

**Angewandte Programmierung für die
Wettermodellierung**

Der Einfluss von CAPE auf bodennahen Hagel in simulierten Superzellen

Robert Wright

22. März 2024

Dozent: Dr. Ingo Kirchner

1 Motivation

Superzellen sind bekannt für ihre Fähigkeit, enorme Mengen an Hagel zu produzieren, insbesondere große Hagelkörner mit einem Durchmesser von über 4 cm. Beispielsweise entstand das größte je in den USA gemessene Hagelkorn (mit einem Durchmesser von 17,8 cm) am 22. Juni 2003 in einer Superzelle [1], was ihre Gefährlichkeit verdeutlicht.

Diese Gewitterzellen zeichnen sich durch langlebige und hochreichende Mesozyklonen aus, in denen Aufwinde Geschwindigkeiten von über 40 m s^{-1} erreichen können [2]. In diesen Aufwinden werden Wassertropfen in höhere, kältere Atmosphärenschichten

transportiert, wo sie zu Eis gefrieren. Durch die Kollision mit unterkühlten Wassertropfen wächst das Hagelkorn weiter, was als Aggregation bezeichnet wird, bis es aufgrund des zunehmenden Einflusses der Schwerkraft absinkt und aus der Wolke fällt. Neben der Größe des Aufwindbereichs ist daher die maximale Vertikalgeschwindigkeit (und die entsprechende der Schwerkraft entgegengerichtete Auftriebskraft) entscheidend für die Bildung großer Hagelmengen und letztere wird direkt von der Convective Available Potential Energy (CAPE) beeinflusst, auch bekannt als Labilitätsenergie. Der CAPE-Wert gibt an, wie viel Energie einem Luftpaket für den Aufstieg zur Verfügung steht und hängt unter anderem vom Feuchtegehalt der bodennahen Luftschicht ab.

Diese Analyse verändert daher indirekt das CAPE einer Atmosphäre, in welcher Superzellen simuliert werden. Anschließend wird die Vertikalgeschwindigkeit und horizontale Ausprägung der Aufwindzone quantifiziert und die Auswirkungen auf den bodennahen Hagel betrachtet.

2 Simulationen

Um den Einfluss von CAPE auf den Aufwind und die Produktion von Hagel in einer Superzelle zu untersuchen, wird das *Cloud Model 1* (CM1), Version 20.2, [3] verwendet. Die Simulationen werden auf einem stationären Gitter der Auflösung $480 \times 360 \times 80$ durchgeführt, dabei wird ein horizontaler Gitterpunktabstand von 500 m und ein vertikaler von 250 m gewählt. Folglich führt dies zu einem Simulationsraum von $240 \text{ km} \times 180 \text{ km} \times 20 \text{ km}$. Der Zeitschritt beträgt 1,5 s und die Gesamtdauer der Simulation ist 3 h, dabei werden Zwischenergebnisse alle 5 min abgespeichert.

Die Konvektion wird durch eine Wärmeblase mit einem Temperaturunterschied von 2 K ausgelöst. Diese besitzt eine horizontale Ausprägung von 20 km, ist 3 km hoch und befindet sich im südwestlichen Bereich der Domain. Die Mikrophysik wird durch das *two-moment Morrison scheme* [5] parametrisiert. Das Windprofil ist ein idealisierter *quarter-circle* nach Weisman und Rotunno [4] und in Abb. 1 dargestellt. Die Soundings der Simulationen basieren auf Weisman und Klemp [6] und führen typischerweise zur Bildung

Label	Mischungsverhältnis [g kg^{-1}]	CAPE [J kg^{-1}]
MR11	11	533,5
MR14	14	1857,7
MR16	16	2984,9
MR21	21	5912,5

Tabelle 1: Durchgeführte CM1-Simulationen

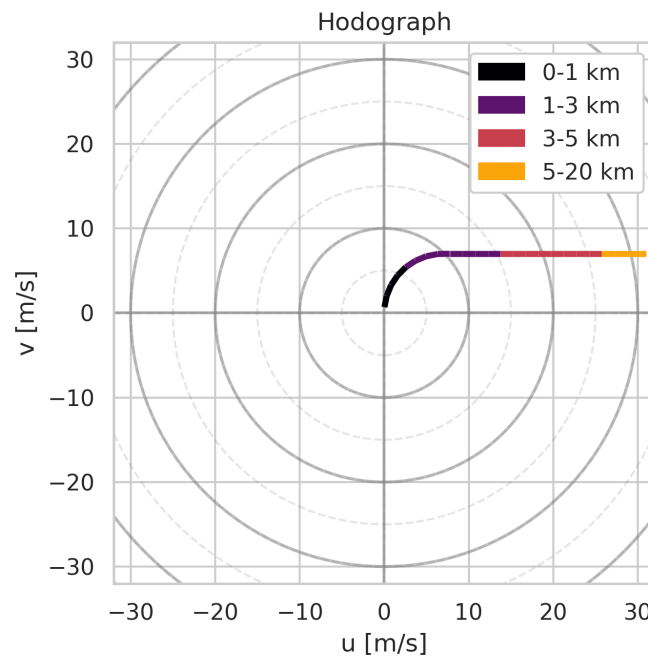


Abbildung 1: Der Hodograph zeigt die Veränderung des Windprofils mit der Höhe. Das idealisierte *quarter-circle* Windprofil [4] wird in allen Simulationen unverändert verwendet.

von Superzellen. In den Soundings wird nun das Mischungsverhältnis von Wasserdampf zu trockener Luft erhöht (vgl. Tabelle 1), was durch das niedrigere Einsetzen der Feuchtekonyvektion das CAPE der Atmosphäre zu Beginn der Simulation verändert. Die gewählten Werte sind dabei aus Weisman und Klemp [6] übernommen, allerdings stellt der maximale Wert des Mischungsverhältnisses $q_v = 21 \text{ g kg}^{-1}$ eine Situation dar, in der Feuchtekonyvektion bereits direkt am Boden einsetzt. q_v wird dabei derart gewählt, dass bei gegebenem Umgebungsdruck und -temperatur die relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt. Die entsprechenden Profile sind in Abb. 2 dargestellt.

3 Ergebnisse

Zunächst werden die Simulationen mithilfe von *ParaView* visualisiert, dies dient dazu, einen Überblick über die komplexen Strukturen der Superzellen zu gewinnen und stellt sicher, dass die Ergebnisse plausibel sind und es keinen Fehler im Simulationsprozess gab. Beispielhaft wird ein Frame der Visualisierung in Abb. 3 präsentiert, die kompletten Videos aller Simulationen sind über diesen [Link](https://poincare.met.fu-berlin.de/~rw0064fu/cm1-anim/)¹ abrufbar. Da Simulationsdaten nur alle 5 min zur Verfügung stehen, wird ein *temporal interpolator* verwendet, allerdings sind weiterhin unschöne Sprünge zwischen den Frames erkennbar und die zeitliche Auflösung hätte weiter künstlich erhöht werden können.

In Abb. 4 kann die räumliche Ausdehnung der Gewittergebilde nachvollzogen werden. In allen Simulationen ist deutlich die Aufspaltung der Superzelle in einen *left-* und *right-mover* zu erkennen. Dabei entstehen umso mehr lokale Gewitter entlang der Hauptpfade, je höher das Mischungsverhältnis gewählt wurde.

Im Folgenden wird der Fokus auf die Entstehung von Hagel in den CM1-Simulationen gelegt. Daher wird der Aufwind in einer Höhe betrachtet, in der sich typischerweise Hagel bildet. Wie bereits in anderen Studien [7] angenommen, wird das entsprechende Höhenintervall in dieser Analyse auf 4 km bis 8 km AGL festgelegt. Die zeitliche

¹<https://poincare.met.fu-berlin.de/~rw0064fu/cm1-anim/>

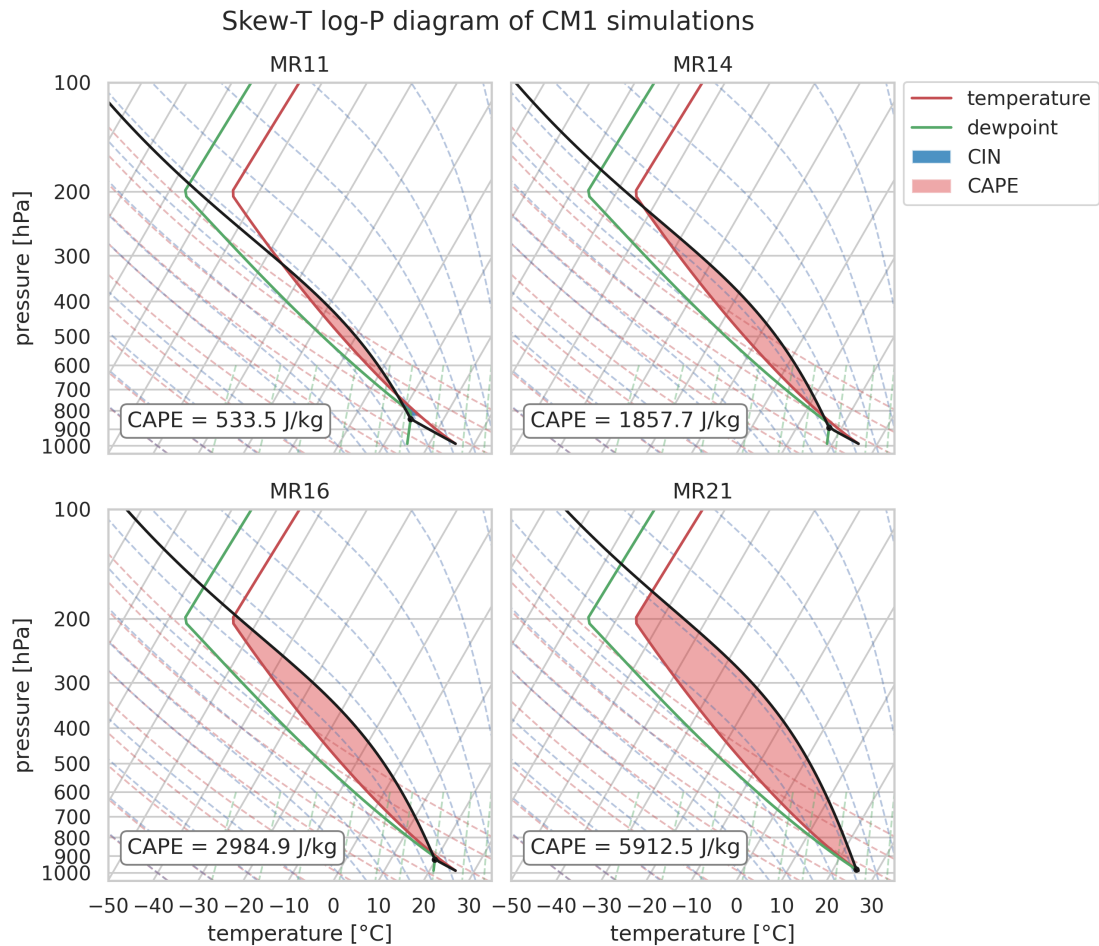


Abbildung 2: Die Soundings der einzelnen CM1-Simulationen mit vertikalem Temperatur- und Taupunktprofil. Außerdem stellt die schwarze Kurve den Aufstieg eines Luftpakets dar – zunächst trockenadiabatisch bis zum markierten Punkt, dann setzt Feuchtekonyvektion ein. Aus der Fläche zwischen Umgebungstemperatur und Temperatur des Luftpakets kann das CAPE bestimmt werden. *Skew-T* betont die geneigten Isothermen.

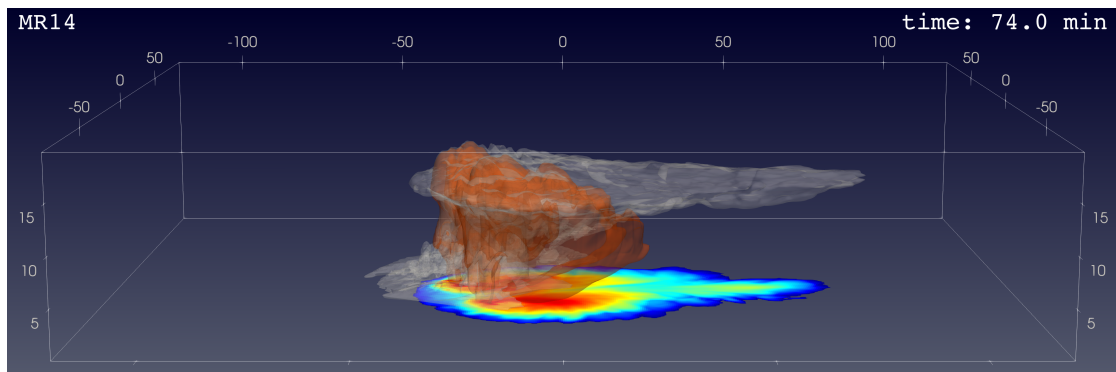


Abbildung 3: Die Superzelle der MR14-Simulation nach 74 min Simulationszeit. Die Konturen des Wolkenwassers sind in grau und die des Hagel-Mischungsverhältnisses in orange dargestellt. Zusätzlich ist die vertikal-integrierte maximale Reflektivität auf das niedrigste Modellniveau projiziert. Die Achsenbeschriftung gibt die Größe der Domain in km wieder.

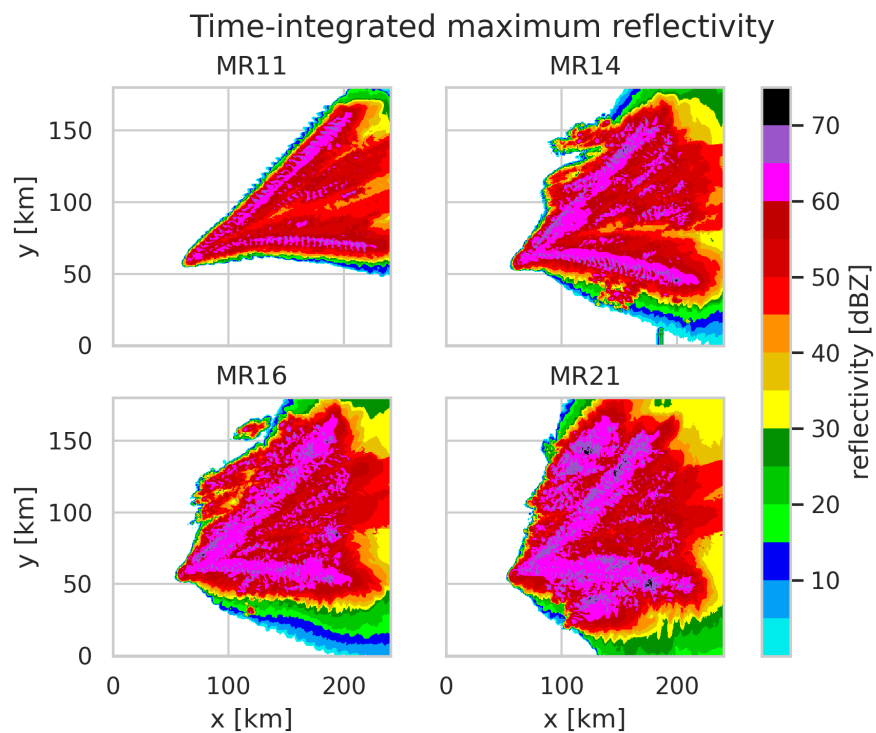


Abbildung 4: Die sowohl vertikal als auch zeitlich integrierte maximale Reflektivität der CM1-Simulationen

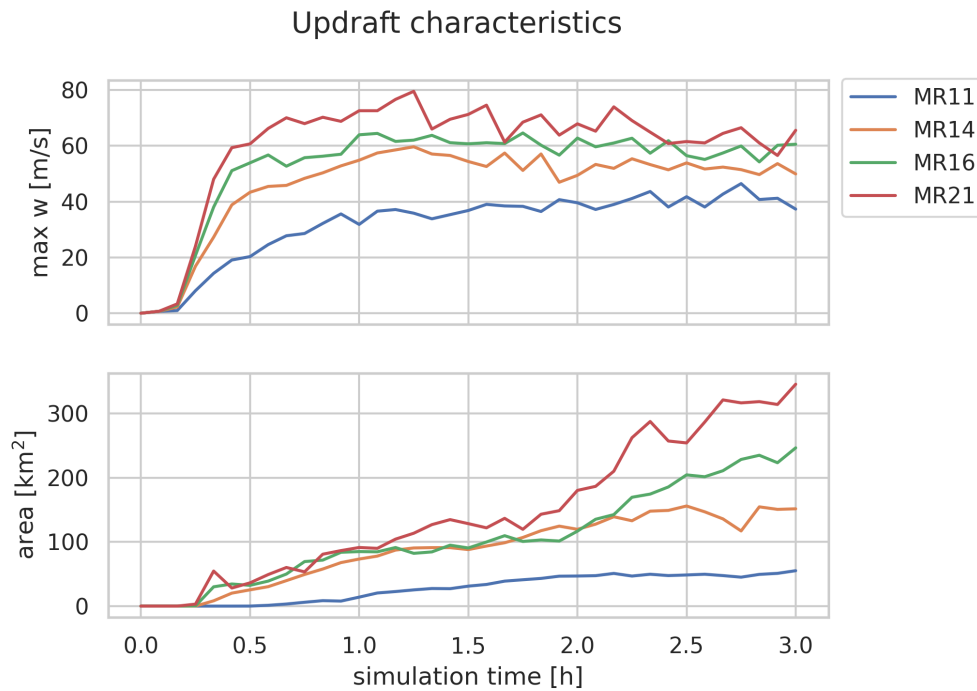


Abbildung 5: *Oben:* Die maximale Vertikalgeschwindigkeit des Windes über das gesamte Simulationsgebiet betrachtet. *Unten:* Die gemittelte horizontale Fläche mit Aufwinden $\geq 20 \text{ m s}^{-1}$. Der Schwellenwert wurde aus Lin und Kumjian [7] übernommen. Beide dargestellten Größen beziehen sich auf den Bereich der optimalen Hagelentstehung zwischen 4 km bis 8 km AGL.

Entwicklung der maximalen Vertikalgeschwindigkeit w in Abb. 5 verdeutlicht, dass eine vermehrte Verfügbarkeit von CAPE sowohl für höhere Maximalgeschwindigkeiten als auch für einen steileren Geschwindigkeitsgradienten zu Beginn der Simulation sorgt. Zur Verringerung der Maximalgeschwindigkeit bei fortgeschrittener Simulationszeit (v. a. in der MR21-Simulation) ist anzumerken, dass Teile des Gewittergebildes aus der Domain herauswandern. Außerdem ist der $w \geq 20 \text{ m s}^{-1}$ Aufwindbereich größer, je länger die Simulationen andauern und je höher das Mischungsverhältnis bzw. CAPE gewählt wurde.

Je länger die Simulationen andauern, desto mehr Hagel erreicht den Boden. Obwohl der Anstieg des Hagel-Mischungsverhältnisses q_h zunächst ähnlich zwischen den Simulationen verläuft (abgesehen von der MR11-Simulation, welche durchweg lediglich geringere Werte für q_h anzeigt), ändert sich dies nach ca. 1,5 h Simulationszeit: Die MR14-

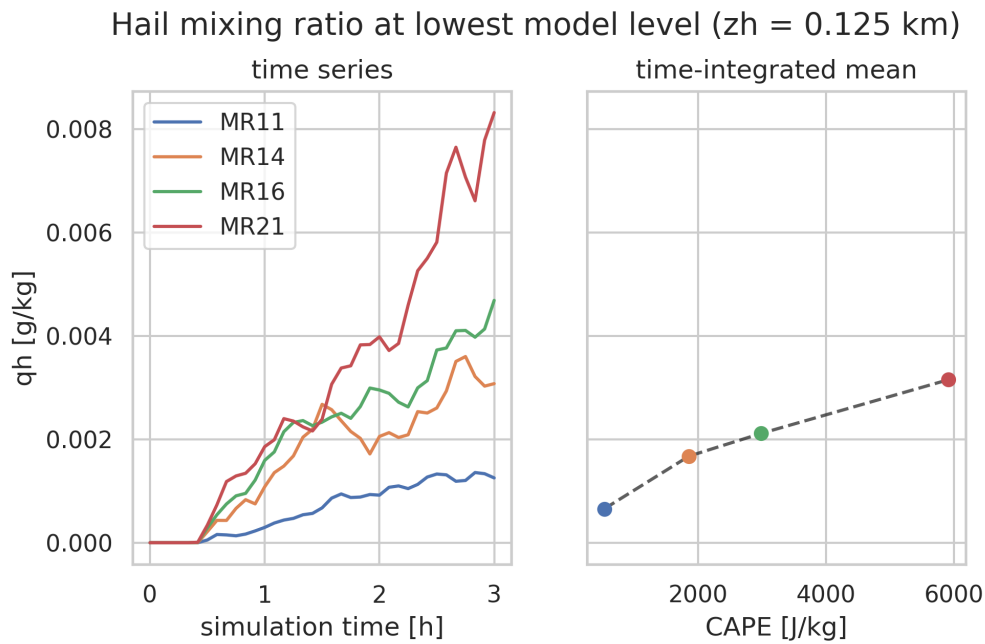


Abbildung 6: *Links:* Die zeitliche Entwicklung des gemittelten Mischungsverhältnisses q_h von Hagel zu trockener Luft für die CM1-Simulationen. *Rechts:* Das zeitliche Mittel $\overline{q_h}$ als Funktion des CAPE. In beiden Fällen wird q_h ausschließlich auf dem niedrigsten Modellniveau berücksichtigt.

Simulation erfährt eine Verringerung von q_h für etwa 30 min, während MR21 ab diesem Zeitpunkt einen raschen Zuwachs an Hagel im bodennahen Bereich liefert. Darüber hinaus zeigt der rechte Subplot in Abb. 6 einen Anstieg des zeitlich sowie räumlich integrierten Mittels $\overline{q_h}$ mit zunehmendem CAPE, wobei dies für die Simulationen MR14-MR21 einem linearen Zusammenhang ähnelt.

Der zugrundeliegende Code dieser Analyse befindet sich auf [GitHub](https://github.com/vegan-schnitzel/hail-supercells)². Einige der Abbildungen wurden mithilfe der python-Bibliothek *MetPy* erstellt [8].

²<https://github.com/vegan-schnitzel/hail-supercells>

4 Diskussion

In dieser Studie wurden vier CM1-Simulationen mit unterschiedlichem Mischungsverhältnis q_v bzw. CAPE durchgeführt, um die Entstehung und insbesondere die Präsenz von Hagel im bodennahen Modellniveau zu untersuchen. In den Simulationen entstehen mehrere Superzellen, wofür vor allem das verwendete Sounding von Weisman und Klemp [6] im Zusammenspiel mit der Scherung des Windes verantwortlich ist. Allerdings werden die Gewittergebilde verbreiteter, je höher das CAPE ist. Gleiches gilt für den $w \geq 20 \text{ m s}^{-1}$ Aufwindbereich, welcher zusätzlich vor allem in der zweiten Simulationshälfte deutliche Größenunterschiede zwischen den Simulationen aufweist (vgl. Abb. 5 unten). Die erhöhten Vertikalgeschwindigkeiten bei größerem CAPE sind dagegen schon kurz nach Simulationsstart nachzuweisen (vgl. Abb. 5 oben).

Die zeitliche Entwicklung des Hagel-Mischungsverhältnisses q_h ähnelt konzeptionell eher dem Größenverlauf des Aufwindbereichs. Diese Tatsache legt nahe, dass die höhere Menge an bodennahem Hagel auf räumlich ausgeprägtere Superzellen mit insgesamt größerer Aufwindzone zurückzuführen ist und schnellere Vertikalwinde eine untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt bleibt jedoch festzuhalten, dass für die CM1-Simulationen mit höherem CAPE über die gesamte Simulationsdauer und Domain gemittelt mehr Hagel am Boden nachweisbar ist. Eine quantitative Analyse einzelner Aufwindschlots gleicher Fläche der unterschiedlichen Simulationen könnte die Ursache(n) für die Zunahme von q_h weiter beleuchten.

Literatur

- [1] „Das größte Hagelkorn der USA ist fast so groß wie ein Handball“. In: *Spektrum* (5. Aug. 2003). URL: <https://www.spektrum.de/news/das-groesste-hagelkorn-der-usa-ist-fast-so-gross-wie-ein-handball/621745> (besucht am 22.03.2024).
- [2] E. P. Krider. „Supercell storms“. In: *Britannica* (25. Feb. 2024). URL: <https://www.britannica.com/science/thunderstorm/Supercell-storms> (besucht am 22.03.2024).
- [3] G. H. Bryan und J. M. Fritsch. „A Benchmark Simulation for Moist Nonhydrostatic Numerical Models“. In: *Monthly Weather Review* 130.12 (Dez. 2002), S. 2917–2928. ISSN: 1520-0493. DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<2917:absfmn>2.0.co;2.
- [4] M. L. Weisman und R. Rotunno. „The Use of Vertical Wind Shear versus Helicity in Interpreting Supercell Dynamics“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 57.9 (Mai 2000), S. 1452–1472. ISSN: 1520-0469. DOI: 10.1175/1520-0469(2000)057<1452:tuovws>2.0.co;2.
- [5] H. Morrison u. a. „A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 62.6 (Juni 2005), S. 1665–1677. ISSN: 0022-4928. DOI: 10.1175/jas3446.1.
- [6] M. L. Weisman und J. B. Klemp. „The Dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy“. In: *Monthly Weather Review* 110.6 (Juni 1982), S. 504–520. ISSN: 1520-0493. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:tdonsc>2.0.co;2.
- [7] Y. Lin und M. R. Kumjian. „Influences of CAPE on Hail Production in Simulated Supercell Storms“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 79.1 (Jan. 2022), S. 179–204. ISSN: 1520-0469. DOI: 10.1175/jas-d-21-0054.1.
- [8] R. May u. a. *MetPy*. 2016. DOI: 10.5065/D6WW7G29.