

Thunderstorm Asthma in der Region Augsburg

Annette Straub, Stefanie Seubert, Athanasios Damialis, Franziska Kolek, Daniela Bayr, Michael Gerstlauer, Christoph Beck und Andreas Philipp

Inhaltsübersicht

0. Einleitung	345
1. Datengrundlage und Vorgehen	349
2. Regionale Gewitter- und Asthmastatistik	352
3. Wetterlagenklassifikationen	354
4. Statistische Zusammenhangsanalyse	358
5. Zusammenfassung und Ausblick	361
Danksagung	361
Finanzierung	361
Literatur	362

0. Einleitung

Im zeitlichen und räumlichen Umfeld von Gewittern können erhöhte Anzahlen zum Teil schwerer Asthmaanfälle auftreten, ein Phänomen, das als *Thunderstorm Asthma* bzw. gewitterbedingtes Asthma bezeichnet wird.¹ Studien extremer *Thunderstorm Asthma*-Ereignisse aus Kanada², Italien³, Großbritannien⁴, Australien⁵ und dem Iran⁶ zeigen teilweise um 5- bis 10-fach erhöhte Zahlen asthmabedingter Notfälle. Beim bislang stärksten dokumentierten Event dieser Art, das sich im November 2016 in Melbourne

1 Grundstein/Sarnat 2009: 45.

2 Wardmann et al. 2002.

3 D'Amato et al. 2008; Losappio et al. 2011.

4 Packe/Ayres 1985; Alderman et al. 1986; Celenza et al. 1996; Pulimood et al. 2007; Elliot et al. 2014.

5 Bellomo et al. 1992; Girgis et al. 2000.

6 Forouzan et al. 2014.

ereignet hat, zog ein heftiger Gewittersturm mit Böenfront über die Stadt. Hiermit verbunden war eine plötzliche Abnahme der Lufttemperaturen um 10° C und eine Zunahme der relativen Luftfeuchte auf ca. 80 %. Hinzu kamen Grenzwertüberschreitungen der PM₁₀-Konzentrationen (Feinstaub der Fraktion mit aerodynamischem Durchmesser kleiner als 10 µm) mit Maxima von 942,5 µg/m³ sowie ein massiver Anstieg der Pollenkonzentrationen, insbesondere von Gräsern, deren Wachstum durch feuchte Verhältnisse in den vorausgehenden Wochen begünstigt war. Infolgedessen wurden 3.500 Patienten in Notaufnahmen registriert, wodurch die medizinische Notfallversorgung überfordert war, es kam zu 10 Todesfällen. Betroffen waren, wie auch bei anderen *Thunderstorm Asthma*-Ereignissen, neben Asthmapatienten auch Pollenallergiker ohne vorherige Asthmadiagnose.⁷ Die Anzahl der Patienten wird jedoch möglicherweise unterschätzt, wenn nur Notrufzahlen berücksichtigt werden, da davon auszugehen ist, dass sich ein Teil der Betroffenen selbst behandelt hat, anstatt einen Arzt aufzusuchen.⁸ Zudem mussten neben einem Anstieg der Patientenzahlen in den Notaufnahmen bei einem *Thunderstorm Asthma*-Ereignis in Großbritannien auch deutlich mehr Asthmafälle beim ärztlichen Bereitschaftsdienst⁹ sowie in Praxen niedergelassener Ärzte¹⁰ behandelt werden, es wurden also Auswirkungen auf die gesamte Gesundheitsversorgung festgestellt. Abgesehen von derartigen, relativ seltenen Extremereignissen wurden jedoch bereits generell erhöhte Auftretishäufigkeiten von Asthma an Gewittertagen verglichen mit Tagen ohne Gewitter beobachtet.¹¹

Welche Prozesse genau zu *Thunderstorm Asthma* beitragen ist noch nicht eindeutig geklärt. Häufig genannt wird ein Zusammenspiel verschiedener meteorologischer Mechanismen, die zu einem Anstieg der Allergenkonzentrationen führen und in Abbildung 1 schematisch dargestellt sind. Während die Produktion von Pollen und Pilzsporen vor allem von der Jahreszeit sowie den Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen über einen längeren Zeitraum abhängt, ist deren Freisetzung oftmals durch die Windgeschwindigkeit bedingt, bei einigen Pilzarten auch durch zeitnahen Niederschlag, momentane relative Feuchte und Lufttemperatur. Demnach kommt es durch böige Winde bei Gewittern zu einer verstärkten Freisetzung und dem Transport von Bioaerosolen.¹² Intakte Pollenkörner, die oft

7 Thien et al. 2018: 257 ff., 261.

8 Clayton-Chubb et al. 2019: 76.

9 Higham et al. 1997: 237.

10 Hajat et al. 1997: 639.

11 Anderson et al. 2001: 432; Dales et al. 2003: 748; Grundstein et al. 2008: 660.

12 Taylor/Jonsson 2004: 411; Grundstein/Sarnat 2009: 52.

mehr als 20 µm im Durchmesser betragen, können aufgrund ihrer Größe nicht in die tieferen Atemwege gelangen.¹³ Sie können jedoch durch Aufwinde in die Gewitterwolke gelangen und dort im Kontakt mit Regentropfen oder bereits an der Pflanze im Kontakt mit Feuchtigkeit sowohl osmotisch bedingt aufplatzen als auch aufkeimen.¹⁴ Laborexperimente ergeben, dass dadurch aus einem einzigen Gras-Pollenkorn bis zu 700 lungengängiger Fragmente in der Größenordnung zwischen 0,6 µm und 2,5 µm freigesetzt werden können. Die Konzentrationen solcher Partikel waren bei Messungen während der Pollensaison an Tagen nach Niederschlagsereignissen um das 50-fache erhöht.¹⁵ Aber auch bei Birken-, Erlen- und Haselpollen konnte die Freisetzung von lungengängigen Pollenfragmenten gezeigt werden.¹⁶ Hinzu kommt möglicherweise eine effektivere Freisetzung von Partikeln aus Pollenkörnern durch den Kontakt mit dem elektrischen Feld im Zuge des Gewitters¹⁷ sowie die rein mechanische Beschädigung der Pollenkörner durch den Aufprall auf feste Oberflächen im Zusammenhang mit windgetragenem Transport¹⁸. Neben den bereits genannten Pollenarten werden auch Olive¹⁹ und *Parietaria* (Glaskräuter) sowie Pilzsporen, insbesondere der Arten *Alternaria*, *Cladosporium* und *Didymella*, als bedeutsam angesehen.²⁰ In Kombination mit den relativ kühlen, trockenen Abwinden der Gewitterzelle, die eine Konzentration der Pollen und Sporen sowie deren Fragmente in bodennahen Luftschichten bewirken, führt dies zu einer starken Erhöhung der Allergengehalte und damit einer Verschärfung der Expositionssituation für Allergiker.²¹ Das elektrische Feld könnte zusätzlich zur Verstärkung der allergischen Reaktionen beitragen, da sich positive Ionen an die Aerosole anlagern können und diese geladenen Partikel verstärkt im Lungengewebe abgelagert werden.²² Dass *Thunderstorm Asthma* ein saisonales Phänomen ist, das meist während der Pollensaison auftritt, spricht für diese Mechanismen.

13 Taylor et al. 2002: 51.

14 Suphioglu et al. 1992: 569; Taylor et al. 2002: 55; Grote et al. 2003: 1020; Taylor/Jonsson 2004: 410.

15 Suphioglu et al. 1992: 571f.

16 Grote et al. 2003: 1020; Taylor et al. 2004: 1595.

17 Vaidyanathan et al. 2006: 157.

18 Visez et al. 2015: 81.

19 Losappio et al. 2011: 1511.

20 Packer/Ayres 1985: 202; Dales et al. 2003: 748f.; Pulimood et al. 2007: 615; D'Amato et al. 2016a: 392f.

21 Marks et al. 2001: 471; Taylor/Jonsson 2004: 412.

22 O'Leary et al. 2005: 781.

Andererseits wurden erhöhte Konzentrationen von Bioaerosolen nicht bei allen *Thunderstorm Asthma*-Ereignissen festgestellt.²³ Möglich sind daher auch andere Erklärungen. Beispielsweise entsteht bei Gewitterblitzen natürlicherweise NO_2 (Stickstoffdioxid), das sowohl selbst ein Reizgas als auch eine Vorläufersubstanz für die Bildung troposphärischen Ozons (O_3) ist. Die Konzentrationen beider Gase können daher durch Gewitter erhöht werden²⁴ und zu erhöhten Asthmahäufigkeiten beitragen²⁵.

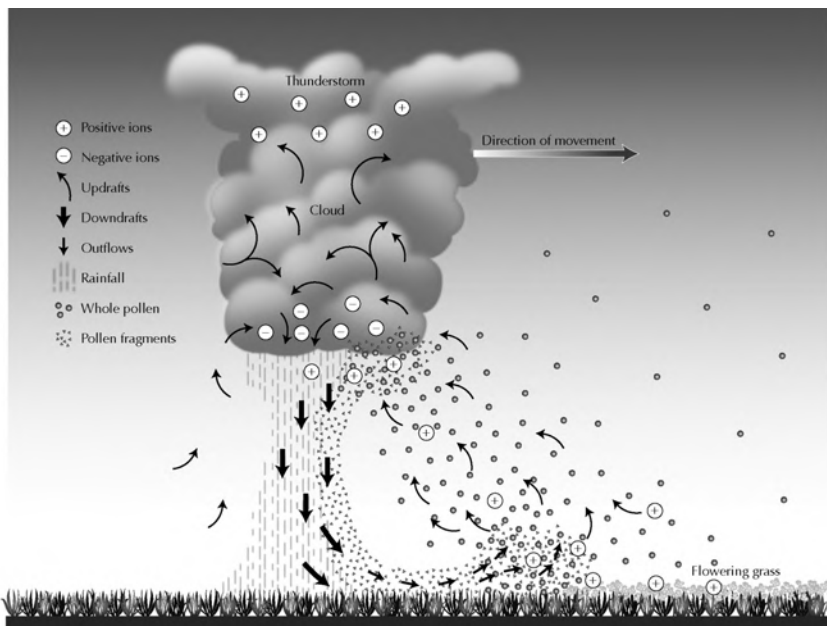


Abb. 1: Schematische Darstellung möglicher Mechanismen zur Erklärung des Zusammenhangs zwischen Gewittern und Asthma (Quelle: Taylor/Jonsson 2004: 412).

In Mitteleuropa gehört Süddeutschland zu den Regionen mit der höchsten Gewittertätigkeit.²⁶ In Folge des Klimawandels wird zudem eine regionale Zunahme der Gewitteraktivität im Alpenraum erwartet.²⁷ Eine Zunahme

23 Anderson et al. 2001: 432.

24 Bond et al. 2001: 708; Kaynak et al. 2008: 5154ff.

25 Cecchi et al. 2013: 106.

26 Wapler 2013: 177ff.

27 Schefczyk/Heinemann 2017: 6.

der Häufigkeit von Allergien und Asthmaerkrankungen wird in Industrieländern bereits beobachtet und teilweise begründet durch ein Zusammenspiel verschiedener Umweltfaktoren, insbesondere Temperatur und Luftqualität, die durch die zunehmende Urbanisierung und den Klimawandel beeinflusst werden.²⁸ Im Zusammenhang mit *Thunderstorm Asthma* sind die Effekte von Umwelteinflüssen auf die Aeroallergene hervorzuheben. Temperatur, Wasserverfügbarkeit und CO₂-Konzentrationen beeinflussen die Pflanzenbiologie und die Phänologie direkt. Zu erwarten sind daher Veränderungen in der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Aeroallergenen, die eine Erhöhung der Pollenkonzentrationen, eine Verlängerung der Pollensaison, eine Zunahme der Ereignisse mit besonders hohen Konzentrationen sowie Veränderung des Artenspektrums durch Anpassung der Habitate der Pflanzen beinhalten können. Eine Zunahme der Allergengehalte in Pollenkörnern kommt in Folge erhöhter CO₂-Konzentrationen sowie höherer Lufttemperaturen außerdem hinzu.²⁹

Studien zum *Thunderstorm Asthma*-Risiko existieren für Mitteleuropa nach Kenntnisstand der Autoren bisher nicht. Ziel des Forschungsprojekts *Thunderstorm Asthma in der Region Augsburg* ist es, den statistischen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Gewittern und erhöhten Asthma-Aufttrittshäufigkeiten in Bayern, mit Fokus auf die Region Augsburg, zu quantifizieren.

Kooperationspartner sind die Universität Augsburg, Lehrstuhl für Physische Geographie mit Schwerpunkt Klimaforschung (Leitung PD Dr. Andreas Philipp) und das Wissenschaftszentrum Umwelt (PD. Dr. Jens Soentgen), das Universitätsklinikum Augsburg, II. Klinik für Kinder und Jugendliche (Dr. Michael Gerstlauer) sowie die Technische Universität München, Universitäres Zentrum für Gesundheitswissenschaften am Klinikum Augsburg (Dr. Athanasios Damialis).

1. Datengrundlage und Vorgehen

Um den Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Gewittern und erhöhten Asthma-Aufttrittshäufigkeiten in Bayern zu untersuchen, werden meteorologische Daten, Pollen- und Pilzsporendaten sowie Gesundheitsdaten miteinander verknüpft.

28 Andrae et al. 1988: 478; Cecchi et al. 2013: 107; D'Amato et al. 2016b: 393f.

29 Cecchi et al. 2013: 107ff.

Basierend auf Blitzdaten der Firma Siemens für den süddeutschen Raum für den Zeitraum von 1992 bis 2017 und flächendeckenden Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (Radolan) für die Jahre 2005 bis 2017 wird Gewittertätigkeit und deren Maxima detektiert und Zeitreihen von Gewittertagen und -ereignissen berechnet. Ein Gewittertag wurde hierbei als ein Tag mit mindestens einem Wolke-Boden-Blitz im Umkreis von 20 km um einen Ort definiert und bezieht sich somit auf die Hörweite des Donners.³⁰ Eine Vielzahl meteorologischer Parameter zur Charakterisierung der großräumigen atmosphärischen Zirkulation (Geopotentielle Höhe (Höhe der Flächen gleichen Luftdrucks), Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windverhältnisse) und der Schichtungsstabilität (Höhe der planetaren Grenzschicht, CAPE-Index, *Lifted Index*, *Convective Inhibition*, vertikale Windscherung) steht flächendeckend aus dem *Global Forecast System* der NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) zur Verfügung. Der CAPE-Index (*convective available potential energy*) misst die Energie, die in der Atmosphäre zur konvektiven Hebung eines Luftpaketes zur Verfügung steht, hängt von der Temperaturschichtung und dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ab und ist ein Maß für die Gewitterneigung, wobei höhere Werte auf höhere Gewitterwahrscheinlichkeit hindeuten.³¹ Der *Lifted Index* berechnet sich aus der Temperaturdifferenz zwischen einem Luftpaket, das ohne Austausch mit der Umgebung auf ein bestimmtes Niveau angehoben wird, und der dortigen Umgebungsluft und ist ebenfalls ein Maß für die Stabilität der atmosphärischen Schichtung. Negative Werte des *Lifted Index* treten bei labiler Schichtung auf, positive bei stabiler Schichtung.³² Die *Convective Inhibition* (Konvektionshemmung) beschreibt die Stärke der Energie, die ein Luftpaket am Aufstieg hindert, bei größeren Werten sind Gewitter unwahrscheinlicher.³³ Die vertikale Windscherung ist die Änderung des Windvektors (bestehend aus Windgeschwindigkeit und -richtung) mit der Höhe und spielt für die Intensität und die Lebensdauer von Gewitterzellen eine wichtige Rolle.³⁴ Zur Beschreibung der lokalen Situation werden darüber hinaus Wetterdaten der bayerischen Messstationen des Deutschen Wetterdienstes einbezogen.

30 Reap/Orville 1990: 94; Finke/Hauf 1996: 370.

31 Moncrieff/Miller 1976: 380.

32 Galway 1956: 528.

33 Colby 1984: 2240.

34 Klose 2008: 297.

Die Allergengehalte der Umgebungsluft für Augsburg werden aus gemessenen Pollen- und Pilzsporenkonzentrationen abgeschätzt. Diese mit Pollenfallen nach dem Hirst-Prinzip³⁵ durch das Universitäre Zentrum für Gesundheitswissenschaften am Klinikum Augsburg (UNIKA-T) gesammelten und manuell ausgezählten Daten differenzieren die in Bezug auf Allergien relevanten Pollen- und Pilzsporen-Arten und liegen in subtäglicher zeitlicher Auflösung vor.

Schließlich werden anonymisierte Daten zu asthmabedingten Notarzteinsätzen für ganz Bayern von der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern (KVB) bereitgestellt (insgesamt ca. 15.000 Fälle flächendeckend in ganz Bayern für den Zeitraum von Januar 2010 bis März 2017) und sollen durch Asthmadaten des Uniklinikums Augsburg ergänzt werden. Diese Daten liegen differenziert nach verschiedenen Subtypen der Asthmaerkrankung nach ICD-10 (*International Classification of Diseases and Related Health Problems*, 10. Revision) vor. In die Analyse wurden zunächst diejenigen Codes einbezogen, die die Erkrankung am genauesten beschreiben. Diese umfassen allergisches Asthma (J45.0), nicht-allergisches Asthma (J45.1), Mischformen des *Asthma bronchiale* (J45.8), nicht näher bezeichnetes *Asthma bronchiale* (J45.9), schweres Asthma (J46) sowie akute Atemnot (R06.0). Die Notfalldaten ermöglichen eine räumlich differenzierte Identifizierung von Situationen mit erhöhten Asthmahäufigkeiten auf täglicher Basis, beispielsweise anhand der Berechnung der relativ erhöhten Morbidität³⁶, einer Maßzahl, die über eine Standardisierung der Daten die Abschätzung der Abweichungen zwischen beobachteten und erwarteten Auftrittshäufigkeiten einer Erkrankung ermöglicht.

Mit Hilfe dieser Eingangsdaten werden Wetterlagenklassifikationen berechnet und optimiert, die detektierten Gewitterereignisse werden bezüglich verschiedener meteorologischer Kenngrößen sowie des Allergengehalts charakterisiert. Dies ermöglicht die Identifizierung asthma-relevanter (Gewitter-)wetterlagen, deren umfangreiche Beschreibung sowie statistische Analysen und Signifikanzprüfungen des Zusammenhangs mit (erhöhten) Asthmahäufigkeiten auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen mittels verschiedener bi- und multivariater Verfahren.

35 Hirst 1952.

36 Nach Urban/Kyselý 2018: 86f.

2. Regionale Gewitter- und Asthmastatistik

Die Gewitteraktivität in Bayern, gemessen an der monatlichen Anzahl der Gewittertage, weist einen charakteristischen Jahresgang mit einem deutlichen Maximum im Sommer auf (vgl. Abbildung 2). Die Hauptgewittersaison dauert von Mai bis August, innerhalb dieses Zeitraums treten in Bayern ca. 93 % der Wolke-Boden-Blitze eines Jahres auf (nicht dargestellt). Die mittlere Anzahl der Gewittertage pro Monat in der Region Augsburg, definiert als rechteckiger Gitternetzausschnitt, der die Landkreise Augsburg, Aichach-Friedberg, Donau-Ries sowie Dillingen an der Donau enthält, weist im gesamten Jahresverlauf Werte unterhalb des bayerischen Durchschnitts auf. Die interannuelle Variabilität der Monatssummen ist jedoch hoch, insbesondere in der Gewittersaison (vgl. Abbildung 2).

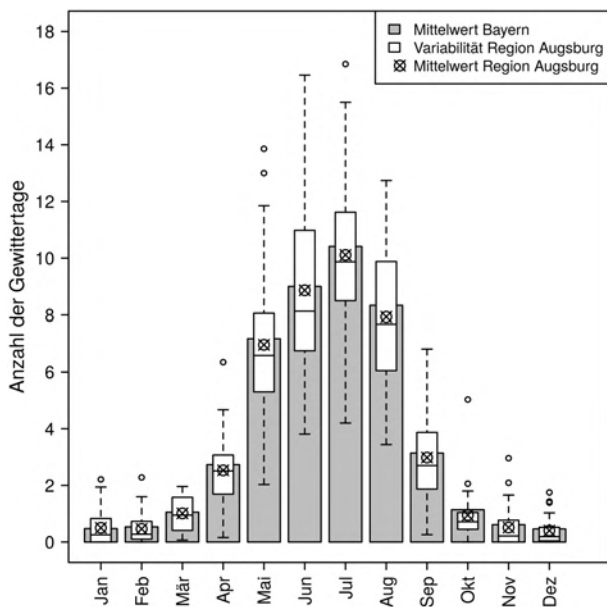


Abb. 2: Mittlere monatliche Anzahl der Gewittertage für Bayern sowie die Region Augsburg unter Einbezug der Jahre 1992-2017 (Datenquelle: Siemens)³⁷

37 Box-Whisker-Plots: Boxen zeigen den Median sowie das 1. und 3. Quartil (untere/obere Begrenzung der Box), Whisker zeigen den 1,5-fachen Interquartilabstand ausgehend vom oberen/unteren Ende der Box.

Der Tagesgang der Gewittertätigkeit zeigt analog zum Tagesgang der Lufttemperatur insbesondere im Frühjahr und Sommer ein Minimum in den Morgenstunden (6 bzw. 8 Uhr UTC) und ein Maximum am Nachmittag (15 bis 16 Uhr UTC). In diesen Jahreszeiten herrschen konvektive Gewitter vor, die sich meist nachmittags ereignen. Im Herbst und insbesondere im Winter ist der Anteil von Frontalgewittern, die nicht an den Tagesverlauf der Einstrahlung gebunden sind, höher, weshalb deutliche Abweichungen von diesem typischen Tagesgang der Blitzsummen zu beobachten sind. Im Herbst treten zwar ebenfalls am Nachmittag die meisten Blitze auf, aber in den Morgenstunden ist ein sekundäres Maximum zu erkennen, das Minimum befindet sich etwas später als im Frühjahr und Sommer (9 Uhr UTC). Zudem ist zu beachten, dass die Amplitude des Tagesgangs im Herbst und Winter deutlich geringer ist als in der Gewittersaison (vgl. Abbildung 3). Dieser jahreszeitlich variierende Tagesgang der Gewitteraktivität stimmt gut mit den Ergebnissen von Kathrin Wapler³⁸ für Zentraleuropa überein.

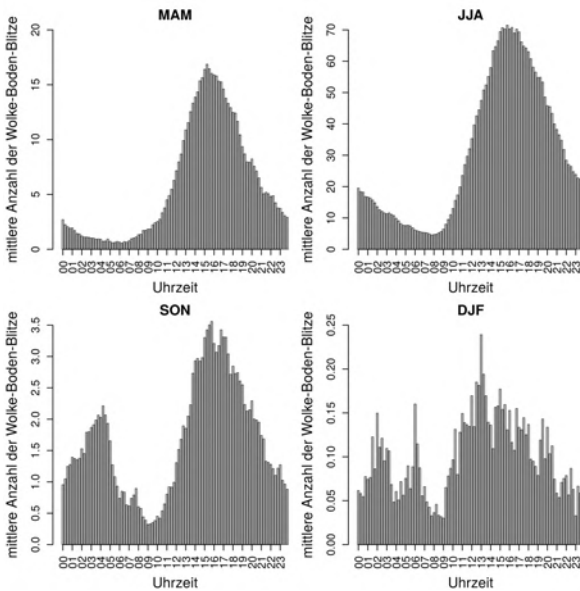


Abb. 3: Mittlerer Tagesgang der Anzahl der Wolke-Boden-Blitze in Bayern (in 15-Minuten-Schritten), Jahre 1992-2017 (Datenquelle: Siemens)³⁹

38 Wapler 2013.

Die räumliche Verteilung der Blitzdichte in Bayern (hier nicht gezeigt) weist eine Differenzierung anhand der Höhenlage auf. Die höchsten Werte kommen im Alpenvorland und insbesondere in den Alpen vor, im Norden Bayerns sind sie deutlich geringer. Aber auch innerhalb der Region Augsburg bestehen räumliche Unterschiede, beispielsweise treten nördlich und südlich der Stadt lokale Maxima der Blitzdichte auf.

Der mittlere Jahresgang der asthmabedingten Notarzteinsätze für Bayern (gesamt) sowie für die Städte München, Nürnberg und Augsburg ist weitaus weniger ausgeprägt als bei der Gewitteraktivität. Er weist zwar analog zum Jahresverlauf der Gewittertage ein schwaches Maximum im Juli auf, jedoch sind im Frühjahr und Herbst zudem sekundäre Maxima zu erkennen. Letztere treten in den verschiedenen Städten nicht simultan auf, in München kommt ein weiteres Maximum im Dezember hinzu (vgl. Abbildung 4). Eine deutliche interannuelle Variabilität der Monatssummen ist zudem zu beachten (nicht gezeigt), ebenso die Tatsache, dass in die Asthmastatistik die Daten von lediglich sieben Jahren eingehen, sodass sich die Aussagen möglicherweise nicht auf die Grundgesamtheit der Asthmanotfälle übertragen lassen. Andererseits werden ähnliche Jahresverläufe der Asthma-Aufttrittshäufigkeit auch in der Literatur beschrieben. Dabei wird beispielsweise für Melbourne das Maximum im Frühjahr saisonalen Allergien zugeschrieben, der winterliche Peak einer erhöhten Anzahl von Virusinfektionen der Atemwege. Das Maximum im Herbst tritt vor allem bei der Altersgruppe der Schulkinder auf und wird mit dem Schulbeginn nach Ende der Sommerferien in Zusammenhang gebracht.⁴⁰ Ob diese Erklärungsansätze auch für die Asthma-Aufttrittshäufigkeiten in Bayern plausibel sind, ist allerdings unklar, da für die hier untersuchten Asthmadaten der KVB keine Differenzierung nach Altersgruppen vorliegt.

3. Wetterlagenklassifikationen

Wetterlagenklassifikationen können dazu dienen, Zusammenhänge zwischen der großräumigen atmosphärischen Zirkulation und lokalen Ausprägungen verschiedenartiger Zielgrößen zu untersuchen. Dabei kann es sich ebenfalls um meteorologische Größen handeln, aber auch um Maße

39 MAM: Frühjahr (März-Mai), JJA: Sommer (Juni-August), SON: Herbst (September-November), DJF: Winter (Dezember-Februar)

40 Silver et al. 2018.

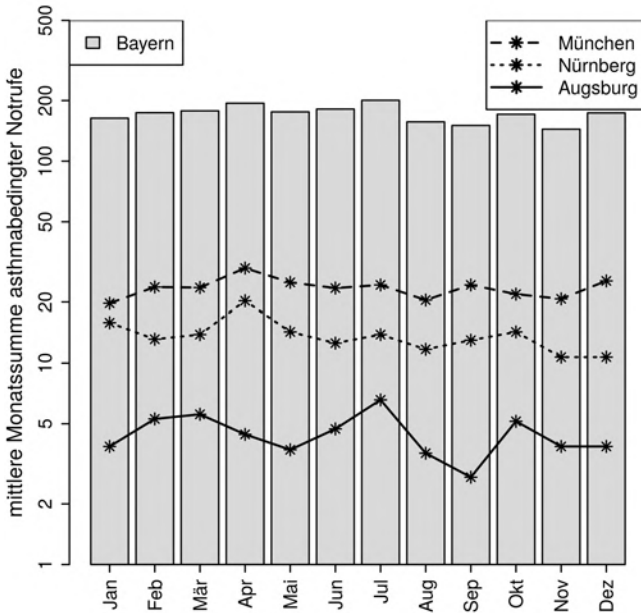


Abb. 4: Mittlerer Jahresgang der Asthmafälle, bezogen auf Monatssummen, für Bayern sowie ausgewählte Städte für die Jahre 2010-2016, zu beachten ist die logarithmische Skalierung der y-Achse (Datenquelle: KVB).

der Luftqualität oder, wie in diesem Fall, Gesundheitsdaten. Ein einfacher Ansatz ist die Kompositenbildung. Hierbei werden mittlere Karten einer großräumigen Variablen für Situationen mit unterschiedlichen Ausprägungen der lokalen Zielgröße berechnet, beispielsweise für Tage mit unterem Vergleich zu überdurchschnittlichen Werten. Diese Methode wird zu den *environment-to-circulation*-Verfahren gezählt, da die großräumige Situation anhand einer lokalen Variable klassifiziert wird. Davon unterschieden wird der *circulation-to-environment*-Ansatz, bei dem zuerst die Klassifikation der Zirkulationsdaten erfolgt und die Zielgröße anschließend mit den gebildeten Klassen in Verbindung gebracht wird.⁴¹

In dieser Studie wurden zunächst Kompositen der großräumigen meteorologischen Analyse-Variablen gebildet, um erste Einschätzungen über

41 Yarnal 1993: 7f., 108ff.

mögliche Zusammenhänge des großskaligen atmosphärischen Zustands mit lokalen Werten der Asthma-Auftrittshäufigkeit sowie der Gewitteraktivität, gemessen an der Blitzdichte, zu erhalten. Für die Anzahl der Asthmafälle pro Tag in Augsburg wurden zunächst zwei Klassen gebildet, eine für Tage ohne asthmadeingetragene Notfälle (CL01) und eine für Tage mit mindestens einem Fall (CL02, durchschnittlich 1,12 Fälle pro Tag). Abbildung 5 zeigt mittlere Karten der 12 Uhr-Werte des CAPE-Index (*convective available potential energy*) für beide Klassen für die Sommermonate (Juni-August). Dessen Werte sind an Sommertagen mit Asthmafällen im Südosten Bayerns, aber auch im Raum Augsburg, höher als an Tagen ohne Asthma. Obwohl sich das räumliche Verteilungsmuster des CAPE-Indexes zwischen den beiden Klassen kaum unterscheidet, weisen die deutlich erhöhten Werte auf einen Zusammenhang zwischen Gewittern und Asthma in Südbayern hin.

Zudem wurden die Anomalien der großskaligen Variablen an Tagen mit bzw. ohne Asthmanotfällen im Vergleich zum Gesamtmittel betrachtet. Für die Höhe der planetaren Grenzschicht sind die Anomalien beider Klassen für Augsburg für Sommertage in Abbildung 6 dargestellt. An Tagen mit Asthmanotfällen befindet sich ein Gebiet mit deutlich erhöhten Werten, das auch die Region Augsburg umfasst, vor allem im Südwesten Bayerns, aber auch im Nordosten des Untersuchungsgebiets treten höhere Werte auf, als im Durchschnitt. Da bei größeren Höhen der planetaren Grenzschicht die Durchmischung derselben kräftiger ist, ist in solchen Situationen mit mehr Konvektion und somit stärkerer Gewittertätigkeit zu rechnen.⁴²

Bei solchen Betrachtungen ist zu beachten, dass die beiden Klassen aus sehr unterschiedlichen Situationen bestehen können. Die Variabilität innerhalb der Klassen stellt bei allen Wetterlagenklassifikationen ein Problem dar, ist jedoch unvermeidlich. Bei aufwändigeren Methoden wird versucht, die Variation innerhalb der Klassen zu minimieren und zwischen den Klassen zu maximieren.⁴³ Daher können Kompositen lediglich als erster Hinweis auf die Relevanz von *Thunderstorm Asthma* im Untersuchungsgebiet dienen.

42 Garratt 1994: 90.

43 Yarnal 1993: 11f.

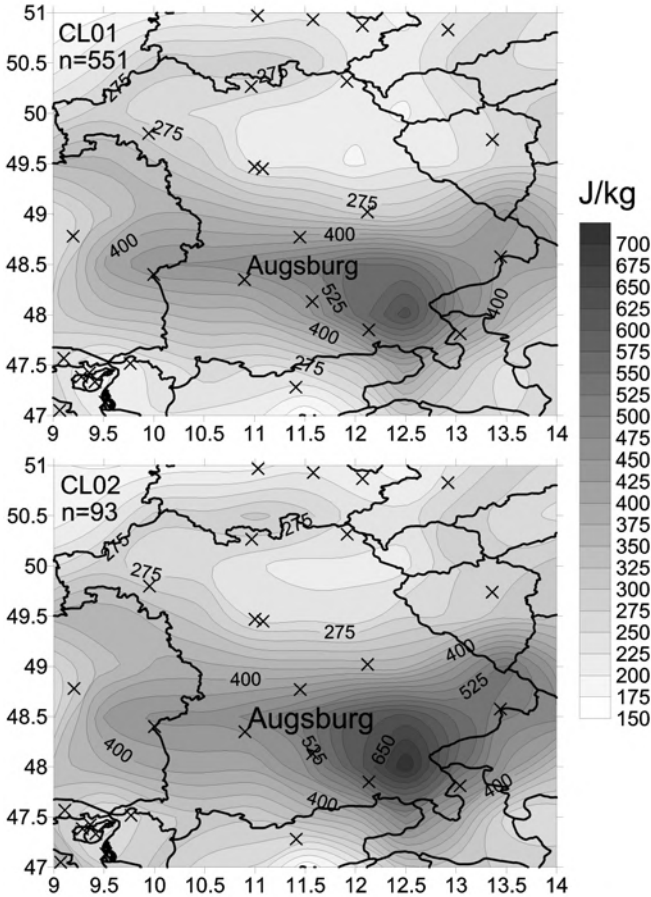


Abb. 5: Kompositen der 12 Uhr-Werte des CAPE-Index [J/kg] der Jahre 2007-2017 im bayerischen Raum für 551 Tage ohne (oben) und 93 Tage mit (unten) Asthma-Auftritten in Augsburg im Sommer (Juni, Juli, August), Kreuze zeigen die Lage ausgewählter Städte an.

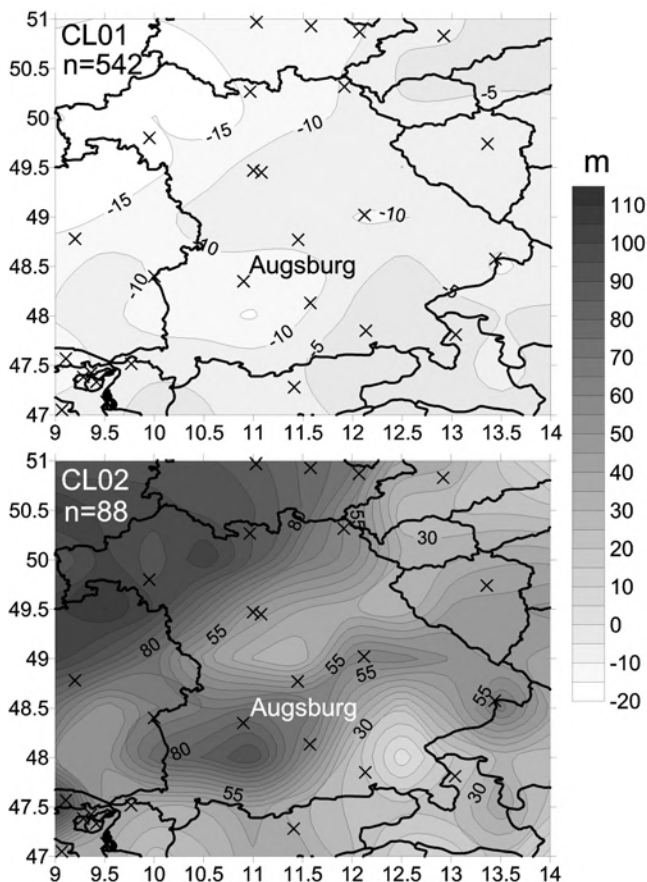


Abb. 6: Anomalien der 18 Uhr-Werte der planetaren Grenzschichthöhe [m] zum Gesamtmittel im bayerischen Raum für 542 Tage ohne (oben) und 88 Tage mit (unten) Asthma-Auftritten in Augsburg im Sommer (Juni, Juli, August), Kreuze zeigen die Lage ausgewählter Städte an.

4. Statistische Zusammenhangsanalyse

Zur Prüfung des Zusammenhangs zweier kategorialer Variablen eignen sich Kreuztabellen bzw. Kontingenztafeln und der nicht-parametrische Chi-Quadrat-Test auf Unabhängigkeit. Im speziellen Fall der Vierfelder-Ta-

feln haben beide Variablen lediglich zwei Ausprägungen⁴⁴, in diesem Fall wurde zwischen Gewitter- und Nicht-Gewittertagen bzw. Asthma- und Nicht-Asthmatagen unterschieden. Die beobachteten Häufigkeiten der vier möglichen Ereignisse werden mit den Häufigkeiten verglichen, die unter Annahme der Unabhängigkeit der beiden Variablen zu erwarten wären. Aus deren Differenzen berechnet sich die Prüfgröße χ^2 , als Signifikanzniveau wurde 90 % ($\alpha=0,1$) angesetzt. Zudem geben die standardisierten Residuen eine Einschätzung über die Signifikanz der Abweichungen zwischen beobachteten und erwarteten Häufigkeiten, die insbesondere für das Ereignis „Zusammentreffen von Gewittertag und Asthmatag“ von Interesse ist. Bei Verwendung von $\alpha=0,1$ sind dabei Beträge von über 1,645 signifikant.⁴⁵ Außerdem wurde der korrigierte Kontingenzkoeffizient nach Pearson berechnet, ein Maß, das zur Einschätzung der Stärke des Zusammenhangs dient.⁴⁶ Varianten für verschiedene räumliche (Augsburg (A), München (M) und Nürnberg (N) sowie diese drei Städte zusammen (AMN) und die Regionen Augsburg (RegA1, RegA2) und Nürnberg (RegN1, RegN2) jeweils in einer enger und weiter gefassten Variante) und zeitliche (saisonale) Teilmengen der Daten und Definitionen eines Asthmatages (Tage mit Asthma-Aufttrittshäufigkeiten oberhalb variierender Schwellenwerte, Tage mit positiven Werten der relativ erhöhten Morbidität) wurden getestet.

Signifikante Zusammenhänge zwischen den Variablen „Asthmatag“ und „Gewittertag“ bestehen für einige Jahreszeiten bei Definitionen eines „Asthmatages“ mittels verschiedener Schwellenwerte und für verschiedene Varianten des betrachteten räumlichen Ausschnitts (vgl. Abbildung 7). Die Werte des korrigierten Kontingenzkoeffizienten sind in allen Fällen gering (maximal 0,16 für München im Winter), was auf einen schwachen Zusammenhang hinweist. Es ergeben sich jedoch einige signifikante Zusammenhänge (grau unterlegt) in denen an Gewittertagen mehr Asthmanotfälle als erwartet auftreten. Aber auch zwei Fälle im Frühjahr und ein Fall im Winter werden dokumentiert, in denen in den Regionen Augsburg und Nürnberg an Gewittertagen weniger Asthmaanfalle als erwartet auftreten. Ob hier ein ursächlicher Mechanismus zugrunde liegt, etwa in Zusammenhang mit Frischluftzufuhr bei Durchmischung, der die in der Literatur beschriebenen Mechanismen überwiegt oder es sich einfach um statistisches

44 Schönwiese 2013: 149f.

45 Sharpe 2015: 2f., Schönwiese 2013: 286.

46 Toutenburg et al. 2006: 51f.

Rauschen handelt, soll neben den Details der positiven Zusammenhänge in Zukunft näher untersucht werden.

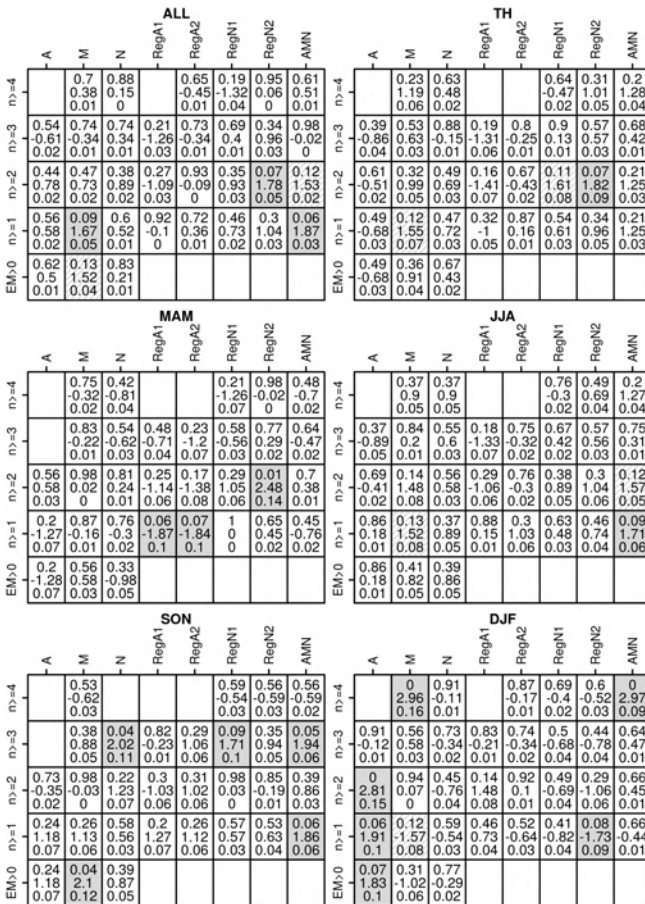


Abb. 7: Übersicht der Ergebnisse aller Vierfelder-Tests, saisonal differenziert, für verschiedene Orte und Definitionen eines „Asthmatages“⁴⁷

47 Grau hinterlegte Felder zeigen Signifikanz ($\alpha=0.1$) des Chi-Quadrat-Tests auf Unabhängigkeit, grau schraffierte Felder weisen auf p-Werte < 0.14 und somit nahe der Signifikanz hin, die obersten Zahlen in jedem Kästchen sind die p-Values des Chi-Quadrat-Tests, die mittleren die standardisierten Residuen, die unteren die korrigierten Kontingenzkoeffizienten, weiße Felder zeigen an, dass der Test für diese Kombination entweder nicht durchgeführt wurde oder zu

5. Zusammenfassung und Ausblick

Erste Analysen liefern Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Asthmanotfällen und Gewittern in Bayern, der jedoch in weiteren Schritten noch genauer spezifiziert werden soll. Hierzu sollen aufwändigere Klassifikationsmethoden angewendet werden, wodurch für das Auftreten von *Thunderstorm Asthma* relevante zirkulationsdynamische und lokale meteorologische sowie aerobiologische Situationen umfassend charakterisiert werden sollen. Von zentraler Bedeutung hierfür ist auch die Verwendung verschiedener räumlicher und zeitlicher Skalen, auf denen nach überzufälligen Zusammenhangssignalen zwischen dem Auftreten von Asthma und Gewittern gesucht wird. Neben den statistischen Analysen sollen Fallstudien einzelner Tage bzw. Ereignisse zur Untersuchung der Wirkungszusammenhänge dienen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern (KVB) und der Firma Siemens für die Bereitstellung der jeweiligen Datensätze zur Verwendung in diesem Forschungsprojekt.

Finanzierung

Im Rahmen des Verbundprojektes Klimawandel und Gesundheit wird das Forschungsvorhaben durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) sowie durch das Bayerische Staatsministerium für Gesundheit und Pflege (StMGP) gefördert.

wenig Beobachtungen vorhanden waren. ALL=gesamtes Jahr, TH=Gewittersaison (Mai-August), MAM=Frühjahr, JJA=Sommer, SON=Herbst, DJF=Winter, A=Augsburg, M=München, N=Nürnberg, RegA1=Region Augsburg bestehend aus Augsburg + Gersthofen + Friedberg, RegA2=Region Augsburg bestehend aus Augsburg + Gersthofen + Friedberg + Donauwörth + Dillingen + Günzburg + Schwabmünchen, RegN1=Region Nürnberg bestehend aus Nürnberg + Fürth + Erlangen, RegN2=Region Nürnberg bestehend aus Nürnberg + Fürth + Erlangen + Langenzenn + Herzogenaurach + Roth, AMN=Augsburg + München + Nürnberg zu einer Stichprobe zusammengefasst, EM>0=Asthmatag definiert als Tag mit relativ erhöhter Morbidität, $n \geq x$: Asthmatag definiert als Tag mit $\geq x$ Asthmanotfällen am jeweiligen Ort/in der jeweiligen Region.

Literatur

- Alderman, PM/Sloan, JP/Basaran, GS (1986): Asthma and thunderstorms. In: Archives of Emergency Medicine, 1986: 3 (4), 260-262.
- Anderson, W/Prescott, GJ/Packham, S/Mullins, J/Brookes, M/Seaton, A (2001): Asthma admissions and thunderstorms: a study of pollen, fungal spores, rainfall, and ozone. In: Quarterly Journal of Medicine, (2001): 94, 429-433.
- Andrae, S/Axelson, O/Björkstén, B/Fredriksson, M/Kjellman, N-IM (1988): Symptoms of bronchial hyperreactivity and asthma in relation to environmental factors. In: Archives of Disease in Childhood, 1988: 63, 473-478.
- Bellomo, R/Holmes, P/Gigliotti, P/Treloar, A/Suphioglu, C/Singh, MB/Knox, B (1992): Two consecutive thunderstorm associated epidemics of asthma in the city of Melbourne: the possible role of rye grass pollen. In: Medical Journal of Australia, 1992: 156, 834-837.
- Bond, DW/Zhang, R/Tie, X/Brasseur, G/Huffines, G/Orville, RE/Boccippio, DJ (2001): NO_x production by lightning over the continental United States. In: Journal of Geophysical Research, 2001: 106 (D21), 701-710.
- Cecchi, L/D'Amato, G/Maesano, IA (2013): Climate, Urban Air Pollution, and Respiratory Allergy. In: Climate Vulnerability, 2013: 1, 105-113.
- Celenza, A/Fothergill, J/Kupek, E/Shaw, RJ (1996): Thunderstorm associated asthma: a detailed analysis of environmental factors. In: BMJ, 1996: 312, 604-607.
- Clayton-Chubb, D/Con, D/Rangamuwa, K/Taylor, D/Thien, F/Wadhwa, V (2019): Thunderstorm asthma: revealing a hidden at-risk population. In: Internal Medicine Journal, 2019: 49, 74-78.
- Colby, FP (1984): Convective Inhibition as a Predictor of Convection during AVE-SESAME II. In: Monthly Weather Review, 1984: 112, 2239-2252.
- D'Amato, G/Cecchi, L/Liccardi, G (2008): Thunderstorm-related asthma: Not only grass pollen and spores. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology, 121: 2, 537-538.
- D'Amato, G/Vitale, C/D'Amato, M/Cecchi, L/Liccardi, G/Molino, A/Vatrella, A/Sanduzzi, A/Maesano, C/Annesi-Maesano, I (2016a): Thunderstorm-related asthma: what happens and why. In: Clinical & Experimental Allergy, 2016: 46, 390-396.
- D'Amato, G/Pawankar, R/Vitale, C/Lanza, M/Molino, A/Stanziola, A/Sanduzzi, A/Vatrella, A/D'Amato, M (2016b): Climate Change and Air Pollution: Effects on Respiratory Allergy. In: Allergy, Asthma & Immunology Research, 2016: 8 (5), 391-395.
- Dales, RE/Cakmak, S/Judek, S/Dann, T/Coates, F/Brook, JR/Burnett, RT (2003): The Role of Fungal Spores in Thunderstorm Asthma. In: CHEST, 2003: 123, 745-750.
- Elliot, AJ/Hughes, H E/Hughes, T C/Locker, TE/Brown, R/Sarran, C/Clewlow, Y/Murray, V/Bone, A/Catchpole, M/McCloskey, B/Smith, GE (2014): The impact of thunderstorm asthma on emergency department attendances across London during July 2013. In: Emergency Medicine Journal, 2014: 31, 675-678.
- Finke, U/Hauf, T (1996): The Characteristics of Lightning Occurrence in Southern Germany. In: Beiträge zur Physik der Atmosphäre, 1996: 69 (3), 361-374.

- Forouzan, A/Masoumi, K/Shoushtari, MH/Idani, E/Tirandaz, F/Feli, M/Assarehzadegan, MA/Darian, AA (2014): An Overview of Thunderstorm-Associated Asthma Outbreak in Southwest of Iran. In: Journal of Environmental and Public Health, 2014, Article ID 504017.
- Galway, JG (1956): The Lifted Index as a Predictor of Latent Instability. In: Bulletin of the American Meteorological Society, 37: 10, 528-529.
- Garratt, JR (1994): Review: the atmospheric boundary layer. In: Earth-Science Reviews, 1994: 37, 89-134.
- Girgis, ST/Marks, GB/Downs, SH/Kolbe, A/Car, GN/Paton, R (2000): Thunderstorm-associated asthma in an inland town in south-eastern Australia. Who is at risk? In: European Respiratory Journal, 2000: 16, 3-8.
- Grote, M/Valenta, R/Reichelt, R (2003): Abortive pollen germination: A mechanism of allergen release in birch, alder, and hazel revealed by immunogold electron microscopy. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2003: 111, 1017-1023.
- Grundstein, A/Sarnat, SE/Klein, M/Shepherd, M/Naeher, L/Mote, T/Tolbert, P (2008): Thunderstorm-associated asthma in Atlanta, Georgia. In: Thorax, 2008: 63 (7), 659-660.
- Grundstein, A/Sarnat, SE (2009): Meteorological Mechanisms Explaining Thunderstorm-Related Asthma. In: Geography Compass, 2009: 3 (1), 45-63.
- Hajat, S/Goubet, SA/Haines, A (1997): Thunderstorm-associated asthma: the effect on GP consultations. In: British Journal of General Practice, 1997: 47, 639-641.
- Higham, J/Venables, K/Kopek, E/Bajekal, M (1997): Asthma and thunderstorms: description of an epidemic in general practice in Britain using data from a doctors' deputising service in the UK. In: Journal of Epidemiology and Community Health, 1997: 51, 233-238.
- Hirst, JM (1952): An automatic volumetric spore trap. In: Annals of Applied Biology, 39: 2, 257-265.
- Kaynak, B/Hu, Y/Martin, RV/Russell, AG/Choi, Y/Wang, Y (2008): The effect of lightning NO_x production on surface ozone in the continental United States. In: Atmospheric Chemistry and Physics, 2008: 8, 5151-5159.
- Klose, B (2008): Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Berlin: Springer.
- Losappio, L/Heffler, E/Contento, F/Cannito, C/Rolla, G (2011): Thunderstorm-related asthma epidemic owing to Olea Europaea pollen sensitization. In: Allergy, 2011: 66, 1510-1511.
- Marks, GB/Colquhoun, JR/Girgis, ST/Hjelmroos Koski, M/Treloar, ABA/Hansen, P/Downs, SH/Car, NG (2001): Thunderstorm outflows preceding epidemics of asthma during spring and summer. In: Thorax, 2001: 56, 468-471.
- Moncrieff, MW/Miller, MJ (1976): The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976: 102, 373-394.

- O'Leary, M/Koolpiruck, D/Balachandran, W/Emberlin, J/Lewis, R (2005): The Role of Electrostatic Charge Accumulated by Respirable Sized Allergens with regard to Thunderstorm Asthma. In: Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005: 2, 778-783.
- Packe, GE/Ayres, JG (1985): Asthma outbreak during a thunderstorm, In: The Lancet, 326: 8448, 199-203.
- Pulimood, TB/Corden, JM/Bryden, C/Sharples, L/Nasser, SM (2007): Epidemic asthma and the role of the fungal mold *Alternaria alternata*. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2007: 120 (3), 610-617.
- Reap, RM/Orville, RE (1990): The Relationships between Network Lightning Locations and Surface Hourly Observations of Thunderstorms. In: Monthly Weather Review, 1990: 118, 94-108.
- Schefczyk, L/Heinemann, G (2017): Climate change impact on thunderstorms: Analysis of thunderstorm indices using high-resolution regional climate simulations. In: Meteorologische Zeitschrift, 26: 4, 409-419.
- Schönwiese, C-D (2013): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 5. Auflage. Stuttgart: Borntraeger.
- Sharpe, D (2015): Your Chi-Square Test is Statistically Significant: Now What? In: Practical Assessment, Research & Evaluation, 20: 8, 1-10.
- Silver, JD/Sutherland, MF/Johnston, FH/Lampugnani, ER/McCarthy, MA/Jacobs, SJ/Pezza, AB/Newbiggin, EJ (2018): Seasonal asthma in Melbourne, Australia, and some observations on the occurrence of thunderstorm asthma and its predictability. In: PLoS ONE, 13: 4, e0194929.
- Suphioglu, C/Singh, MB/Taylor, P/Bellomo, R/Holmes, P/Puty, R/Knox, RB (1992): Mechanism of grass-pollen-induced asthma. In: Lancet, 1992: 339, 569-572.
- Taylor, PE/Flagan, RC/Valenta, R/Glovsky, MM (2002): Release of allergens as respirable aerosols: A link between grass pollen and asthma. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2002: 109, 51-56.
- Taylor, PE/Flagan, RC/Miguel, AG/Valenta, R/Glovsky, MM (2004): Birch pollen rupture and the release of aerosols of respirable allergens. In: Clinical and experimental allergy, 2004: 34, 1591-1596.
- Taylor, PE/Jonsson, H (2004): Thunderstorm Asthma. In: Current Allergy and Asthma Reports, 2004: 4, 409-413.
- Thien, F/Beggs, PJ/Csutoros, D/Darvall, J/Hew, M/Davies, JM/Bardin, PG/Bannister, T/Barnes, S/Bellomo, R/Byrne, T/Casamento, A/Conron, M/Cross, A/Crosswell, A/Douglass, JA/Durie, M/Dyett, J/Ebert, E/Erbas, B/French, C/Gelbart B/Gillman, A/Harun, N-S/Huete, A/Irving, L/Karalapillai, D/Ku, D/Lachapelle, P/Langton, D/Lee, J/Looker, C/MacIsaac, C/McCaffrey, J/McDonald, CF/McGain, F/Newbiggin, E/O'Hehir, R/Pilcher, D/Prasad, S/Rangamuwa, K/Ruane, L/Sarode, V/Silver, JD/Southcott, AM/Subramaniam, A/Suphioglu, C/Susanto, NH/Sutherland, MF/Taori, G/Taylor, P/Torre, P/Vetro, J/Wigmore, G/Young, AC/Guest, C (2018): The Melbourne epidemic thunderstorm asthma event 2016: an investigation of environmental triggers, effect on health services, and patient risk factors. In: Lancet Planet Health, 2018: 2, 255-263.

- Toutenburg, H/Schomaker, M/Wißmann, M (2006): Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik. Berlin: Springer.
- Urban, A/Kysely, J (2018): Application of spatial synoptic classification in evaluating links between heat stress and cardiovascular mortality and morbidity in Prague, Czech Republic. In: International Journal of Biometeorology, 62: 1, 85-96.
- Vaidyanathan, V/Miguel, AG/Taylor, PE/Flagan, RC/Glovsky, MM (2006): Effects of Electric Fields on Pollen Rupture. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology, 117: 2, 157.
- Visez, N/Chassard, G/Azarkan, N/Naas, O/Sénéchal, H/Sutra, J-P/Poncet, P/Choël, M (2015): Wind-induced mechanical rupture of birch pollen: Potential implications for allergen dispersal. In: Journal of Aerosol Science, 2015: 89, 77-84.
- Wapler, K (2013): High-resolution climatology of lightning characteristics within Central Europe. In: Meteorology and Atmospheric Physics, 2013: 122, 175-184.
- Wardmann, AED/Stefani, D/MacDonald, JC (2002): Thunderstorm-associated asthma or shortness of breath epidemic: A Canadian case report. In: Canadian Respiratory Journal, 9: 4, 267-270.
- Yarnal, B (1993): Synoptic Climatology in Environmental Analysis. London: Belhaven Press.

