
a) Unprozessierte Richtfunkdaten (TRSL) mit eingefärbten Zeitschritten für die mit Prozessierungsalgorithmen Niederschlag detektiert wurde, b) berechnete Dämpfung und c) die daraus resultierende Regenrate im Vergleich zum Radarprodukt RADOLAN-RW des Deutschen Wetterdienstes.

Referenzniveaus der Dämpfung ohne Regeneinfluss und die Korrektur von Dämpfung, die durch einen Wasserfilm auf den Antennen erzeugt wird. Im Folgenden wird auf jeden einzelnen Schritt genauer eingegangen.

Fluktuationen in der Signalstärke eines CML können nicht nur durch Regen entstehen. Auch Einwirkungen auf die Hardware durch Sonneneinstrahlung, Temperatur und Wind oder ein Mehrwegeempfang des Signals durch Reflexion im Gelände können sowohl negativ als auch positiv zur empfangenen Signalstärke beitragen. Durch die örtlich bedingte Exposition des Übertragungswegs und der Hardware ist nicht jeder CML gleich stark von diesen Einflüssen betroffen. Daher werden in einem ersten Schritt alle CML aus dem Messnetz entfernt, deren Signalfuktuationen deutlich häufiger als klimatologisch nachvollziehbar einen Schwellenwert überschreiten. Zusätzlich können einzelne CML vom Betreiber temporär oder auch gänzlich aus dem Netz entfernt werden. Durchschnittlich führt dies dazu, dass von knapp 4000 CML in einem Monat 4,6% nicht in die weitere Prozessierung eingehen [7].

Ausgangspunkt für die Berechnung der Regenrate ist die Differenz aus Sendeleistung (Transmitted minus Received Signal Level, TRSL), die in Abbildung 5a dargestellt ist. Um zu verhindern, dass weniger stark ausgeprägte Signalfuktuationen mit schwachen Niederschlagsereignissen verwechselt werden, werden im nächsten Schritt die Perioden im Signal detektiert, deren Fluktuationenmuster auf Niederschlag zurückzuführen sind. Diese Klassifizierung lässt sich durch einen Schwellenwert für die Standardabweichung des betrachteten Abschnitts in der TRSL-Zeit-

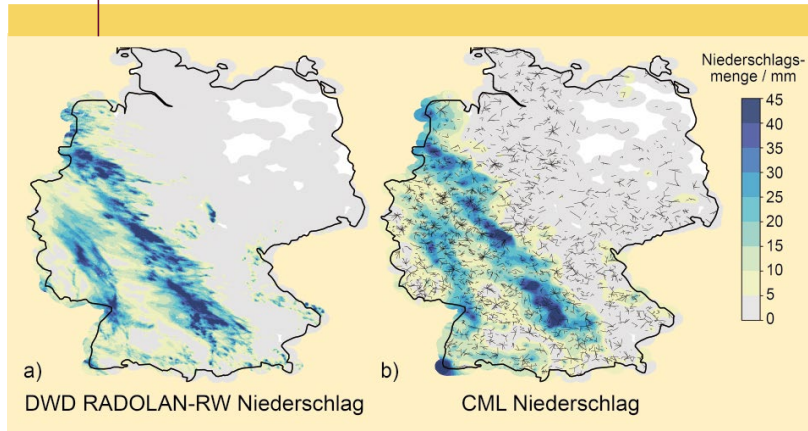
ABB. 6 | VERGLEICH RADOLAN UND CML



2D-Histogramm zwischen stündlichen Niederschlagswerten von RADOLAN-RW und CML für Juni, Juli und August 2018. Die farbige Codierung zeigt die Anzahl an Punkten innerhalb jedes Hexagons an.

reihe bereits effektiv erzielen [7, 8]. Sie dient als Maß für die Stärke der Fluktuationen in einem Zeitabschnitt. Im Gegensatz zu zufälligen Fluktuationen sind die durch Niederschlag erzeugten stark autokorreliert, und es entsteht ein typisches Muster, das bei gleicher Standardabweichung von einem geschulten Betrachter von anderen Fluktuationsursachen unterschieden werden kann. Um dies methodisch zu implementieren, ist das maschinelle Lernen ein vielver-

ABB. 7 | VERGLEICH RADOLAN UND CML IN DEUTSCHLAND



Über 48 Stunden akkumulierter Niederschlag von 12. bis 14. Mai 2018 von a) RADOLAN-RW-Produkt des Deutschen Wetterdienstes und b) CML interpoliert mit inverser Distanzwichung. Der grau hinterlegte Bereich markiert eine 30-km-Zone um jeden CML. Außerhalb dieses Bereichs wurde nicht interpoliert.

DEEP LEARNING ZUR ZEITREIHENKLASSIFIKATION

Maschinelles Lernen, das systematische Generieren von Wissen aus Erfahrung, ist seit langem eine Praxis, die in vielen wissenschaftlichen Bereichen ihre Anwendung findet (Physik in unserer Zeit 2019, 50(5), 220). Der Teilbereich Deep Learning hat in den letzten Jahren durch den Einsatz von Grafikprozessoren und die Verfügbarkeit von großen Datenmengen besonders vielversprechende Fortschritte erzielen können. Beim Deep Learning werden „tiefe“ künstliche neuronale Netze (Artificial Neural Network, ANN) trainiert, um spezifische Aufgaben wie Klassifikation, Regression oder Interpolation zu übernehmen. Mit der Zeit haben sich spezialisierte Netzwerkstrukturen entwickelt, wie Convolutional Neural Networks (CNN), die in ihrem Aufbau dem visuellen Kortex von Säugetieren nachempfunden sind.

Wir haben ein CNN verwendet, um in den CML-Zeitreihen die Perioden zu identifizieren, in denen ein Signal Informationen über Niederschlag enthält. Die Anwendung ist eine Klassifikationsaufgabe im traditionellen Sinn, denn das CNN soll einer herausgelösten Signalsequenz von einer Stunde Länge die richtige Prognose „Regen“ oder „kein Regen“ zuordnen, die dann mit einer stündlichen Referenz durch das Wetterradar abgeglichen werden kann. Dieser Prozessierungsschritt ist notwendig, um zu verhindern, dass andere Signalfunktua-

tionen fälschlich zu einer Niederschlagsüberschätzung beitragen.

ANN bestehen aus mehreren Schichten (Layer) von künstlichen Neuronen, die als Funktion mit einem variablen Gewicht verstanden werden können, in die das Ergebnis aller Neuronen des vorhergehenden Layers eingeht. So wird aus den eingehenden Daten sukzessive die relevante Information herausgefiltert, bis am Ende die reine Prognose einer Klassifizierung übrigbleibt. Durch den Abgleich mit der Referenz wird eine Kostenfunktion berechnet, die auch von den Gewichten abhängt. Diese Gewichte können nun iterativ über ein Gradientenverfahren optimiert werden, was den Trainingsprozess darstellt.

Das CNN hat zwei funktionell unterschiedliche Teile. Der erste Teil nutzt eine Sequenz von Faltungs- und Poolinglayern, um die Dimensionalität der Eingangsdaten zu reduzieren und relevante Merkmale herauszufiltern. Der zweite Teil besitzt einen klassischen Aufbau mit einfachen Neuronen und ist dafür zuständig, aufgrund der extrahierten Merkmale eine Klassifizierung zu vollziehen.

Das Ergebnis der Anwendung auf CML-Zeitreihen spricht für sich: Gegenüber der zuvor verwendeten Methode reduzierte sich die fälschlich berechnete Regenmenge um 51 %, wobei gleichzeitig mehr Regen detektiert wurde, der vorher unbemerkt blieb [9].

sprechender Ansatz (siehe „Deep Learning zur Zeitreihenklassifikation“, S. 92), der bereits Anwendung fand [9].

Für jedes so klassifizierte Regenereignis wird nun ein Referenzniveau der Dämpfung ohne Regeneinfluss definiert, die sogenannte Baseline, die während der Regenperiode von den Werten der TRSL-Zeitreihe abgezogen wird. Sie wird als konstant angenommen und ergibt sich aus dem letzten Wert des vorangegangenen trockenen Zeitraums. Zusätzlich muss Dämpfung kompensiert werden, die durch einen Wasserfilm auf den Antennen entsteht [10]. Übrig bleibt die durch Regen verursachte Dämpfung (Abbildung 5b), die im letzten Schritt über die k - R -Beziehung zur Regenrate (Abbildung 5c) umgerechnet wird. Durch diese Prozesskette wird sichergestellt, dass jeder CML eine möglichst robuste Niederschlagsmessung erzielt.

Eine Regenkarte für Deutschland

Um die Qualität des mit 4000 CML abgeschätzten Niederschlags zu bestimmen, wurden die Ergebnisse über den Zeitraum eines Jahres mit Referenzdaten verglichen [7]. Als Referenz diente RADOLAN-RW, ein Radar-basiertes, mit Pluviometern angeeichtes Niederschlagsprodukt des DWD. Die Übereinstimmung ist vor allem im Frühjahr, Sommer und Herbst sehr hoch. Einzelne Monate weisen Korrelationskoeffizienten von 0,8 und höher auf. Die Anzahl an verpassten oder falschen Niederschlagsereignissen, die in Abbildung 6 entlang der Achsen deutlich werden, konnten durch die Anwendung eines neuronalen Netzes stark reduziert werden (siehe „Deep Learning zur Zeitreihenklassifikation“). Insgesamt schlechtere Ergebnisse lieferten Wintermonate, in denen Schnee oder Schneeregen fiel. Trockener Schnee führt zu sehr geringer Dämpfung und kann daher nicht erfasst werden, wohingegen Schneeregen und Graupel zu einer extrem starken Dämpfung und damit deutlichen Überschätzung der Niederschlagsmenge führen.

Um aus den Regenraten der einzelnen CML deutschlandweite Regenkarten zu erstellen, können geostatistische Interpolationsverfahren wie die inverse Distanzwichung oder Kriging verwendet werden. Dabei werden Werte an Orten, für die keine Messung vorliegen, durch umliegende Messwerte interpoliert. Die knapp 4000 CML dienen als Stützstellen, die zu einer Kartendarstellung interpoliert werden können. Die großräumigen Strukturen sowie die Niederschlagsintensitäten werden, im Vergleich zu RADOLAN-RW, gut dargestellt, wobei die Unsicherheit mit Zunahme der Entfernung zu den Stützstellen wächst. Diese Ergebnisse zeigen, dass mit geeigneten robusten Algorithmen eine Abschätzung des Niederschlags mit CML sehr gut funktioniert, auch wenn nur ein Bruchteil der potenziell nutzbaren CML verwendet wird.

Großes Potenzial weltweit

Weil Radarniederschlagsprodukte wie RADOLAN-RW selbst nicht frei von Fehlern und Unsicherheiten sind, bietet sich eine Kombination von Radar, Pluviometer und CML an. So lassen sich bei geschickter Nutzung die jeweiligen Nach-

teile der einzelnen Messmethoden kompensieren. Aktuell entwickeln die Forscher des KIT zusammen mit dem DWD ein Verfahren, das die erfassten CML-Daten in Echtzeit mit den Daten des Radarnetzwerks kombiniert. Parallel wird an einer Erweiterung der CML-Datenerfassung inklusive Erhöhung der Zeitaufösung gearbeitet. Außerdem werden die Algorithmen zur Signalprozessierung und zur Interpolation der Niederschlagsfelder verbessert. Dies ist wichtig für die zukünftige Anwendung in Ländern ohne Wetterradar und ohne dichtes Pluviometer-Messnetz.

Im Gegensatz zum meteorologischen Messnetz ist das Mobilfunknetz in vielen Entwicklungsländern gut ausgebaut. Dort ließen sich die räumliche und zeitliche Auflösung von Niederschlagsinformation stark verbessern. Nach ersten erfolgreichen Vorarbeiten [11] läuft dazu seit 2019 ein Forschungsprojekt in Burkina Faso, Westafrika. Ziel ist es, das dortige, gut ausgebaute landesweite Mobilfunknetz in ähnlicher Weise wie in Deutschland für die Niederschlagsmessung zu nutzen. Im Süden des Landes sollen die Daten dann für ein optimiertes Management von Bewässerungssystemen genutzt werden, um die Erträge in der Landwirtschaft zu sichern oder sogar zu steigern. Aber auch der Rest des Landes, in dem es immer wieder zu schweren Schäden durch Überflutungen kommt, wird von den signifikant verbesserten Niederschlagsinformation profitieren können.

Zusammenfassung

Das möglichst exakte Erfassen des Niederschlags ist ein grundlegender Bestandteil der Klima- und Umweltforschung sowie für verschiedene Anwendungen, beispielsweise in der Landwirtschaft. Eine neue Art der Niederschlagsmessung ermöglicht das Mobilfunknetz in Deutschland mittels Richtfunkstrecken (Commercial Microwave Link, CML). Der große Vorteil dieser Methode liegt in der potenziell weltweit nutzbaren Infrastruktur. Die Qualität der Niederschlagserfassung mit etwa 4000 CML in Deutschland weist eine hohe Übereinstimmung mit dem offiziellen Messnetz des Deutschen Wetterdienstes auf.

Stichwörter

Niederschlagsmessung, Mobilfunknetz, Richtfunkstrecken, spezifische Dämpfung, RADOLAN-RW, Pluviometer.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Ericsson, speziell bei R. Gerigk, M. Wahl und D. Forde für die Unterstützung und Bereitstellung der CML-Daten, sowie bei der Helmholtz-Gemeinschaft, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung der Projekte Digital Earth, IMAP, realPEP und HoWa-innovativ.

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] M. Collins et al., Cambridge University Press, Cambridge 2013, 1029.
- [2] H. Messer et al., Science **2006**, 312, 713.
- [3] L. de Vos et al., BAMS **2020**, 101.2, e167
- [4] D. Atlas, C. W. Ulbrich, J. Appl. Meteorol. **1977**, 16, 1322.
- [5] C. Chwala, H. Kunstmann, WIRES Water **2019**, 6, e1337.
- [6] C. Chwala et al. Atmos. Meas. Tech. **2016**, 9, 991.
- [7] M. Graf et al., Hydrol. Earth Syst. Sci. **2020**, 24, 2931.
- [8] M. Schleiss, A. Berne, IEEE Geosci. Remote, **2010**, 7, 611.
- [9] J. Polz et al., Atmos. Meas. Tech. **2020**, 13, 3835.
- [10] H. Leijnse et al., Adv. Water Resour. **2008**, 31, 1481.
- [11] A. Doumounia et al., Geophys. Res. Lett. **2014**, 41, 6016.

Die Autoren



Maximilian Graf studierte Physische Geographie und Klima- und Umweltwissenschaften an der KU Eichstätt und der Universität Augsburg mit Stationen beim Deutschen Wetterdienst in Offenbach und am Campus Alpin des KIT in Garmisch-Partenkirchen. Dort und an der Universität Augsburg arbeitet und promoviert er seit September 2018 zum Thema opportunistische Niederschlagsmessung.



Julius Polz studierte Mathematik an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Seit Dezember 2018 ist er Doktorand im Fachbereich Klima- und Umweltwissenschaften an der Universität Augsburg. Sein Dissertationsthema erarbeitet er am Campus Alpin des KIT in Garmisch-Partenkirchen.



Christian Chwala studierte Physik an der Universität Regensburg und an der Universidad de Granada und promovierte im Jahr 2015 im Bereich Klima- und Umweltwissenschaften an der Universität Augsburg. Er koordiniert aktuell mehrere Forschungsprojekte zum Thema Niederschlagsmessung mit Richtfunkstrecken an der Universität Augsburg und am Campus Alpin des KIT.

Anschrift

Maximilian Graf, KIT Alpin, Kreuzeckbahnstraße 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen, Maximilian.Graf@kit.edu.