

Zeitaufgelöst zu neuen Blitzstrukturen

Mit dem Radioteleskop LOFAR ließen sich neue Entladungsstrukturen in Gewitterwolken nachweisen.

Ute Ebert und Martin Füllekrug

Blitze sind nur der sichtbare Teil des Entladungssystems in Gewitterwolken, das äußerst komplex und in vieler Hinsicht noch unverstanden ist. Bevor ein Blitz auf der Erde einschlägt, entwickelt sich in der Wolke zunächst ein sehr ausgedehntes, häufig eher horizontal orientiertes System von Entladungskanälen. Wie aus einer Art umgekehrten Wurzel wächst der Wolke-Erde-Blitz nach unten heraus. Dieses System ist in der Wolke verborgen und war lange unbekannt. Doch die in der Wolke vorliegenden elektrischen Ströme erzeugen elektromagnetische Strahlung, vor allem Radiostrahlung. Diese lässt sich vom Boden aus messen, um die Entladungsstrukturen innerhalb der Wolke zu analysieren. Ein Netzwerk aus Hochfrequenzantennen (Lightning Mapping Array, LMA) erlaubt es, die Entladungen in der Wolke dreidimensional zu kartieren.

Mit dem Radioteleskop LOFAR (LOW Frequency ARray) konnte ein internationales Forscherteam neue unerwartete Strukturen in Gewitterwolken beobachten [1]. Dabei handelt es sich um pulsierende „Nadeln“ von 10 bis 100 Metern Länge, die sich aus positiven Entladungskanälen entwickeln. Dass sich diese Strukturen erst jetzt nachweisen ließen, beruht auf der höheren raum-zeitlichen Genauigkeit von LOFAR im Vergleich zu den weniger aufwändigen, dafür aber häufig transportablen LMAs. LOFAR beobachtet als Radioteleskop normalerweise relativ langsame bis statische Prozesse. Die deutlich schnellere Entladungsdynamik ließ sich nur mit einer neuen Software verarbeiten. LOFAR besteht aus sehr vielen Radioempfängern, deren Daten in einem Supercomputer in Groningen zusammengeführt werden. Die Empfänger sind in Gruppen angeordnet und bilden ein Interferometer, das sich von den Niederlanden aus über Europa erstreckt. Im Wesentlichen bestimmt die Genauigkeit des Zeit-



Künstlerische Darstellung eines Blitzes über der Zentralstation des Radioteleskops LOFAR (LOW Frequency ARray) im Nordosten der Niederlande.

vergleichs der Uhren der Radioempfänger die kleinräumige Auflösung eines solchen Interferometers. Eichsignal war ein besonders starker Blitzimpuls in unmittelbarer Nähe einer Gruppe von Radioempfängern. Mit seiner Position ließen sich die Uhren der Radioempfänger von weiter entfernten Gruppen relativ zueinander synchronisieren unter der Annahme, dass die Radiowellen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Damit erreicht LOFAR eine räumliche Auflösung von unter zwei Metern und eine zeitliche von einer Mikrosekunde.

Um zu verstehen, wo die „Nadeln“ auftauchen, muss man sich die Entstehung eines Blitzes genauer anschauen. Es beginnt mit der großräumigen Trennung von elektrischen Ladungen in der starken Turbulenz in der Gewitterwolke. Die positiven und negativen Ladungen sind dabei überwiegend an Wassertropfen, Graupel und ähnliches gebunden und bewegen sich mit diesen makroskopischen Teilchen mit. Die Luft in einer Wolke hat eine sehr geringe Leitfähigkeit, denn die durch Radioaktivität oder kosmische Strahlung freigesetzten Elektronen binden schnell an Sauerstoff. Diese

Sauerstoffionen bilden Kondensationskeime für Wassermoleküle. Aus diesen Molekülclustern können die Elektronen nur selten entkommen, sodass eine großräumige elektrische Ladungstrennung auftreten kann.

Eine elektrische Entladung startet, wenn das lokale elektrische Feld hoch genug ist, z. B. durch lokale Felderhöhung in der Nähe eines großen Eisteilchens, und wenn freie Elektronen durch Stoßionisierung lokal ein Plasma erzeugen [2]. Eine größere Anzahl korrelierter Elektronen entsteht durch hochenergetische kosmische Teilchen, die in der Atmosphäre einen Luftschauer verursachen.

Eine elektrische Entladung, die inmitten einer nichtleitenden Wolke entsteht, muss aufgrund der Ladungserhaltung eine bipolare Struktur haben, mit positiven und negativen Enden. Vor den Enden der langen leitfähigen Kanäle ist das elektrische Feld sehr hoch. Dort wächst die Entladung: am negativen Ende durch Stoßionisierung und durch die Drift der Elektronen nach vorne, am positiven Ende ebenfalls durch Stoßionisierung und das Einsaugen von freien Elektronen, die durch UV-

Strahlung aus der Ionisierungsfront frei gesetzt werden.

Die negative Entladung wächst in Schritten von etwa 10 bis 50 Metern und ist in der Radiomessung deutlich sichtbar. Der Mechanismus des schrittweisen Kanalwachstums und damit die Ursache der Radiostrahlung sind bislang nur ansatzweise verstanden. Durch die korrelierte Beobachtung vom Boden und aus dem Raum ist aber klar, dass dabei Elektronen mit bis zu 40 MeV Energie auftreten. Diese erzeugen in der Atmosphäre harte Gammastrahlung und Elektronen-Positronen-Paare, und es finden Kernreaktionen statt [3, 4]. Daher gilt momentan den negativen Entladungen als Quelle hochenergetischer atmosphärischer Phänomene große Aufmerksamkeit.

Das Wachstum der positiven Entladung durch Einsaugen von Elektronen ist dagegen ein kontinuierlicher Prozess ohne starke Stromschwankungen und deshalb in einer Radiomessung im Allgemeinen unsichtbar. Überraschenderweise ließen sich mit LOFAR Strukturen in den positiven Entladungen beobachten. Diese „Nadeln“ ähneln den Schritten der negativen Entladungen, entstehen aber seitlich von einem schon gebildeten positiven Kanal aus, der in den Radiomessungen zu erahnen ist (Abb. 1). Vom ursprünglichen Kanal laufen durch die Nadeln mehrere Strompulse nacheinander weg, was die

Autoren als „twinkling“ bezeichnen. Während die positiven Kanäle selbst mit etwa 10^4 m/s wachsen, bewegen sich die Strompulse mit der 30-fachen Geschwindigkeit und einer Periodizität von drei bis sieben Millisekunden durch die Nadeln.

Ein so genannter Streamer-Baum bahnt den Weg für den „Leader-Kanal“ [5]. Die Autoren bemerken, dass die hohen Geschwindigkeiten der Nadeln zu einem Leader-Kanal mit negativer Polarität passen. Durch die Nadeln, so ihre Argumentation, könnten positive und negative Kanäle nicht durchgehend leitfähig bleiben, sodass sich Wolke-Erde-Blitze mehrfach entladen. Allerdings beruhen diese Argumente auf dem Konzept eines einzigen geraden Leader-Kanals und seiner Elektrostatik.¹⁾ Der beobachtete Kanal spiralt jedoch schräg aufwärts und macht dabei eine Wendung von beinahe 180 Grad in der Horizontalen (Abb. 1b), während sich zahlreiche andere Leader und ein Wolke-Erde-Blitz entwickeln. Auch lässt sich aus der Geschwindigkeit nicht auf die Polarität schließen, da die raumladungsdominierten Streamer-Entladungen beider Polaritäten mit ähnlichen Geschwindigkeiten wachsen.

Um die genauen Eigenschaften der Nadeln und ihre Bedeutung für

die Blitzentstehung zu verstehen, sind weitere Analysen und Beobachtungen wünschenswert. Am besten wäre es, wenn sich die Mobilität von Radioempfängern in der Blitzforschung mit der kleinräumigen Auflösung eines Netzwerkes mehrerer Interferometer in der Radioastronomie zusammenführen ließe. Derartige Experimente sind beispielsweise an der Chinesischen Akademie der Wissenschaften unter Federführung von Xiushu Qie in Planung. Moderne Messtechnik und digitale Datenverarbeitung könnten so unser Verständnis der Blitzentstehung deutlich voranbringen.

- [1] B. M. Hare et al., Nature 568, 360 (2019)
- [2] A. Dubinova et al., Phys. Rev. Lett. 115, 015002 (2015)
- [3] C. Rutjes et al., Geophys. Res. Lett. 44, 10702 (2017)
- [4] T. Enoto et al., Nature 551, 481 (2017)
- [5] U Ebert, Physik Journal, Dezember 2009, S. 39

Autoren

Prof. Dr. Ute Ebert, Forschungsgruppe Multi-scale Dynamics am Centrum Wiskunde & Informatica (CWI), Science Park 123, 1090 GB Amsterdam, Niederlande

Dr. Martin Füllekrug, Centre for Space, Atmospheric and Oceanic Research, Department for Electronic and Electrical Engineering, University of Bath, Großbritannien

1) Dieser erhält durch ohmsche Erhitzung seine elektrische Leitfähigkeit und kann so das elektrische Potential von der Wolke zur Erde transportieren.

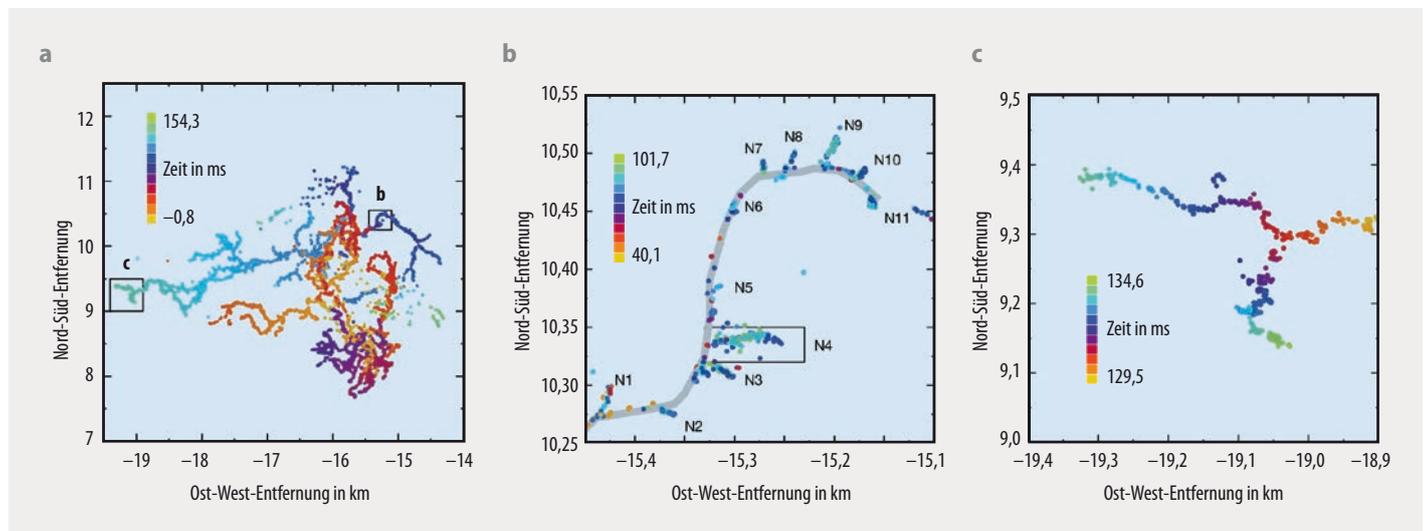


Abb. 1 In der Karte der LOFAR-Messungen (a) stellt jeder Punkt eine Radioquelle dar. Vergrößerte Ausschnitte zeigen einen positiven Entladungskanal mit den beobachteten „Nadeln“ (b) und einen

negativen Kanal (c). Durch jede Nadel laufen mehrere messbare Strompulse vom grau markierten Leader-Kanal nach außen.