

5. STÜRME

Anders als Dürren wirken Stürme eher kurzfristig, können aber räumlich begrenzt erhebliche Schäden anrichten. Über dem Nordatlantik und Nordeuropa ist die Sturmaktivität sehr stark von der Nordatlantischen Oszillation (NAO) abhängig und zeigt bislang keinen ausgeprägten Trend infolge des Klimawandels (Kap. 5.1). Bei den weltweit größten Sturmsystemen, den Tropischen Wirbelstürmen, nimmt die Anzahl der Stürme nach bisherigen Beobachtungen und in Modellprojektionen sogar ab, während eine Zunahme der Intensität als Folge der globalen Erwärmung wahrscheinlich ist (Kap. 5.2 und 5.3). Abwandlungen tropischer Wirbelstürme bilden sich gelegentlich auch über dem Mittelmeer. Die wahrscheinliche Erwärmung der Atmosphäre in den nächsten Jahrzehnten ist für die Entstehung dieser sog. Medicanes eher ungünstig (Kap. 5.4). Am Beispiel der Sturmfluten an der Nordseeküste zeigt sich, dass für die aktuellen und künftigen Schäden nicht nur die atmosphärischen Bedingungen, sondern auch der Meeresspiegelanstieg und die Gezeiten von Bedeutung sind (Kap. 5.5).

5.1 Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa

FRAUKE FESER & BIRGER TINZ

Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa: Die Küsten Nordeuropas liegen im Bereich der vom Nordatlantik ostwärts ziehenden Tiefdruckgebiete und sind deshalb besonders anfällig für Stürme und die von ihnen verursachten Schäden. Diese betreffen sowohl die Küstenanwohner als auch ihren Besitz, ihre Häuser, die Forst- und Agrarwirtschaft sowie die Schifffahrt und die Offshore-Industrie. Extratropische Stürme über dem Nordatlantik können zudem zu extremen Wetterereignissen wie Sturmfluten, hohen Wellen und Überflutungen durch Starkniederschläge führen. Deshalb ist es wichtig, das vergangene Sturmklima zu untersuchen. Um zuverlässige Statistiken der Anzahl und Stärke der Stürme der Vergangenheit abzuleiten werden lange und homogene, kontinuierliche meteorologische Zeitreihen benötigt. Die Auswertung solcher Statistiken zeigt, dass in den letzten 50-60 Jahren die Sturmaktivität über dem Nordatlantik zugenommen hat. Betrachtet man allerdings längere Zeiträume von hundert und mehr Jahren wird deutlich, dass es sich dabei vor allem um dekadische Variabilität handelt und kein Langzeittrend erkennbar ist. Aus diesen Erkenntnissen, sowie aus Szenariorechnungen mit Klimamodellen, können Aussagen zu voraussichtlichen zukünftigen Sturmentwicklungen abgeleitet werden

Storms over the North Atlantic and Northern Europe: The coasts of Northern Europe are located in a region which is affected by the North Atlantic eastwards moving low pressure areas and they are therefore vulnerable to storms and according damages. These affect coastal residents and their property such as houses, forestry and agriculture, or shipping and offshore industry. In addition, extratropical storms over the North Atlantic may lead to extreme weather related events such as storm surges, high waves and flooding due to high precipitation amounts. It is therefore of great importance to analyze past storm climate. To derive reliable statistics of past storm frequency and intensity changes, long homogeneous and continuous meteorological time series are necessary. The analysis of these statistics shows an increase in storm activity over the North Atlantic during the past 50-60 years. But when longer periods of 100 and more years are examined, decadal variability predominates and no long-term trend can be detected. From these findings, and from scenario simulations with climate models, possible future storm developments can be derived.

Extratropische Stürme

Es gibt verschiedene Arten von Stürmen, von den großräumigen tropischen Wirbelstürmen und extratropischen Stürmen über kleinräumigere, regionale Stürme wie Polartiefs oder Medicanes über dem Mittelmeer, hin zu Gewitterstürmen und Tornados. Sie unterscheiden sich in ihrer räumlichen Ausdehnung, der Art ihrer Entstehung, sowie in ihren dynamischen Eigenschaften. Aber sie alle sind charakterisiert durch hohe Windgeschwindigkeiten und oft auch durch Starkniederschläge, Hagel und Blitze. Extratropische Stürme sind Tiefdruckgebiete der gemäßigten Breiten, die Fronten aufweisen und einen Durchmesser von etwa 200 km bis hin zu 2.000 km haben. Der Wind weht innerhalb der Tiefdruckgebiete aufgrund der

durch die Erddrehung verursachten Corioliskraft auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel im Uhrzeigersinn. Im Gegensatz zu tropischen Wirbelstürmen ist für extratropische Stürme nicht das warme Wasser des Ozeans die Hauptenergiequelle, stattdessen werden sie vom Temperaturunterschied zwischen den Luftmassen der hohen und der niederen geographischen Breiten gespeist.

Durch ihre hohe Windgeschwindigkeit (Abb. 5.1-1 zeigt Eisformationen, die sich aufgrund der sehr hohen Windgeschwindigkeiten während eines schweren Wintersturms horizontal hinter Felsen und Hindernissen gebildet haben), den oft mit ihnen verbundenen erhöhten Wasserständen an den Küsten (Windstau) und ihren hohen Niederschlagsmengen führen die Stürme über

dem Nordatlantik beim Erreichen Europas oft zu großen Schäden. Es können Menschen zu Schaden kommen verbunden mit materiellen Schäden an Gebäuden, Infrastruktur, Industrie, Forstwirtschaft, oder der Schifffahrt. Sie werden nicht nur durch die starken Winde verursacht, sondern auch durch Sturmfluten an der Küste, hohe Wellen und Überflutungen, die bis ins Landesinnere reichen können. Durch diesen starken Einfluss haben Fragen in Bezug auf Änderungen des Sturmklimas in den letzten Jahrzehnten große wissenschaftliche und öffentliche Beachtung erfahren. Entscheidend ist hierbei die Frage wie sich die Stürme einerseits in der Vergangenheit verändert haben, aber auch wie sie sich in einem sich verändernden zukünftigen Klima darstellen könnten.

Die Nordatlantische Oszillation und der Storm Track

Eng verbunden mit der Sturmaktivität über dem Nordatlantik ist die Nordatlantische Oszillation (NAO). Die NAO kann als Differenz des Luftdruckes auf Meeresebene zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch z. B. von Wetterstationen auf diesen Inseln definiert werden (HANNACHI & STENDEL 2016). Diese Differenz wird häufig, normiert mit der Standardabweichung des Luftdruckes, als sogenannter NAO-Index dargestellt. Hohe Werte des NAO-Index stehen für große Druckdifferenzen zwischen dem Azorenhoch und dem Islandtief und negative Werte für kleine Druckunterschiede oder bei stark negativen Werten der Luftdruckverhältnisse für ein Hoch bei Island und ein Tief über den Azoren. Dabei ist ein hoher positiver NAO-Index oft mit einer starken Westwindzirkulation verbunden und mit einer größeren Häufigkeit von eingelagerten Tiefdruckgebieten. Aus ihnen können sich Stürme entwickeln und

so hat die NAO einen großen Einfluss auf die Sturmaktivität über dem Nordatlantik (PINTO & RAIBLE 2012, WANNER et al. 2001). Bei negativen NAO-Indexwerten sind westliche Winde schwächer ausgeprägt und Tiefdruckgebiete können in Richtung Mittelmeer ziehen was dann zu einer südwärts gerichteten Verschiebung der Sturmaktivität über Europa führt. Doch auch bei negativer NAO-Phase können schwere Stürme auftreten. Für die letzten über einhundert Jahre zeigt der NAO-Index starke Schwankungen auf Zeitskalen zwischen Jahren und mehreren Dekaden. Die Variabilität ist dabei ähnlich zu der von aus bodennahen Luftdruckwerten abgeleiteten Sturmindex über dem Nordatlantik. Dabei ist die Ähnlichkeit am Anfang des 18. Jahrhunderts geringer (ALEXANDERSSON et al. 1998) und wird dann größer für die jüngsten Jahrzehnte (ALEXANDER et al. 2005, FESER et al. 2015, MATULLA et al. 2007).

Der Storm Track bezeichnet relativ eng begrenzte Regionen, in denen Stürme mit der vorherrschenden Windrichtung ziehen. Über dem Nordatlantik bewegen sich extratropische Stürme entlang des polaren Jet Streams Richtung Osten. Dabei wird der Storm Track von verschiedenen Faktoren beeinflusst, etwa der großskaligen Zirkulation, der Orographie oder der Temperatur und daraus resultierenden Temperaturgradienten. Viele wissenschaftliche Studien haben sich mit Änderungen des Storm Tracks, etwa seines Verlaufes und seiner Intensität, beschäftigt, sowohl für die Vergangenheit (HARNIK & CHANG 2003, HICKEY 2003, SCHIESSER et al. 1997, SCHNEIDERIT et al. 2007, SICKMOELLER et al. 2000, TRI-



Abb. 5.1-1: Horizontale Eisformationen auf dem Roque de los Muchachos auf der kanarischen Insel La Palma nach einem schweren Wintersturm im Feb. 2016 (Fotos: J. Peters).

GO 2006, WANG et al. 2006), als auch für Zukunftsszenarien (z.B. BENGSSON & HODGES 2006, BENGSSON et al. 2009, FISCHER-BRUNS et al. 2005; HALL et al. 1994, KNIPPERTZ et al. 2000, ULBRICH & CHRISTOPH 1999, YIN 2005, ZAPPA et al. 2013). Die meisten Studien beschreiben eine polwärts oder eine ostwärts gerichtete Verlagerung bzw. Ausdehnung des Storm Tracks über dem Nordatlantik.

Vergangene Sturmtätigkeit

Für die Untersuchung des Sturmklimas der letzten Jahrzehnte bis Jahrhunderte werden möglichst lange und homogene Zeitreihen der meteorologischen Größen Wind und Luftdruck benötigt. Solch lange Zeitreihen müssen dabei aber möglichst homogen sein, damit die Statistik über mehrere Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte belastbar ist. Änderungen der Messmethode und -frequenz, des Ortes der Wetterstation oder die Zunahme und Verbesserung der Datendichte und -qualität durch neue Technologien wie die Wettersatelliten, die in den 1970er Jahren neu dazu kamen, können grundsätzlich zu Inkonsistenzen in langen Zeitreihen führen. LINDENBERG et al. (2012) haben die Zeitreihen der Windgeschwindigkeit von fünf Stationen an der deutschen Nordseeküste für den Zeitraum 1953-2005 untersucht. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass der statistische Trend der sehr hohen Windgeschwindigkeiten – was einer systematischen Zu- oder Abnahme der Sturmaktivität entsprechen würde – nur eine schwache Übereinstimmung zwischen diesen Stationen zeigt. LINDENBERG et al. (2012) kommen zu dem Schluss, dass die Messwerte der einzelnen Stationen stark von Veränderungen der Messungen bzw. Änderungen im Umfeld der Stationen abhängen.

Als besonders zuverlässig werden aus Luftdruckdaten abgeleitete Indizes und Zeitreihen angesehen. Im Vergleich zu direkten Windmessungen hängen sie weniger stark von Änderungen der Messmethode, -qualität sowie der Stationsumgebung und -dichte ab. Die starke Höhenabhängigkeit des Luftdrucks lässt sich bei Kenntnis der Höhe des Barometers sowie der Lufttemperatur sehr gut korrigieren. Besonders Studien, die sich mit den vergangenen 100 Jahren oder noch längeren Zeiträumen befassen, stützen sich aus diesem Grund meist nicht auf direkte Windmessungen, sondern auf Näherungswerte, die sogenannten Windproxies (FESER et al. 2015). Als Proxies können z.B. die Anzahl von Tiefdruckgebieten unter einem bestimmten Schwellenwert dienen. FRANKE (2009) hat aus den operationellen, beim Deutschen Wetterdienst mehrmals täglich erstellten Analysen des Luftdruckfeldes über den Nordatlantik die Tiefdruckgebiete mit einem Kerndruck ≤ 950 hPa bestimmt. Diese besonders kräftigen Tiefdruckgebiete sind erfahrungsgemäß mit einem großskaligen Sturmfeld verbunden. In der Sturmsaison von November bis März treten zwischen Null (1968/69 und 1969/70) und 18 (2013/14) dieser Tiefs auf. Die jährliche Vari-

abilität ist somit sehr groß. Von 1956/57 bis zum Ende der 1980er Jahre treten relativ wenige Sturmtiefs auf, danach ist ihre Häufigkeit deutlich erhöht (Abb. 5.1-2). Dieser zeitliche Verlauf korrespondiert sehr eng mit dem zeitlichen Verlauf des NAO-Index, der bis 1980 überwiegend negative Werte aufweist, danach häufiger im positiven Bereich liegt (z.B. <https://climatedata-guide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>).

Eine andere Möglichkeit sind aus dem geostrophischen Wind abgeleitete Sturmindices (KRUEGER & VON STORCH 2011, 2012; SCHMIDT & VON STORCH 1993). Hierfür wird aus langen Druckzeitreihen der geostrophische Wind berechnet, aus dem verschiedene Sturmparameter abgeleitet werden können. Diese Methode funktioniert am zuverlässigsten über dem Ozean und flachem Gelände. Aber auch indirekte Sturmproxies, wie aus Forst- oder Gebäudeschäden abgeleitete Werte, werden verwendet; hierbei sollten allerdings Änderungen der Bevölkerungs- und Gebäudedichte oder anderer Güter und vor allem deren Versicherungswerte berücksichtigt werden. Zur Bestimmung der vergangenen Sturmtätigkeit werden jedoch nicht nur Messwerte genutzt, sondern auch regionale und globale Klimamodellstudien (Abb. 5.1-3 zeigt einen Orkan über dem Nordatlantik in einem hochaufgelösten, globalen Klimamodell Datensatz für die letzten Jahrzehnte der letzten Jahrzehnte bis 1000 Jahre (unter anderem BRÖNNIMANN et al. 2012, FISCHER-BRUNS et al. 2005, XIA et al. 2013, 2016). Auch sogenannte Reanalysen sind heute über mehrere Jahr-

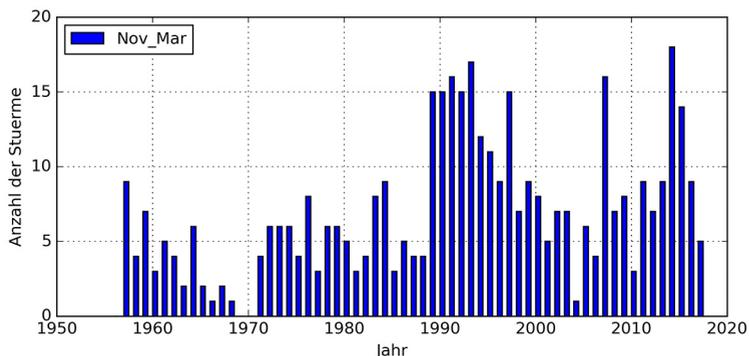


Abb. 5.1-2: Jährliche Anzahl der Tiefdruckgebiete in der Sturmsaison von Nov.-März über dem Nordatlantik mit einem Kerndruck ≤ 950 hPa nach FRANKE (2009).

zehnte bis hin zu über 100 Jahren verfügbar. Dies sind Wetterdatensätze, in die der Großteil der verfügbaren Wetterdaten wie Stations-, Bojen- und Satellitenmessungen oder auch Flugzeug- und Schiffsdaten eingehen, die dann mit einem Modell auf ein gleichmäßiges räumliches Gitter gebracht und auch zeitlich homogenisiert werden. Die meisten der Studien, die die letzten 100-1.000 Jahre betrachten, zeigen große, dekadische Schwankungen in der Anzahl der Stürme über dem Nordatlantik. Aus geostrophischen Windgeschwindigkeiten abgeleitete Sturmindexe (ALEXANDERSSON et al. 1998, 2000; SCHMIDT & VON STORCH 1993) zeigen eine hohe Sturmaktivität in den frühen 1880er Jahren und einen anschließenden Abstieg bis in die frühen 1960er Jahre. Nach einem darauffolgenden Anstieg bis Mitte der 1990er zeigt sich weitere dekadische Variabilität.

Dieser Anstieg der Sturmaktivität von den frühen 1960er Jahren bis Mitte der 1990er Jahre spiegelt sich auch in vielen Studien wider, die auf Reanalysen und Klimamodelldaten basieren und die nur die letzten drei bis sechs Jahrzehnte betrachten (z.B. LECKEBUSCH et al. 2008, RAIBLE et al. 2008, SCHNEIDERIT et al. 2007, SIMMONDS & KEAY 2002, TRIGO 2006, WANG et al. 2006, WEISSE et al. 2005). Wenn jedoch längere Zeiträume betrachtet werden, mindestens 100 Jahre oder bis hin zu den vergangenen 1.000 Jahren, zeigen sich lediglich große Schwankungen auf einer Zeitskala von Jahrzehnten, die aber keinen Langzeittrend aufweisen (FISCHER-BRUNS et al. 2005; GANSKE et al. 2016; XIA et al. 2013).

Zukunftsszenarien für Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa

Für die Bevölkerung der Küsten Nordeuropas ist vor allem die Frage interessant, wie sich Stürme zukünftig verändern könnten, sowohl in ihrer Anzahl als auch in ihrer Intensität und der Lage ihrer Zugbahnen. Um diese Frage zu beantworten, werden globale und regionale Klimamodelle eingesetzt, die unterschiedliche Emissionsszenarien verwenden. Diese Szenarien berücksichtigen mögliche Entwicklungen der Bevölkerungszahlen, technische und wirtschaftliche Faktoren und leiten daraus Treibhausgasemissionen ab. Diese wurden beschrieben im IPCC *Special Report on Emissions Scenarios* (IPCC 2000) und beinhalten unter anderem Kohlendioxid, Methan, Lachgas Stickoxide, Kohlenmonoxid, Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid, Schwefelhexafluorid und Stickoxide. Für den aktuellen fünften Sachstandsbericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (PACHAURI & MEYER 2014) wurden vier neue Emissionsszenarien entwickelt, die sogenannten »Representative Concentration Pathways«, die eine Spanne von Strahlungswerten für das Jahr 2100 zwischen 2,6 und 8,5 W/m² (VAN VUUREN et al. 2011) beschreiben. Diese atmosphärischen Emissionswerte gehen in die Klimamodelle ein und so können mögliche zukünftige Klimaentwicklungen berechnet werden. Da die zukünftigen gesellschaftlichen und ökonomischen Änderungen mit großen Unsicherheiten verbunden sind, werden meist unterschiedliche Emis-

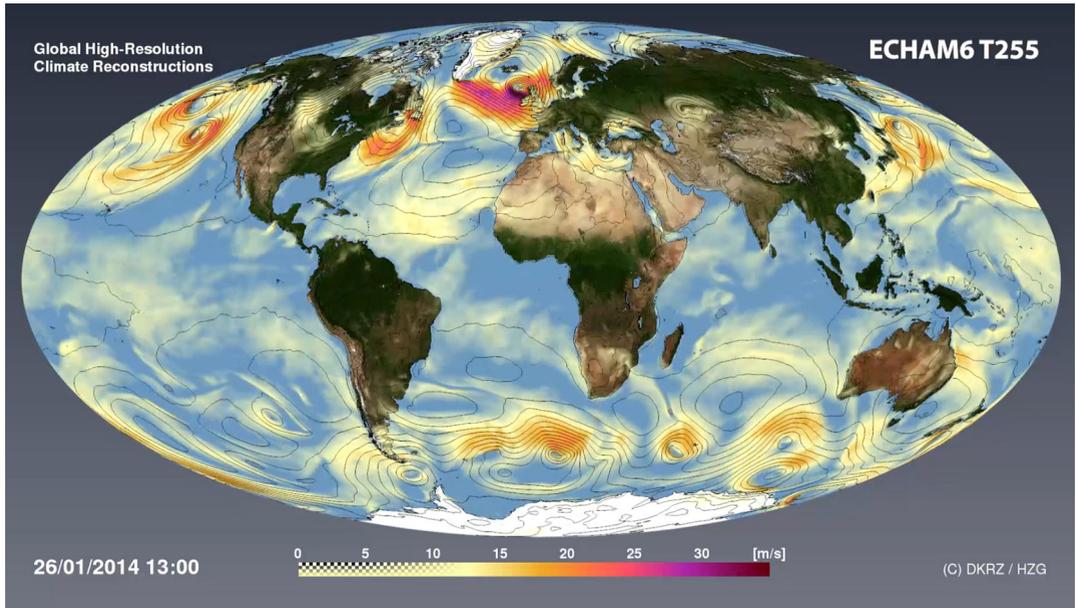


Abb. 5.1-3: Orkantief Lilli nordwestlich der Britischen Inseln am 26.01.2014 in einer globalen Simulation des atmosphärischen Klimamodells ECHAM6 (SCHUBERT-FRISTUS et al. 2017). Die schwarzen Isolinien zeigen den Druck auf Meeressniveau und die farbigen Felder die Windgeschwindigkeit [m/s] in einer Höhe von 10 m. Visualisierung: M. Böttinger, Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ).

sionsszenarien verwendet, mit denen dann sehr unterschiedliche Entwicklungen abgedeckt werden können.

Es gibt sowohl regionale als auch globale Klimamodellstudien zur Sturmaktivität der Zukunft (u.a. ANDERSEN et al. 2001, BENGSSON & HODGES 2006, BENISTON et al. 2007, CARNELL & SENIOR 1998, GENG & SUGI 2003, DE WINTER et al. 2013, HARVEY et al. 2012, LAMBERT 2004, LAMBERT & FYFE 2006, LECKEBUSCH & ULBRICH 2004, PINTO et al. 2009, 2010, 2012, ULBRICH & CHRISTOPH 1999, ULBRICH et al. 2008). Dabei sind die Ergebnisse in Bezug auf die Frage, ob die Winterstürme häufiger werden oder nicht, sehr unterschiedlich. Dagegen prognostizieren fast alle Untersuchungen eine Intensivierung der Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa (FESER et al. 2015) im Zuge eines sich wandelnden Klimas. Der Storm Track verlagert sich in den Zukunftsszenarien meist polwärts (BENGSSON & HODGES 2006, BENGSSON et al. 2009, FISCHER-BRUNS et al. 2005, HALL et al. 1994; KNIPPERTZ et al. 2000), oder dehnt sich ostwärts aus in Richtung Europa (ULBRICH et al. 2008, WOOLLINGS et al. 2012, ZAPPA et al. 2013).

Schlussfolgerungen und aktuelle Forschungsfragen

Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa zeigen große dekadische Variabilität und auch deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr, ein stetiger Langzeittrend für die letzten hundert Jahre und länger ist jedoch nicht zu erkennen. Ob sich die Stürme in ihrer Anzahl, Lage und Stärke verändert haben und auch um zukünftige Entwicklungen der Sturmtätigkeit besser abschätzen zu können sind vor allem lange und homogene meteorologische Zeitreihen nötig, die jedoch nur für wenige Orte zur Verfügung stehen. Es gibt bereits lange Reanalysedatensätze für die vergangenen hundert und mehr Jahre, allerdings beinhalten diese eine zunehmende Stationsdichte über die Zeit oder auch Änderungen der Instrumentierung und Messqualität, wie z.B. die Einführung der Satellitendaten Ende der 1970er Jahre. Diese Faktoren beeinflussen Langzeitstatistiken der Sturmtätigkeit. Um lange Messzeitreihen weiter zu verlängern wird unter anderem die nichtlineare statistische analog-upscaling Methode (SCHENK & ZORITA 2012) verwendet, mit der Windfelder und Stürme rekonstruiert werden können. Messwerte von nur wenigen Stationen werden dabei mit regionalen Klimasimulationen kombiniert um hochaufgelöste Wetterdaten der Vergangenheit zu gewinnen. In den vergangenen Jahren und auch noch aktuell werden handschriftliche meteorologische Aufzeichnungen von Stationen an Land und auf Schiffen digitalisiert und über nationale und internationale Archive verfügbar gemacht (THORNE et al. 2017). Luftdruckdaten kön-

nen dann beispielsweise als Sturmproxies für geostrophische Winddreiecke verwendet werden (WAGNER et al. 2016). Auch alte Schiffslogbücher (KÜTTEL et al. 2010), küstennahe Dünensedimente (BIERSTEDT et al. 2017) oder Wasserstandsmessungen von Pegelstation an der Küste bieten wertvolle Archive des vergangenen Windklimas. Für Zukunftsszenarien aus Klimamodellen sind die Resultate zur Anzahl der Stürme über dem Nordatlantik verschiedener Studien sehr uneinheitlich, aber die allermeisten Arbeiten zeigen eine Intensivierung der Stürme. Die Verlagerung des Storm Tracks wird meist polwärts oder als ostwärts gerichtete Ausdehnung in Richtung Europa projiziert.

Eine offene Frage ist, inwieweit der Klimawandel bereits einen Einfluss auf die Sturmtätigkeit hat. Hier fehlen noch gezielte Studien zu extratropischen Stürmen, in denen geprüft wird, ob eine beobachtete Veränderung der Stürme auf den menschengemachten Klimawandel zurückzuführen ist oder doch vor allem natürliche Schwankungen widerspiegelt (»*Detection and Attribution*«). Auch der Einfluss von sich im Zuge des Klimawandels verändernden Aerosolen auf Stürme sollte weiter erforscht werden.

Literatur

- ALEXANDER, L. V., S. F. B. TETT & T. JONSSON (2005): Recent observed changes in severe storms over the United Kingdom and Iceland. *Geophys Res Lett*, 32, L13704-L13704.
- ALEXANDERSSON, H., T. SCHMITH, K. IDEN & H. TUOMENVIRTA (1998): Long-term variations of the storm climate over NW Europe. *Glob. Atmos Ocean Syst*, 6, 97-120.
- ALEXANDERSSON, H., H. TUOMENVIRTA, T. SCHMITH & K. IDEN (2000): Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. *Clim Res*, 14, 71-73.
- ANDERSEN, U. J., E. KAAS & W. MAY (2001): Changes in the storm climate in the North Atlantic/European region as simulated by GCM timeslice experiments at high resolution. <http://www.dmi.dk/dmi/dke01-1.pdf>.
- BENGSSON, L. & K. I. HODGES (2006): Storm Tracks and Climate Change. *J Clim*, 19, 3518-3543.
- BENGSSON, L., K. I. HODGES & N. KEENLYSIDE (2009): Will Extratropical Storms Intensify in a Warmer Climate? *J Clim*, 22, 2276-2301.
- BENISTON, M., D. B. STEPHENSON, O. B. CHRISTENSEN, C. A. T. FERRO et al. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change*, 81, 71-95, doi:10.1007/s10584-006-9226-z.
- BIERSTEDT, S. E., B. HÜNIGKE, E. ZORITA & J. LUDWIG (2017): A wind proxy based on migrating dunes at the Baltic Coast: statistical analysis of the link between wind conditions and sand movement. *Earth Syst Dynam Discuss*, doi:10.5194/esd-2016-71.
- BRÖNNIMANN, S., O. MARTIUS, H. VON WALDOW, C. WELKER et al. (2012): Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. *Meteorol Z*, 21, 13-27, doi:10.1127/0941-2948/2012/0337.
- CARNELL, R. E. & C. A. SENIOR, 1998: Changes in mid-latitude variability due to increasing greenhouse gases and sulphate aerosols. *Clim Dynam*, 14, 369-383.
- FESER, F., M. BARCIKOWSKA, O. KRUEGER, F. SCHENK et al. (2015): Storminess over the North Atlantic and Northwestern Europe - A Review. *Q J R Meteorol Soc*, 141, 350-382, doi:10.1002/qj.2364.
- FISCHER-BRUNS, I., H. VON STORCH, J. F. GONZALEZ-ROUCO & E. ZORITA (2005): Modelling the variability of midlatitude storm activity on decadal to century time scales. *Clim Dynam*, 25, 461-476, doi:10.1007/s00382-005-0036-1.
- FRANKE, R. (2009): Die Nordatlantischen Orkantiefs seit 1956. *Naturwissenschaftliche Rundsch.*, 7, 349-356.
- GANSKE, A., B. TINZ, G. ROSENHAGEN & H. HEINRICH (2016): Interannual and Multidecadal Changes of Wind Speed and Directions over the North Sea from Climate Model Results. *Meteorol Z*, 25, 463-478, doi:10.1127/metz/2016/0673.

- GENG, Q. & M. SUGI (2003): Possible Change of Extratropical Cyclone Activity due to Enhanced Greenhouse Gases and Sulfate Aerosols - Study with a High-Resolution AGCM. *J. Clim.*, 16, 2262-2274.
- HALL, N. M. J., B. J. HOSKINS, J. VALDES, P. & C. A. SENIOR (1994): Storm tracks in a high-resolution GCM with doubled carbon dioxide. *Q J R Meteorol Soc.*, 120, 1209-1230.
- HANNACHI, A. & M. STENDEL (2016): North Sea Region Climate Change Assessment. 489-493, doi:10.1007/978-3-319-39745-0.
- HARNIK, L. & E. K. M. CHANG (2003): Storm Track Variations As Seen in Radiosonde Observations and Reanalysis Data. *J. Clim.*, 16, 480-495.
- HARVEY, B. J., L. C. SHAFFREY, T. J. WOOLLINGS, G. ZAPPA et al. (2012): How large are projected 21st century storm track changes? *Geophys Res Lett.*, 39, doi:10.1029/2012GL052873.
- HICKEY, K. R. (2003): The storminess record from Armagh Observatory, Northern Ireland, 1796-1999. *Weather*, 58, 28-35.
- IPCC (2000): Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY.
- KNIPPERTZ, P., U. ULBRICH & P. SPETH (2000): Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Clim Res.*, 15, 109-122.
- KRUEGER, O. & H. VON STORCH (2011): Evaluation of an Air Pressure-Based Proxy for Storm Activity. *J. Clim.*, 24, 2612-2619.
- KRUEGER, O. & H. VON STORCH (2012): The informational value of pressure-based single-station proxies for storm activity. *J. Atmos. Technol.*, 29, 569-580.
- KÜTTEL, M., E. XOPLAKI, D. GALLEGO, L. LUTERBACHER et al. (2010): The importance of ship log data: reconstructing North Atlantic, European and Mediterranean sea level pressure fields back to 1750. *Clim Dynam.*, 34, 1115-1128, doi:10.1007/s00382-009-0577-9.
- LAMBERT, S. J. (2004): Changes in winter cyclone frequencies and strengths in transient enhanced greenhouse warming simulations using two coupled climate models. *Atmosphere-Ocean*, 42, 173-181, doi:10.3137/ao.420302.
- LAMBERT, S. J. & J. C. FYFE (2006): Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Clim Dynam.*, 26, 713-728, doi:10.1007/s00382-006-0110-3.
- LECKEBUSCH, G. C. & U. ULBRICH (2004): On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Glob. Planet. Change*, 44, 181-193.
- LECKEBUSCH, G. C., D. RENGGLI & U. ULBRICH (2008): Development and application of an objective storm severity measure for the Northeast Atlantic region. *Meteorol Z.*, 17, 575-587, doi:10.1127/0941-2948/2008/0323.
- LINDENBERG, J., H.-T. MENGELKAMP & G. ROSENHAGEN (2012): Representativity of near surface wind measurements from coastal stations at the German Bight. *Meteorol Z.*, 21, 099-106.
- MATULLA, C., W. SCHÖNER, H. ALEXANDERSSON, H. VON STORCH et al. (2007): European storminess: late nineteenth century to present. *Clim Dynam.*, 31, 125-130, doi:10.1007/s00382-007-0333-y.
- PACHAURI, R. K. & L. A. MEYER (2014): Climate Change - Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC.
- PINTO, J. G. & C. C. RAIBLE (2012): Past and recent changes in the North Atlantic oscillation. *WIREs Clim Change*, 3, 79-90, doi:10.1002/wcc.150.
- PINTO, J. G., C. C. RAIBLE, S. ZACHARIAS, A. H. FINK et al. (2009): Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Clim Dynam.*, 32, 711-737, doi:10.1007/s00382-008-0396-4.
- PINTO, J. G., C. C. RAIBLE, C. P. NEUHAUS, G. C. LECKEBUSCH et al. (2010): Estimation of wind storm impacts over Western Germany under future climate conditions using a statistical-dynamical downscaling approach. *Tellus A*, 62, 188-201, doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00424.x.
- PINTO, J. G., C. C. RAIBLE, M. K. KARREMAN, K. BORN et al. (2012): Loss potentials associated with European windstorms under future climate conditions. *Clim Res.*, 54, 1-20, doi:10.3354/cr01111.
- RAIBLE, C., P. M. DELLA-MARTA, C. SCHWIERZ et al. (2008): Northern Hemisphere extratropical cyclones: a comparison of detection and tracking methods and different reanalyses. *Mon Weather Rev.*, 136, 880-897.
- SCHENK, F. & E. ZORITA (2012): Reconstruction of high resolution atmospheric fields for Northern Europe using analog-upscaling. *Clim Past*, 8, 1681-1703, doi:10.5194/cp-8-1681-2012.
- SCHIESSER, H. H., C. PFISTER & J. BADER (1997): Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/1865-1993/1994. *Theor Appl Clim.*, 58, 1-19, doi:10.1007/BF00867428.
- SCHMIDT, H. & H. VON STORCH (1993): German Bight storms analysed. *Nature*, 365, 791-791.
- SCHNEIDERREIT, A., R. BLENDER, K. FRAEDRICH & F. LUNKEIT (2007): Icelandic climate and North Atlantic cyclones in ERA-40 reanalyses. *Meteorol Z.*, 16, 017-023, doi:10.1127/0941-2948/2007/0187.
- SCHUBERT-FRISIUS, M., F. FESER, H. VON STORCH & S. RAST (2017): Optimal spectral nudging for global dynamic downscaling. *Mon. Weather Rev.*, 145, 909-927, doi:10.1175/MWR-D-16-0036.1.
- SICKMOELLER, M., BLENDER R. & K. FRAEDRICH (2000): Observed winter cyclone tracks in the northern hemisphere in re-analysed ECMWF data. *Q J R Meteorol Soc.*, 126, 591-620.
- SIMMONDS, I. & K. KEAY (2002): Surface fluxes of momentum and mechanical energy over the North Pacific and North Atlantic Oceans. *Meteorol Atmos Phys*, 80, 1-18.
- THORNE, P., R. J. ALLAN, L. ASHCROFT, P. BROHAN et al. (2017): Towards an integrated set of surface meteorological observations for climate science and applications. *Bull Amer Meteor Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-16-0165.1.
- TRIGO, I. F. (2006): Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Clim Dynam.*, 26, 127-143, doi:10.1007/s00382-005-0065-9.
- ULBRICH, U. & M. CHRISTOPH (1999): A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Clim Dynam.*, 15, 551-559.
- ULBRICH, U., M. CHRISTOPH, J. G. PINTO, H. KUPFER et al. (2008): Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations. *J. Clim.*, 21, 1669-1679, doi:10.1175/2007JCLI1992.1.
- VAN VUUREN, D. P., J. EDMONDS, M. KAINUMA, K. RIAHI et al. (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change*, 109, 5-31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- WAGNER, D., B. TINZ & H. VON STORCH (2016): Signal Stations: Newly Digitized Historical Climate Data of the German Bight and the Southern Baltic Sea Coasts. *J. Atmos Ocean Technol.*, 33, 2735-2741, doi:10.1175/JTECH-D-15-0199.1.
- WANG, X. L., V. R. SWAIL & F. W. ZWIERS (2006): Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA40 with NCEP-NCAR reanalysis for 1958-2001. *J. Clim.*, 19, 3145-3166.
- WANNER, H., S. BRÖNNIMANN, C. CASTY, D. GYALISTRAS et al. (2001): North Atlantic Oscillation - Concepts And Studies. *Surv. Geophys.*, 22, 321-381.
- WEISSE, R., H. VON STORCH & F. FESER (2005): Northeast Atlantic and North Sea Storminess as Simulated by a Regional Climate Model during 1958-2001 and Comparison with Observations. *J. Clim.*, 18, 465-479.
- DE WINTER, R. C., A. STERL & B. G. RUESSINK (2013): Wind extremes in the North Sea Basin under climate change: An ensemble study of 12 CMIP5 GCMs. *J. Geophys Res.*, 118, 1601-1612, doi:10.1002/jgrd.50147.
- WOOLLINGS, T., J. M. GREGORY, J. G. PINTO, M. REYERS et al. (2012): Response of the North Atlantic storm track to climate change shaped by ocean-atmosphere coupling. *Nat Geosci.*, doi:10.1038/NNGEO1438.
- XIA, L., H. VON STORCH & F. FESER (2013): Quasi-stationarity of centennial Northern Hemisphere midlatitude winter storm tracks. *Clim Dyn.*, 41, 901-916, doi:10.1007/s00382-012-1543-5.
- XIA, L., H. VON STORCH, F. FESER & J. WU (2016): A Study of quasi-millennial extratropical winter cyclone activity over the Southern Hemisphere. *Clim. Dyn.*, 47, 2121-2138, doi:10.1007/s00382-015-2954-x.
- YIN, J. H. (2005): A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophys Res Lett.*, 32, L18701-L18701, doi:10.1029/2005GL023684.
- ZAPPA, G., L. C. SHAFFREY, K. I. HODGES, P. G. SANSOM et al. (2013): A multi-model assessment of future projections of North Atlantic and European extratropical cyclones in the CMIP5 climate models. *J. Clim.*, doi:10.1175/JCLI-D-12-00573.1.

Kontakt:

Dr. Frauke Feser (frauke.feser@hzg.de)
 Helmholtz-Zentrum Geesthacht
 Institut für Küstenforschung
 Dr. Birger Tinz (birger.tinz@dwd.de)
 Deutscher Wetterdienst, Hamburg (DWD)
 Maritime Klimaüberwachung

Feser, F. & B. Tinz (2018): Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). Warnsignal Klima: Extremereignisse. pp. 201-206. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.extremereignisse.29.