

Analyse und Modellierung des Einflusses von ultrafeinen Partikeln auf die Entstehung von Starkregen auf der Basis von Open-Data Umweltdaten

Franziska Raabe¹, Stefanie Steinbichl¹, Jochen Wittmann¹

¹Hochschule für Technik und Wirtschaft, Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin

Abstract. Die Untersuchung des Einflusses ultrafeiner Partikel (UFP) auf Starkregenereignisse zeigt eine komplexe Beziehung zwischen Atmosphärenzusammensetzung und Wetterphänomenen auf. Basierend auf einer Analyse von Starkregendaten aus der Region um den Flughafen Frankfurt am Main und UFP-Messwerten aus dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie wird diskutiert, wie UFP den hydrologischen Kreislauf beeinflussen können. Obwohl eine direkte Korrelation nicht eindeutig festgestellt werden konnte, liefert die Tagesmittelwertanalyse Hinweise auf einen potenziellen Zusammenhang zwischen erhöhten UFP-Werten und bevorstehenden Starkregenereignissen. Weitere umfangreichere Analysen sind erforderlich, um diese Vermutungen zu bestätigen und die Auswirkungen von UFP auf den Wasserkreislauf besser zu verstehen.

Einleitung

Extremwetterereignisse wie Starkregen und anhaltende Dürreperioden nehmen weltweit zu. Eine wegweisende Studie von Forschenden des Karlsruher Instituts für Technologie und des unabhängigen Forschungsinstituts Airborne Research Australia untersucht den Zusammenhang zwischen Ultrafeinstaub bzw. ultrafeinen Partikeln (UFP) in der Atmosphäre und ihre invasive Wirkung auf den hydrologischen Kreislauf, insbesondere die Wolkenphysik und Regenbildung. Die Studie hebt hervor, dass anthropogene UFP-Emissionen eine Veränderung von Niederschlagsmustern verursachen und durch ihre Wirkung als Wolkenkondensationskeime Starkregenereignisse begünstigen können [1]. Zusätzlich wurde bereits belegt, dass sich die Anzahl an UFP in den letzten Jahrzehnten stark erhöht hat [2].

Unter Feinstaub versteht man luftgetragene Aerosolpartikel in Form von Staubteilchen oder Tröpfchen bestimmter Größe, die mehrere Tage in der Atmosphäre schweben können, bevor sie zu Boden sinken [3]. Je nach aerodynamischem Durchmesser der Partikel wird Feinstaub üblicherweise in die Kategorien PM₁₀ (PM = particulate matter, Durchmesser < 10 µm) und PM_{2,5} (Durchmesser < 2,5 µm) eingeteilt. UFP sind mit einem Durchmesser von maximal 100 nm im Vergleich bis zu tausendmal kleiner als PM₁₀-Teilchen und entstehen vor allem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Abgasreinigungsanlagen und Großfeuerungsanlagen sowie im Flug- und Schiffsverkehr. Aufgrund ihrer geringen Größe können UFP sehr tief in den menschlichen Körper bis in das Lungengewebe und den Blutkreislauf eindringen, wo sie mutmaßlich Lungen- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sowie Demenz, Alzheimer und Parkinson verursachen können [2][4][5].

Starkregen bezeichnet ein Wetterphänomen, bei dem in kurzer Zeit eine große Menge an Niederschlag meist aus konvektiver Bewölkung (wie z.B. Cumulonimbuswolken) auf kleinem Raum fällt. Dieser kann Überschwemmungen, Erdbeben oder Sturzfluten verursachen, die dann wiederum enorme Schäden an Umwelt, Gebäuden und Infrastruktur zur Folge haben. Daher gibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) beginnend bei Regengängen von 15 Litern pro Quadratmeter innerhalb einer Stunde bzw. von 20 Litern in sechs Stunden Unwetterwarnungen heraus [6].

Die Auswirkungen des Klimawandels spielen eine nicht unerhebliche Rolle bei der Häufigkeit und dem Ausmaß dieser extremen Niederschläge. Laut einer Studie der World Weather Attribution hat sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Starkregenereignissen in Deutschland und einigen angrenzenden Ländern

aufgrund der durch den Menschen verursachten globalen Erwärmung um das 1,2- bis 9-fache erhöht. Ebenso steigerte sich die Intensität von Starkregenfällen im Umfang von 3 bis 19 % im betrachteten Gebiet [7]. Die sich aufgrund des Kohlendioxidgehalt erwärmende Atmosphäre und ihre somit erhöhte Wasserdampfkapazität allein können die Zunahme und die hohe Variabilität in der Häufigkeit und der Verteilung von Starkregenfällen allerdings nicht zufriedenstellend erklären, da Kohlendioxid aufgrund seiner langen Lebensdauer räumlich relativ gleichmäßig verteilt ist. Hierfür ist die Einbeziehung des Wasserkreislaufs erforderlich [8].

1 Problemstellung

Aufgrund ihres Einflusses auf die Menge und Größe von Wassertröpfchen bei der Wolkenbildung in der Atmosphäre können UFP den hydrologischen Kreislauf stören, indem sie Niederschlag verzögern. Normalerweise sammeln sich Wassertröpfchen mit einem Durchmesser von ca. 0,01 bis 0,25 mm um einen Wolkenkondensationskern bzw. Cloud Condensation Nuclei (CCN), der selbst über eine Größe von ca. 0,0002 mm verfügt. Sobald sich genügend Wassertröpfchen akkumuliert und zusammen mit dem CCN eine Größe von 1 bis 2 mm erreicht haben, können diese als Regentropfen zur Erde fallen, da dann die Fallgeschwindigkeit größer ist als die Aufwindgeschwindigkeit in einer Wolke. Die UFP eignen sich allerdings nicht als CCN. Dies liegt zum einen an ihrer geringen Größe und zum anderen an ihrer stark gekrümmten Oberfläche, auf der das Wasser zu schnell verdunstet. So bleiben die akkumulierten Tropfen lange Zeit zu klein und können aufgrund des Luftwiderstands auch nicht abregnen. Durch diesen Vorgang entsteht ein zusätzliches Energiereservoir in der mittleren Troposphäre, das extreme Regenfälle begünstigt. Wenn sich die stark angereicherten Wolken schließlich abregnen, sind diese Niederschläge drastisch stärker und wasserreicher. Gebiete mit stark erhöhten UFP-Werten zeigen zunehmend extreme Starkregenfälle und weniger Gesamtniederschlag auf [1][2][9].

Im Folgenden soll anhand eines konkreten Beispiels untersucht werden, inwieweit erhöhte UFP-Werte in der Atmosphäre mit dem Auftreten von besonders intensiven Starkregenereignissen in einer ausgewählten Region zusammenhängen könnten. Als Untersuchungsgebiet dient die Region Flughafen Frankfurt am Main, zum einen, da Turbinen-Abgase der Flugzeuge bei Betrieb am Boden

als ein Hauptemittent von UFP nachgewiesen wurden [10]. Zum anderen, da diese Region eine der wenigen in Deutschland ist, in der überhaupt kontinuierliche Messungen zu UFP-Werten durchgeführt werden. Dieser Sachverhalt ist nicht zuletzt auf die fehlende gesetzliche Regulierung von UFP-Emissionen zurückzuführen [11].

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, den beschriebenen Zusammenhang zwischen UFP und der Entstehung von Starkregen anhand von frei verfügbaren Daten nachzuvollziehen mit der Perspektive, mittelfristig online zugängliche Daten automatisch auszuwerten und in einem GIS-Dashboard zu visualisieren. So könnten Zusammenhänge umfassender analysiert und die Ergebnisse anschaulich präsentiert werden.

2 Datenmaterial

Die Erfassung von UFP-Werten erfordert eine spezielle Messtechnik, da die Teilchen aufgrund ihrer geringen Größe kaum zu den Partikelmassen der größeren Feinstaubklassen $PM_{2,5}$ und PM_{10} beitragen [12]. Statt Massenbestimmung werden daher Vorrichtungen zur Partikelzählung eingesetzt [13]. Als Quelle für die in der Untersuchung verwendeten UFP-Werte diente das Messdatenportal des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), das seit 2015 an einer variierenden Anzahl von Luftmessstationen UFP-Daten auf dem Gelände des Frankfurter Flughafens und in seiner Umgebung erhebt [14]. Dabei findet eine Kategorisierung nach Partikelgrößen zwischen 10 bis 500 nm statt. In der Untersuchung wurden die Partikelgrößen von 10 bis 100 nm betrachtet, da diese der gängigen Größendefinition von UFP entsprechen. Darunter wird dem Flugverkehr vor allem die Emission von UFP der Größe 10 bis 30 nm zugeschrieben [13].

Die für die Untersuchung verwendeten Starkregendaten stammen aus dem Katalog der Starkregenereignisse des DWD („Catalogue of Radar-based heavy Rainfall Events“ bzw. CatRaRE) [15]. In diesem Katalog sind alle Starkregenereignisse in Deutschland seit 2001 verzeichnet. Im Gegensatz zu großräumigen, länger anhaltenden Niederschlägen sind die örtlich und zeitlich meist eng begrenzten Starkregenfälle schwieriger zu messen. Um verwertbare Daten zu erhalten, verwendet der DWD daher Wetterradare, die Dauer und Intensität der Niederschläge flächendeckend erfassen können, auch abseits der regulären Messstationen durch permanentes Scannen der

Umgebung in großem Umfang um das Radargerät. Anschließend werden die Datensätze in einer mehrstufigen Qualitätskontrolle klimatologisch aufbereitet [16].

3 Methoden

Zunächst wurden die Starkregendaten in ArcGis importiert und nach dem ausgewählten Beobachtungszeitraum gefiltert. Aufgrund der besseren Datenkonsistenz wurde für die Untersuchung der Zeitraum vom 01.05.2020 bis 23.12.2022 gewählt. Zudem wurden auf Basis folgender Attribute die intensivsten Starkregenereignisse selektiert: maximaler Niederschlag innerhalb der Ereigniszone (RRmax), maximaler Starkregenindex (SRImax) und Dauerstufe des Ereignisses (Duration) (vgl. Abb.1).

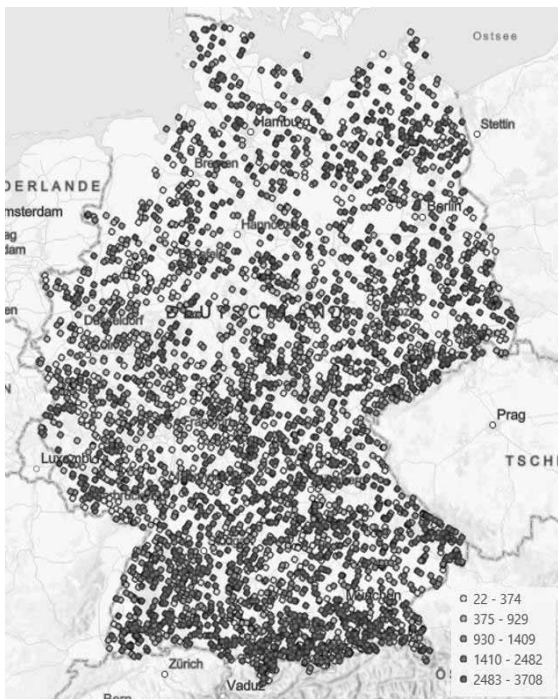


Abb. 1: Anzahl der intensivsten Starkregenereignisse in Deutschland vom 01.05.2020 bis 23.12.2022

Anschließend wurde um den Flughafen Frankfurt am Main ein Puffer von 50 km gelegt und dieser Polygon-Layer mit dem Punkte-Layer der ausgewählten Starkregenereignisse paarweise überschritten (vgl. Abb. 2).

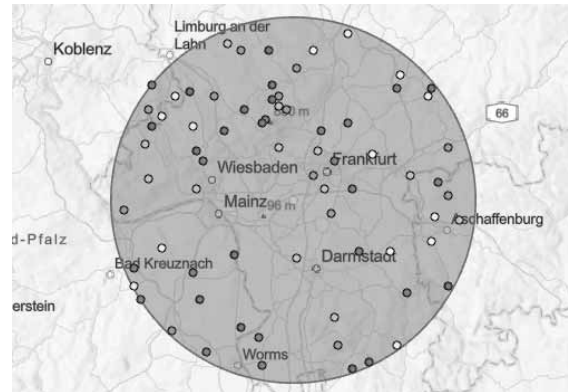


Abb. 2: Intersect von Puffer-Layer (50 km um Flughafen Frankfurt a.M.) und Starkregenereignissen

Aus den identifizierten intensivsten Starkregenereignissen in der betrachteten Region wurden im nächsten Schritt jeweils zwei Ereignisse für die Jahre 2020, 2021 und 2022 für die Stichprobenbetrachtung ausgewählt und die UFP-Messwerte der sieben Tage vor Eintreten des Starkregenereignisses importiert, wobei das Starkregenereignis im Laufe des siebten Tages (Tag 0) stattfand. Für jede Partikelgrößenkategorie wurde pro Messzeitraum das obere und untere Quartil sowie der jeweilige Tagesmittelwert bestimmt, um Aussagen über eine Verteilung der höheren und niedrigeren UFP-Messwerte in den Tagen vor dem Starkregenereignis treffen zu können (vgl. Abb. 3 bis 6).

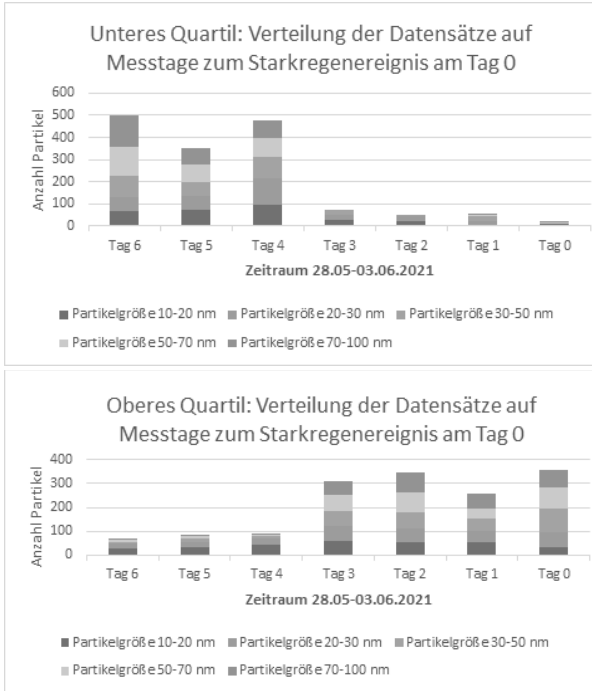


Abb. 3: Diagramme zur Verteilung der Datensätze je Messtag jeweils im unteren Quartil (Anteil Messungen mit geringsten UFP-Werten) und im oberen Quartil (Anteil Messungen mit höchsten UFP-Werten) für den Messzeitraum vom 28.05.2021 bis 03.06.2021 je Partikelgrößenkategorie

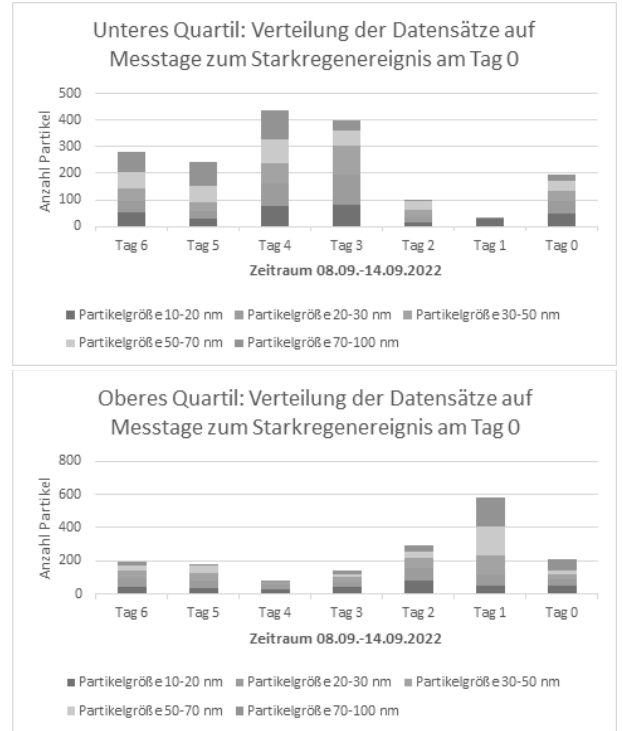


Abb. 5: Diagramme zur Verteilung der Datensätze je Messtag jeweils im unteren Quartil (Anteil Messungen mit geringsten UFP-Werten) und im oberen Quartil (Anteil Messungen mit höchsten UFP-Werten) für den Messzeitraum vom 08.09.2022 bis 14.09.2022 je Partikelgrößenkategorie

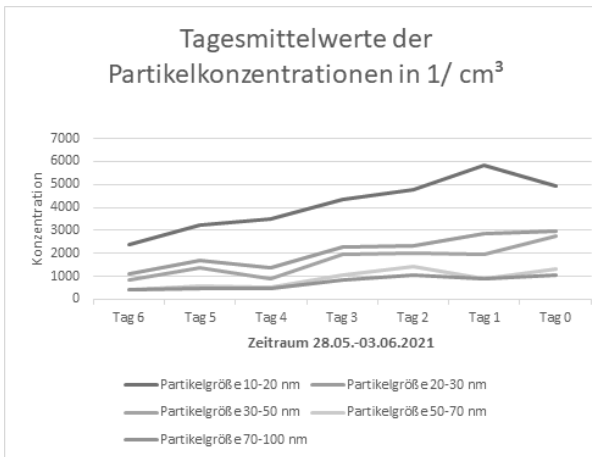


Abb. 4: Verlaufskurve der Tagesmittelwerte je Partikelgrößenkategorie für den Messzeitraum vom 28.05.2021 bis 03.06.2021

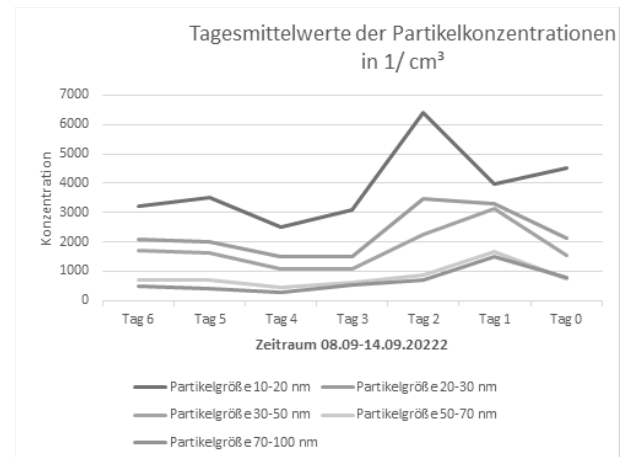


Abb. 6: Verlaufskurve der Tagesmittelwerte je Partikelgrößenkategorie für den Messzeitraum vom 08.09.2022 bis 14.09.2022

4 Resultate

In den exemplarisch dargestellten Messzeiträumen vom 28.05.2021 bis 03.06.2021 (vgl. Abb. 3 und 4) und vom 08.09.2022 bis 14.09.2022 (vgl. Abb. 5 und 6) verteilen sich die UFP-Werte in allen Partikelgrößenkategorien tatsächlich so, dass die geringeren Konzentrationen hauptsächlich zu Beginn des Zeitraums erfasst wurden (Linkslastigkeit im unteren Quartil) und die hohen Konzentrationen vermehrt zum Ende des Zeitraums (Rechtslastigkeit im oberen Quartil) auftreten. Dieses Phänomen zeigte sich auch in einigen der anderen analysierten Stichproben, allerdings nicht in einem Umfang, dass hieraus auf eine eindeutige Tendenz oder Regelmäßigkeit geschlossen werden konnte. Das Verhalten der Quartilerfassungen erwies sich vielmehr als unvorhersehbar, da sich die Messwerterfassungen je Datensatz auf sehr unterschiedliche Weise verteilten.

In der Analyse der Tagesmittelwerte der jeweiligen UFP-Konzentrationen konnte unter 30 erstellten Kurven in 20 ein Anstieg der Werte in zeitlicher Nähe zum Starkregenereignis festgestellt werden. Dabei unterschieden sich die Kurven aber in ihrer Erscheinung. Einige wiesen z.B. Höhepunkte bereits zu Beginn des betrachteten Messzeitraums auf und enthielten somit eine Senke in der Mitte des Zeitraums. Andere stiegen kontinuierlich an, um dann zum Ende des Zeitraums wieder abzufallen. Generell konnte allerdings als Tendenz beobachtet werden, dass die meisten Kurven ein bis zwei Tage vor Aufkommen des Starkregenereignisses den höchsten Tagesmittelwert innerhalb des Messzeitraums aufwiesen.

5 Schlussfolgerungen

Ein direkter Zusammenhang zwischen erhöhter UFP-Belastung in der Atmosphäre und dem Auftreten von Starkregenereignissen konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht hinreichend nachgewiesen werden. Aufgrund der Komplexität von Wetter- bzw. Klimaphänomenen sind weitaus umfangreichere Analysen notwendig, die die Einbeziehung anderer beeinflussender Faktoren wie Höhendaten, Geländeprofile, Temperatur, genereller Niederschlag, Luftdruck oder Windbewegungen erfordern. Beispielsweise nehmen Wind und Niederschlag Einfluss auf die lokalen UFP-Konzentrationen. Ebenso können sich Wolken je nach Windstärke und -geschwindigkeit auch hunderte Kilometer entfernt abregnen, der Starkregen muss demnach nicht direkt in

der Region mit erhöhten UFP-Konzentrationen niedergehen [9].

Sicherlich kann insbesondere die Tagesmittelwertanalyse als Indiz dafür betrachtet werden, dass sich in der Zuspitzung auf ein Starkregenereignis eine Tendenz des Anstiegs von ermittelten UFP-Emissionen abzeichnet. Diese Untersuchung müsste allerdings in einem deutlich größeren Umfang stattfinden, um diese Vermutung zu bestätigen. Darüber hinaus sind für eine genauere Untersuchung auch Analysen an unterschiedlichen Orten notwendig, um nicht nur lokale Vergleiche anzustellen, sondern Ergebnisse aus unterschiedlichen Regionen mit sich ähnelnden geografischen Bedingungen miteinander in Beziehung setzen zu können.

Um eine umfassende Analyse der Zusammenhänge zwischen UFP-Belastung und Starkregenereignissen zu ermöglichen, könnte sich die Implementierung eines automatisierten Systems zur Auswertung und Visualisierung frei zugänglicher Daten über ein GIS-Dashboard eignen. Diese Herangehensweise würde es ermöglichen, nicht nur einzelne Datenpunkte zu untersuchen, sondern auch komplexe Muster und Trends in den Daten zu identifizieren sowie andere räumliche und zeitliche Skalierungen für eine Modellierung vorzunehmen. Dadurch könnten Zusammenhänge klarer dargestellt und besser verstanden werden, was wiederum eine fundiertere Grundlage für weitere Untersuchungen und Entscheidungsfindungen bieten würde. Darüber hinaus könnte ein solches System auch die Kommunikation und den Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Interessengruppen erleichtern, was entscheidend ist für die Entwicklung von Maßnahmen zur Eindämmung der potenziellen Auswirkungen von UFP auf den Wasserkreislauf und die Umwelt insgesamt.

Nicht zuletzt wegen der seit Jahren steigenden UFP-Belastung soll mit dieser Untersuchung eine erste Grundlage und ein Anreiz für weitergehende Analysen gelegt werden, um die möglicherweise drastischen Auswirkungen von UFP auf den Wasserkreislauf zu ermitteln und darauf aufbauend diese gezielt einschränken zu können, beispielsweise mit der Festlegung eines offiziellen UFP-Grenzwerts.

Literaturverzeichnis

- [1] Wolfgang Junkermann, Jorg Hacker. Unprecedented levels of ultrafine particles, major sources, and the hydrological cycle. *Sci Rep.* 2022; 12(7410): 1-8. doi: 10.1038/s41598-022-11500-5.

- [2] Alexander Freund. *Ultrafeinstaub für Wetterextreme mitverantwortlich*. Deutsche Welle. 2022. <https://www.dw.com/de/ultrafeinstaub-f%C3%BCr-wetterextreme-mitverantwortlich/a-61903127>. Stand: 06.09.2023.
- [3] Stefan Kinne, Johannes Quaas. Einfluss der Luftverschmutzung auf den Klimawandel – neue Erkenntnisse aus Satellitendaten und Klimamodellen. *Forschungsbericht 2007. Max Planck Institut für Meteorologie*. <https://www.mpg.de/405815/forschungsschwerpunkt>. Stand: 06.09.2023.
- [4] Initiative Klima-, Umwelt- und Lärmschutz e.V.. *Feinstaub und noch feinerer Staub – Ultrafeinstaub*. o.J.. <https://www.klima-umwelt-luftverkehr.de/umwelt/ultrafeinstaub/>. Stand: 22.08.2023.
- [5] Umweltbundesamt. *Feinstaub*. 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/feinstaub#undefined>. Stand:22.08.2023.
- [6] Deutscher Wetterdienst. *Wetter und Klimalexikon. Starkregen*. o.J.. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Func-tions/glossar.html?nn=103346&lv2=102248&lv3=102572>. Stand: 04.09.2023.
- [7] Frank Kreienkamp et al.. Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. *World Weather Attribution*. 2021: 1-51. <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>. Stand: 04.09.2023.
- [8] Karlsruher Institut für Technologie. Klimaforschung: Ultrafeinstaub könnte Wetterextreme verursachen. *Presseinformation 044/2022*. 2022. https://www.kit.edu/kit/pi_2022_044_klimaforschung-ultrafeinstaub-konnte-wetterextreme-verursachen.php. Stand: 06.09.2023.
- [9] Marina Weishaupt. Dürre und Starkregen: Fossile Brennstoffe verändern Wasserkreislauf. *National Geographic*. 2022. <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2022/05/duerre-und-starkregen-fossile-brennstoffe-veraendern-wasserkreislauf>. Stand: 06.09.2023.
- [10] Umweltbundesamt. *Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potentielle Belastung in der Nähe zu beschreiben - unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe*. 2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/14_2021_texte_grossflughafen_.pdf. Stand: 25.04.2024.
- [11] Umweltbundesamt. *Fragen und Antworten: Ultrafeine Partikel*. 2018. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/feinstaub/fragen-antworten-ultrafeine-partikel>. Stand: 25.04.2024.
- [12] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. *Ultrafeine Partikel*. 2023. <https://www.hlnug.de/themen/luft/luftqualitaet/sondermessprogramme/ultrafeine-partikel>. Stand: 06.09.2023.
- [13] Karl-Heinz Peil. Ultrafeine Partikel (UFP): Flugverkehr und Gesundheit. *Fakten - kurz und bündig erstellt vom BUND AK Luft/Klima/Lärm Hessen*. 2021. https://www.bund-hessen.de/fileadmin/hessen/Publikationen/Arbeitskreise/AK-Luft-Klima-Laerm/2021-02_BUND-Hessen_FactSheet_Ultrafeine-Partikel_final.pdf. Stand: 06.09.2023.
- [14] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Messdatenportal. 2023. <https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal/ufp>. Stand: 06.09.2023.
- [15] Katharina Lengfeld, Ewelina Walawender, Tanja Winterath, Elmar Weigl, Andreas Becker. *Starkregenereignisse Version 2023.01 mit Überschreitung der DWD-Warnstufe 3 für Unwetter basierend auf RADKLIM-RW Version 2017.002 Parameter und Polygone der Starkregenereignisse in Deutschland version v2023.01.* Deutscher Wetterdienst. 2023. doi:10.5676/DWD/CatRaRE_W3_Eta_v2023.01.
- [16] Tanja Winterrath. Niederschlagsklimatologie: Daten und Produkte - Mit Radardaten in die nächste Dimension. Deutscher Wetterdienst. 2021. https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/klima/radklim_broschuere.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Stand: 06.09.2023.