

Radarmessung und der Regen am Boden: was messen IoT-Sensoren genauer?

Je 50 IoT-Niederschlags-Sensoren wurden im Projekt heavyRAIN in Lübeck, Bochum, Hagen und Lüdenscheid installiert. Die Sensorreaktion auf Regen wurde im Labor getestet, bevor sie an geeigneten städtischen Standorten installiert wurden. Die Ergebnisse der Sensormessungen wurden mit Radarmessungen des Niederschlages verglichen. Mit Hilfe eines Datenwürfels wurden Zusammenhänge in Raum und Zeit untersucht und aus den Starkregenereignissen eines Jahres konnten Erkenntnisse zum Zusammenhang der Messdaten gewonnen werden.

Thomas Einfalt, Bruno Castro, Philipp Lampert und Annika Jahnke-Bornemann

1 Hintergrund

Im Rahmen des mFUND-Projektes „Entwicklung einer KI-Starkregenfrüherkennung mit Hilfe von IoT-Sensoren und Fernerkundung“ (heavyRAIN) wurden im Zeitraum 2023 bis 2025 unter anderem vergleichende IoT-Sensormessungen mit Radardaten durchgeführt. Weitere Ziele des Projektes sind in den Bereichen Verbesserung der Niederschlagsvorhersage, Sensorfusion und KI-Anwendungen auf das Nowcasting von Niederschlag zu finden. Weitere Projektpartner sind die Okeanos GmbH, BO-I-T GmbH und das LANUV NRW.

2 IoT-Sensoren für die Niederschlagsmessung

In Lübeck wurden 50 optische Sensoren der Firma Nivus im Stadtgebiet installiert. Für die Standorte wurden dabei Qualitätsmaßstäbe zu Grunde gelegt, die die schwierigen städtischen Umgebungsbedingungen berücksichtigen, aber auch die möglichst ungestörte Messung im Fokus haben [1].

Der verwendete IoT-Sensor stammt ursprünglich aus der Automobilindustrie und registriert Intensitätsänderungen von Infrarotstrahlen durch Regentropfen auf der Sensorkuppel. Das Messsystem als Ganzes besteht aus dem Sensor, einem Photovoltaik-Element für die Energieversorgung und einem LoRaWAN-Sender für die Datenübertragung. Das Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) ist ein energieeffizientes drahtloses Netzwerkprotokoll. Die Sensoren erkennen Niederschlag in den Klassen 1 bis 7 für unterschiedliche Niederschlagsintensitäten

und Trockenheit als Klasse 0. Die gemessenen Daten werden über die existierenden LoRaWAN-Netze der Städte übertragen.

Dieses Projektmodul wurde in enger Zusammenarbeit mit der TH Lübeck und den Stadtwerken Lübeck durchgeführt, die ein Eigenbetrieb der Hansestadt Lübeck sind.

2.1. Standortkriterien

In urbanen Gebieten gibt es nicht viele Standorte, die den Kriterien der WMO entsprechen [6], [5]. Es ist dennoch sinnvoll, Messungen auch in städtischen Zentren durchzuführen, wobei die spezifischen Standortbedingungen berücksichtigt werden müssen, die gegebenenfalls zu einer erhöhten Unsicherheit der Messdaten führen. Zum einen ist es vorteilhafter, eine mit bekannten Unsicherheiten behaftete Information zu besitzen als gar keine Daten zu erheben, zum anderen können bestimmte Ereignisse, z. B. Starkregen, unter Umständen in ausreichender Qualität erfasst werden.

Zur Bewertung von Aufstellorten wurde zunächst eine Recherche durchgeführt, um eine Liste mit Standortkriterien für Regensensoren zu ermitteln. Für die Standortgüte wurde ein einheitliches Bewertungsschema festgelegt (**Tabelle 1**). Für Klasse 1 gibt es je Kriterium drei Punkte, für Klasse 2 zwei Punkte und für Klasse 3 einen Punkt. Die Punkte werden über die Prüfkriterien summiert und ergeben dann die Klassifizierung.

Die Standorte wurden unter Berücksichtigung der Hauptwindrichtung entlang einer NO-SW-Achse über Lübeck verteilt. Die Abstände zwischen den Sensoren variieren zwischen 100 m und 6 km. Die meisten Sensoren wurden an Straßenlaternen befestigt, so dass Diebstahl und Vandalismus weniger wahrscheinlich sind. Die Installationsorte wurden in Zusammenarbeit mit der Hansestadt Lübeck abgestimmt.

2.2. Laborergebnisse

Eine Laboruntersuchung wurde durchgeführt, in der drei Sensoren jeweils drei Mal mit drei definierten Wassermengen, drei verschiedenen Neigungswinkeln und drei verschiedenen Auftreffpunkten auf dem Sensor überprüft wurden. Ergebnis war, dass die sieben möglichen Niederschlagsklassen nicht eindeutig sind: gleiche Wassermengen führten zu unterschiedlichen Klassen. Eine Trennung zwischen Trockenheit und Niederschlag war jedoch hinreichend gut.

Kompakt

- Ein Schwarm ungenauer IoT-Messungen gestattet Aussagen zur räumlichen und zeitlichen Verteilung von Niederschlägen zu treffen, die als Vergleich für unsichere Radarmessungen dienen.
- Ein dreidimensionaler Datenwürfel ist ein wertvolles Werkzeug für die zeitlich-räumliche Analyse von Messdaten.

Tabelle 1: Standortkriterien für die Aufstellung der Messgeräte (Quelle: Jahnke-Bornemann)

Benennung	Klasse 1: Gut	Klasse 2: Mittel	Klasse 3: Schlecht	Klasse 4: Ausschluss
Höhe Messgerät	Die Messung wird im Bereich 1 m bis 1,5 m Höhe über dem Boden durchgeführt.	Die Messung wird in Höhen zwischen 1,5 m und 5 m über dem Boden durchgeführt.	Die Messung wird in einer Höhe über 5 m über dem Boden durchgeführt.	Die Messung wird in einer Höhe kleiner als 0,5 m über dem Boden durchgeführt.
Spritzwasser	Es kann kein Spritzwasser auf das Messgerät gelangen.	Vereinzelt kann Spritzwasser auf die Messstelle gelangen, z. B. vom Mast an dem das Gerät montiert wurde.	N/A	Regelmäßiger Spritzwassereintrag aus externen Quellen, z. B. Rasensprenger.
Verschmutzung	Es gibt keine Partikel emittierende Quellen in der Nähe.	Typisches städtisches Umfeld ohne zusätzliche Partikel emittierende Quellen.	Es gibt Partikel emittierende Quellen im direkten Umfeld, Beispiel Pollenspendende Pflanzen, industrielle Anlagen etc.	N/A
Bodenbeschaffenheit	Gras oder Kiesboden	Beschaffenheit zwischen Gras und Asphalt	Asphalt	N/A
Hindernisse im Winkel oberhalb des Sensors	Es gibt keine Hindernisse oberhalb der Messstelle in Blickrichtung des Sensors.	Kleine Einschränkungen oberhalb der Messstelle, z. B. Leitungen, Mast.	Einschränkungen oberhalb des Sensors, z. B. Gegenstände am Mast.	Es gibt große Hindernisse oberhalb der Messstelle in Blickrichtung des Sensors, z. B. Bäume.
Hindernisse im horizontalen Blickbereich des Sensors	Es gibt im Umfeld keine Hindernisse oder die Hindernisse erfüllen die folgenden Kriterien: Der Winkel zwischen der Verbindungslinie zwischen dem obersten Punkt des Hindernisses mit der Messstelle und dem Boden ist zwischen 14° und 26,5° bei einer Entfernung der vierfachen bzw. zweifachen Höhe des Hindernisses. Die Hindernisse befinden sich in einer Entfernung, die mindestens der zweifachen Höhe des Hindernisses entspricht. Der Winkel beträgt höchstens 26,5°.	Die Hindernisse befinden sich in einer Entfernung, die mindestens der Höhe des Hindernisses entspricht. Der Winkel beträgt höchstens 45°.	Der Winkel zum Hindernis beträgt weniger als 60°, Hindernisse nehmen höchstens bis zu 180° Raumwinkel ein, sie haben mindestens die Hälfte der Höhe Abstand.	Der Winkel zum Hindernis beträgt mehr als 60°, Hindernisse nehmen mehr als 180° Raumwinkel ein, sie haben weniger als die Hälfte der Höhe Abstand.
Bodenneigung	Ebener Boden	Neigung bis zu 30°	Neigung größer 30°	N/A
Turbulenz	In der Umgebung gibt es in ausreichender Entfernung gleichförmige Hindernisse (Bäume, Häuser etc.).	Die Hindernisse in der Umgebung haben etwas heterogene Höhen.	Die Hindernisse in der Umgebung sind sehr unterschiedlich hoch.	N/A

3 Niederschlagsmessung per Radar

Die Untersuchung in Lübeck beruhte auf geprüften, korrigierten und angeeichten Radardaten des Schleswig-Holstein-Komposits, die für das Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein aus den Daten der Radare in Römö (Dänemark) und Boostedt (Deutschland) bereitgestellt werden. Das Radar Boostedt des Deutschen Wetterdienstes misst in einer Höhe von 900 m über Lübeck in einer Entfernung von 45 km vom Radarstandort.

Die Niederschlagsmessung mit Radar ist in Nordrhein-Westfalen seit über zehn Jahren Standard [4], [2]. Bei Starkregen werden teilweise hohe räumliche Gradienten in der Messung mit dem Radar beobachtet, die durch sehr kleinräumige Niederschlagszellen verursacht werden. Da das Radar in einer Höhe von wenigen 100 m bis zu einigen km in der Atmosphäre misst, stellen sich folgende Fragen:

- Wann treffen die in der Höhe gemessenen Niederschläge am Boden ein? Regentropfen benötigen, je nach Höhe und Tropfen-

fenggröße - damit verknüpft der Fallgeschwindigkeit -, bis zu 10 Minuten, bis sie den Boden erreichen [7].

- Wo erreichen die in der Höhe gemessenen Niederschläge den Erdboden? Je nach Windverhältnissen zwischen dem Messort und dem Boden kann der Niederschlag bis zu einer Distanz verdriftet werden, die seiner Messhöhe entspricht [3].

Der Vergleich mit einem Bodenmessnetz wie den IoT-Sensoren kann helfen, diese Fragen zu beantworten.

4 Auswertungen

4.1 Datenwürfel

Für den Vergleich zwischen den Messdaten des Sensornetzes und den Radarmessungen wurden 11 Starkregeneignisse aus dem Sommer 2024 festgelegt. An jedem Sensor wurde für jedes untersuchte Ereignis die Spearman-Korrelation zwischen den Zeitreihen der Sensorklassen und der Radarniederschlagsmen-

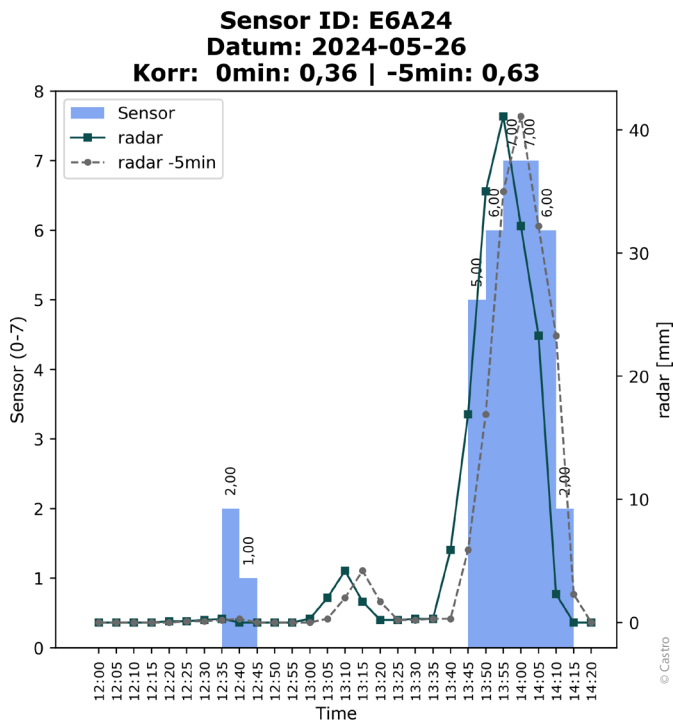


Bild 1: Korrelationsanalyse eines Sensors

gen am gleichen Ort berechnet. Beispielhaft zeigt **Bild 1**, dass eine zeitliche Verschiebung zwischen Sensor und Radar eine verbesserte Korrelation ergibt.

Um die Unterschiede zwischen atmosphärischer und boden-naher Messung zu erkennen, wurden die Radardaten gegenüber den Sensoren verschoben: in der Zeit um -10, -5, 0, 5, 10 Minuten und im Raum um neun Rasterpunkte in alle Himmelsrichtungen. Eine räumliche Verschiebung bedeutet hierbei, die Zeitreihe des

Sensors mit der Radarzeitreihe eines benachbarten Pixels zu korrelieren. Die zeitliche Verschiebung lässt sich folgendermaßen erklären: Ist ein Regenereignis durch die Sensoren im Zeitraum von 14:45 - 15:15 Uhr festgestellt worden, so bedeutet eine zeitliche Verschiebung von -5 Minuten, dass diese Zeitreihe der Sensordaten mit der Zeitreihe der Radardaten von 14:40 bis 15:10 Uhr korreliert wird. Hierfür wurde das Konzept des Datenwürfels entwickelt, der die Ergebnisse als 3-D-Struktur in Zeit und Raum darstellt und Auswertungen leichter nachvollziehbar macht. Diese Auswertung wurde bezüglich der zeitlichen Verschiebung für jeden der Zeitschritte in einer eigenen Ebene dargestellt.

In **Bild 2** ist anhand eines Starkregenereignisses in Lübeck vom 26. Mai 2024 dargestellt, inwieweit die Sensordaten im Mittel mit den Radardaten korrelieren. Dazu sind zwei Datenwürfel angelegt, die jeweils die räumliche Verschiebung der Radardaten (Auflösung 1 km × 1 km) gegenüber den Sensorstandorten in einer Ebene und die zeitliche Verschiebung vertikal durch unterschiedliche Ebenen darstellen (Auflösung 5 Minuten). Zur Erstellung der Datenwürfel wird für jeden Sensor die eigene Zeitreihe mit der Zeitreihe der angeeichten Radar-Daten im gleichen Zeitraum verglichen und die Korrelation berechnet (Spearman-Korrelation). Der Datenwürfel stellt somit die Korrelationswerte der Sensor-Zeitreihe im Vergleich zu den Zeitreihen der Radar-Daten am gleichen Ort und gleicher Zeit, sowie in örtlicher und zeitlicher Verschiebung dar. Zunächst wird für jeden Sensor ein separater Würfel berechnet. Der linke Datenwürfel zeigt den Median aller einzelnen Sensorwürfel. Der rechte Datenwürfel in der Bildmitte zeigt die Auftretshäufigkeit der jeweiligen Korrelationsmaxima jedes einzelnen Sensorwürfels. Er liefert dadurch keine Information über den Korrelationswert des jeweiligen Korrelationsmaximums, sondern über die Übereinstimmung des Maximalwertes zwischen den Sensoren. Eine zusätzliche Information zum Ereignis

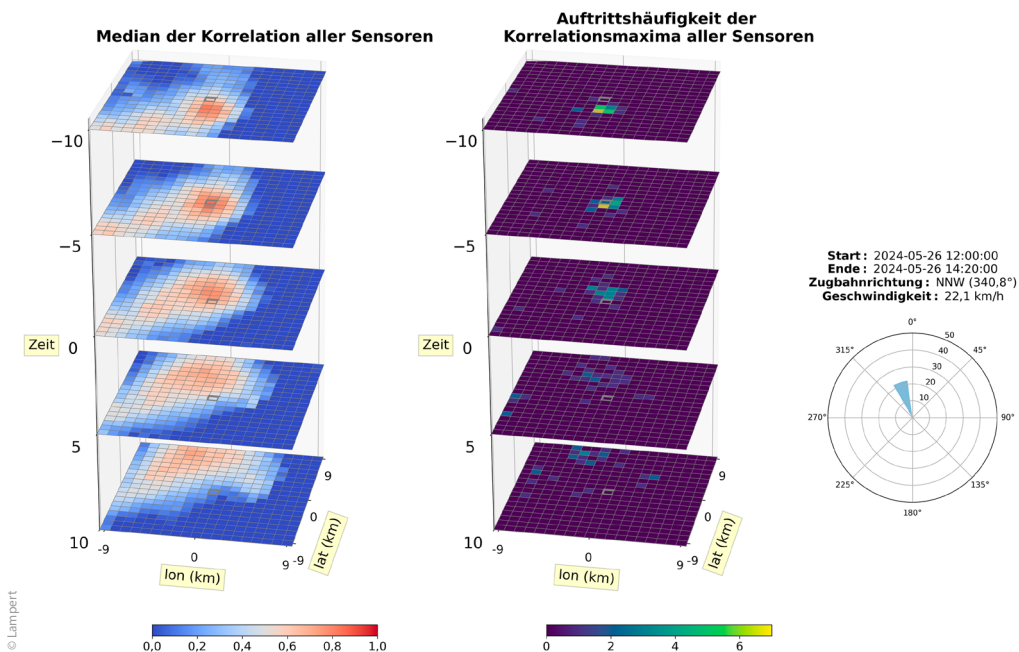


Bild 2: Ereignisdarstellung mit den Datenwürfeln aus den Korrelationswerten (links) und aus den Auftretensanzahlen der maximalen Korrelationen (Mitte) sowie der Windrose des Zellzuges (rechts)

Tabelle 2: Basisanalyse der untersuchten Ereignisse des Jahres 2024 (Quelle: Einfalt und Lampert)

Datum	Dauer [h.]	Geschwindigkeit [km/h]	Richtung [°]	maximale Korrelation [-]	Zeitliche Verschiebung [min]
20.05.2024	2,5	20,9	272,2	0,77	-5
22.05.2024	4,5	26,9	310,6	0,57	-5
26.05.2024	2,5	22,1	340,8	0,84	-5
28.05.2024	3,0	35,3	332,4	0,66	-5
30.06.2024	2,5	67,0	12,3	0,87	-5
14.07.2024	2,0	38,6	47,8	0,91	0
16.07.2024	3,0	34,9	58,1	0,92	-5
23.07.2024	3,0	27,5	78,0	0,84	-5
28.07.2024	5,5	21,4	120,5	0,76	-5
07.08.2024	4,5	33,8	31,5	0,81	-5
21.08.2024	2,0	51,9	25,9	0,80	-5

geben die mittlere Zugrichtung und die mittlere Zuggeschwindigkeit der Regenzellen des Regenereignisses, die in der Windrose rechts angegeben sind.

Aus der visuellen Darstellung geht deutlich hervor, dass die Zugrichtung der Zellen in direktem Zusammenhang mit der Korrelation im Datenwürfel steht. Das rosafarbene bis rote Feld der höchsten Korrelation verläuft über die Zeit entlang der Zugbahn. Auch gibt es Ähnlichkeiten in der Zellstruktur im Vergleich zum Korrelationsfeld.

4.2 Auswertung 2024

Für das Jahr 2024 wurde eine Auswertung aller elf konvektiven Starkregenereignisse über Lübeck erstellt. Für jedes Ereignis wurden Zuggeschwindigkeit, Zugrichtung (aus der Zellstatistik) und die zeitliche sowie räumliche Übereinstimmung zwischen den Sensordaten und Radardaten berücksichtigt. Zusätzlich wurden über die Orte der Maximalwerte der Korrelationen zu den verschiedenen Zeitpunkten (**Bild 2**) ebenfalls Zuggeschwindigkeit und Zugrichtung berechnet und mit den Werten aus der Zellstatistik verglichen.

Tabelle 2 stellt die Erkenntnisse aus 2024 dar:

- Die Dauer der Ereignisse reichte von zwei Stunden bis über fünf Stunden, mit einem klaren Schwerpunkt bei zwei bis drei Stunden.
- Die Zuggeschwindigkeit lag zwischen 21 km/h und 67 km/h relativ gut verteilt.
- Bei der Zugrichtung fällt auf, dass es fast nur Ereignisse aus einer südlichen Richtung (also Zugrichtung zwischen mindestens 270° und maximal 90°) gab.
- Bei fast allen Ereignissen beträgt die optimale Verschiebung in der Zeit -5 Minuten, also die Radardaten von 5 Minuten vor den Messungen am Boden dem aktuellen Zeitpunkt entsprechen.

Zusätzlich zu diesen Basiswerten aus der Auswertung fand eine Detailanalyse statt. Hierfür wurde der Korrelationswürfel weiter ausgewertet und aus den Orten der Korrelationsmaxima zu den unterschiedlichen Zeitpunkten mit Hilfe von linearer Regression eine Zuggeschwindigkeit und eine Zugrichtung hergeleitet (**Tabelle 3**). Ein Vergleich mit den aus der Zellstatistik berechneten Werten zeigt, dass die Zuggeschwindigkeit meist weniger

Tabelle 3: Detailanalyse der untersuchten Ereignisse des Jahres 2024 (Quelle: Einfalt und Lampert)

Datum	Geschwindigkeit [km/h]	Richtung [°]	K-Geschwindigkeit [km/h]	K-Richtung [°]	minimaler Abstand [m]	Richtung	minimale Zeitdifferenz [min]
20.05.2024	20,9	272,2	26,8	296,6	447	SO	-3,0
22.05.2024	26,9	310,6	44,3	302,8	379	SO	-4,2
26.05.2024	22,1	340,8	34,5	339,7	410	NW	-5,1
28.05.2024	35,3	332,4	38,4	345,5	212	W	-6,2
30.06.2024	67,0	12,3	42,2	14,8	250	W	-5,8
14.07.2024	38,6	47,8	45,0	41,8	37	SW	-2,5
16.07.2024	34,9	58,1	47,6	40,9	2 418	SW	-2,4
23.07.2024	27,5	78,0	33,7	75,9	940	S	-1,5
28.07.2024	21,4	120,5	21,6	109,4	821	S	0,2
07.08.2024	33,8	31,5	37,4	47,6	2 549	SW	-5,0
21.08.2024	51,9	25,9	42,4	351,9	2 630	W	-6,0

als 50 % Abweichung und die Zugrichtung meist weniger als 30° Unterschied zeigten. Mit den Werten aus dem Korrelationswürfel lassen sich jetzt, auch durch Vergleich der berechneten Gerade, die minimalen Abstände im Raum und in der Zeit zum Ursprung (also keine räumliche oder zeitliche Verschiebung) bestimmen. Auffällig waren hier vier Ereignisse: drei Ereignisse mit einem Abstand von mehr als 2 km zum Ursprung und ein Ereignis mit einer positiven Zeitverschiebung. Alle drei Ereignisse mit großem Abstand weisen diesen in westliche Richtung auf. Während ein großer räumlicher Abstand zum Ursprung ein Hinweis auf eine Verdriftung des Niederschlages sein kann, ist eine positive Zeitverschiebung ein Grund, sich das Ereignis nochmals näher zu betrachten. Dieses Ereignis ist das längste mit über fünf Stunden und enthält Zellen mit unterschiedlichen Zugrichtungen, die für eine Detailanalyse zeitlich separiert werden sollten.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Radarmessungen treffen nicht zu dem Zeitpunkt und an dem Ort ein, die die Messung suggeriert. IoT-Sensoren sind in der Lage, solche Abweichungen am Boden festzustellen und zu quantifizieren. Allerdings sind diese Abweichungen nur bei kleinräumigen Niederschlagszellen bzw. räumlich heterogenem Niederschlag erkennbar - zu wenig strukturierte Niederschlagsfelder, wechselnde Zugrichtungen und lang andauernde Ereignisse erschweren die Analyse. Bei Starkregenauswertungen sollte deshalb besonders sorgfältig darauf geachtet werden, inwieweit Schäden und Abflüsse auch in direkter Nachbarschaft zu den höchsten Regenmengen der Radarmessung beobachtet wurden.

Ein 3-D-Datenwürfel erleichtert dabei die Auswertung und die Visualisierung der Übereinstimmung zwischen der Radarmessung in der Höhe und dem Niederschlagsgeschehen am Boden.

Autoren

Dr. Thomas Einfalt

Bruno Castro

Philipp Lampert

Dr. Annika Jahnke-Bornemann

hydro & meteo GmbH

Breite Str. 6-8

23552 Lübeck

einfalt@hydrometeo.de

b.castro@hydrometeo.de

p.lampert@hydrometeo.de

a.jahnke-bornemann@hydrometeo.de

Literatur

- [1] Einfalt, T.; Jahnke-Bornemann, A.; Jasper-Tönnies, A.; Kupzig, J.; Neumann, J.; Oppel, H.: Weather radar and IoT sensor networks: which information from which source? In: International Conference on Urban Drainage ICUD 2024, Delft (www.hydrometeo.de/wp-content/uploads/202406_ICUD_IoT_sensors_Poster.pdf, Abruf 28.11.2024).
- [2] HKC (Hrsg.): Umgang mit hydrologischen Belastungsgrößen in Zeiten des Klimawandels - Hochwasser und Starkregen. In: HKC-Werkstattbericht, 2021.
- [3] Lack, S. A.; Fox, N. I.: An examination of the effect of wind-drift on radar-derived surface rainfall estimations. In: Atmospheric Research 85 (2007), Nr. 2, S. 217-229.
- [4] Treis, A.; Einfalt, T.; Weigl, E. et al.: Kombination hochaufgelöster Radarniederschlagsinformationen und terrestrischer Ombrometerdaten, Ergebnisse des DX-Offline-Projektes der Wasserverbände NRW mit dem Deutschen Wetterdienst. In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 9 (2016), Nr. 4, S. 233-242.
- [5] VDI (Hrsg.): Umweltmeteorologie; Meteorologische Messungen; Niederschlag. In: VDI-Regelwerk (2022), Nr. 3 786, Blatt 7.
- [6] WMO (Hrsg.): Guide to Instruments and Methods of Observation. In: WMO-Guide (2021/2018), No. 8.
- [7] WMO (Hrsg.): Guide to Operational Weather Radar Best Practices. In: WMO-Guide (2024), No. 1 257.

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-025-2533-y>

Thomas Einfalt, Bruno Castro, Philipp Lampert
and Annika Jahnke-Bornemann

Radar measurement and rain on the ground - what see IoT sensors better?

50 IoT precipitation sensors were installed in Lübeck, Bochum, Hagen and Lüdenschaid as part of the heavyRAIN project. The sensor response to rain was tested in the laboratory before they were installed at suitable urban locations. The results of the sensor measurements were compared with radar measurements of precipitation. With the help of a data cube, relationships in space and time were analysed and insights into the correlation of the measurement data could be gained from the heavy rainfall events of a year.



Starkregen



Schaljo, T. et al.: Der Einfluss digitaler Höhendaten auf 2-D-Starkregenmodelle. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 6/2024. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2024.

<https://sn.pub/juufki>

Schneider, T.; Oberauer, M.: Stark unterschiedliche Starkregengefahrenkarten nach den Leitfäden der Länder. In: Wasser und Abfall, Ausgabe 6/2024. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2024.

<https://sn.pub/q368xh>