Synoptische Untersuchungen von Tagen mit Starkwind / Böen an hessischen Wetterstationen

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)
in
Meteorologie

an der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main
angefertigt am Institut für Atmosphäre und Umwelt des Fachbereichs 11
und am Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie

vorgelegt von
Hanna Barner
geb. am 08.10.2002 in Kirchheim unter Teck

Erstgutachter/in: Prof. Dr. rer. nat. Bodo Ahrens
Zweitgutachter/in: PD Dr. Heike Hübener

Abgabe der Arbeit am 18.02.2026

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Ich habe die Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis eingehalten.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Frankfurt, den 18.02.2026

_____

Unterschrift

Zusammenfassung

Im Vergleich zu anderen Wetterextremen wie Hitze und Starkniederschlag sind die Projektionen des zukünftigen Starkwindklimas im anthropogenen Klimawandel mit größeren Unsicherheiten behaftet. Für konvektiv verursachte Starkwindereignisse, die in Mitteleuropa im Sommer häufiger auftreten als im Winter, sind diese Unsicherheiten besonders groß (Seneviratne et al. 2021).

Diese Bachelorarbeit untersucht die Böenklimatologie von Hessen anhand der Jahre 1995 bis 2024, um die gegenwärtige Bedeutung von sommerlichen Starkwindtagen zu beurteilen. Dazu werden die täglichen Böenspitzen von 18 Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes in Hessen und einer Umgebung von 50 km ausgewertet. Starkwind wird definiert ab dem lokalen jährlichen 98 %-Perzentil der täglichen Böenspitze.

Es zeigt sich eine deutlich ausgeprägte Saisonalität mit hohen Starkwindhäufigkeiten im Winterhalbjahr (Oktober bis März) und niedrigen Starkwindhäufigkeiten im Sommerhalbjahr (April bis September). Die Charakteristika von Starkwindtagen unterscheiden sich deutlich zwischen Sommer- und Winterhalbjahr. Im Winterhalbjahr sind mit durchschnittlich 4,9 Stationen pro Starkwindtag etwa doppelt so viele Stationen betroffen wie im Sommerhalbjahr mit 2,4 Stationen. Im Sommerhalbjahr sind zudem fast alle (97 %) Starkwindereignisse nur einen Tag lang, im Winterhalbjahr sind es nur 77 %. Der Sommeranteil aller Starkwindtage einer Station weist einen deutlichen Zusammenhang mit der Höhenlage der Stationen auf. Während an der Bergstation Wasserkuppe 9,8 % der Starkwindtage im Sommerhalbjahr liegen, sind es in tieferen, bevölkerungsreichen Lagen bis zu 37,9 % (Frankfurt/Main).

Der Einfluss der Großwetterlage nach Hess und Brezowsky auf die Starkwindhäufigkeit im Sommer- und Winterhalbjahr wurde mit Häufigkeitsanomalien nach Wapler und James (2015) analysiert. Wetterlagen mit signifikant positivem Einfluss auf die Starkwindhäufigkeiten sind in beiden Halbjahren die westlichen Wetterlagen *WZ*, *NWZ* und *SWZ* (West-, Nordwest- und Südwestlage, zykonal). Im Sommerhalbjahr haben zusätzlich die süd(west)lichen Wetterlagen *SWA* (Südwestlage, antizykonal), *TB* (Tief Britische Inseln) und *TRW* (Trog Westeuropa) einen signifikant positiven Einfluss auf die Starkwindhäufigkeit. Die synoptischen Situationen dieser Großwetterlagen konnten meteorologisch eingeordnet werden. Die Ergebnisse stimmen trotz teilweise kleiner Datenbasis im Wesentlichen mit bisherigen Arbeiten überein.

Aus dieser Arbeit geht hervor, dass sommerliche Starkwindtage im heutigem Klima von Hessen insbesondere in den tiefer gelegenen, bevölkerungsreichen Gebieten einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der Starkwindtage ausmachen. Sommerliche Starkwindereignisse sollten deshalb in zukünftiger Forschung stärker als bisher berücksichtigt werden, sodass eine gezielte Klimaanpassung auf Basis von zuverlässigen Daten möglich wird.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung i

Abbildungsverzeichnis iii

Tabellenverzeichnis iii

1 Einleitung 1

2 Forschungsstand und Forschungsfrage 4
2.1 Meteorologische Grundlagen . . . 4
2.1.1 Definition von Starkwind . . . 4
2.1.2 Wetterlagenklassifikationen . . . 5
2.2 Forschungsstand . . . 7
2.2.1 Klimatologie von Windböen und Starkwindereignissen . . . 7
2.2.2 Starkwindereignisse und Wetterlagen . . . 9
2.3 Forschungsfrage . . . 10

3 Daten und Methoden 11
3.1 Datengrundlage . . . 11
3.2 Auswahl der Messstationen . . . 12
3.3 Berechnung der Perzentile . . . 14
3.4 Starkwindtage und Starkwindereignisse . . . 16
3.5 Chi-Quadrat-Test . . . 17
3.6 Anomalien der Starkwindhäufigkeiten . . . 18

4 Ergebnisse 19
4.1 Perzentile . . . 19
4.2 Starkwindtage und Starkwindereignisse . . . 21
4.2.1 Jahreszeitliche Verteilung der Daten für verschiedene Perzentil-Varianten 21
4.2.2 Eigenschaften von Starkwindtagen/-ereignissen im Sommer und Winter 24
4.3 Zusammenhang von Starkwindtagen und Großwetterlage . . . 28
4.3.1 Stationsübergreifende Häufigkeitsanomalien . . . 28
4.3.2 Stationsbezogene Häufigkeitsanomalien . . . 30
4.3.3 Vergleich der Häufigkeitsanomalien mit einer längeren Zeitreihe . . . 32
4.3.4 Synoptische Diskussion einzelner Großwetterlagen . . . 33

5 Diskussion 39

6 Fazit und Ausblick 42

Anhang iv

Abkürzungsverzeichnis v

Literatur und Hilfsmittel vi

Abbildungsverzeichnis

1 Entwurzelter Baum in Wiesbaden-Biebrich 1
2 Karte der verwendeten Wetterstationen 13
3 Karte der Langzeit-Perzentile 20
4 Zeitreihen der Jahres-Perzentile 21
5 Monatliche Verteilung der Starkwindtage für die Perzentil-Varianten 22
6 Höhenabhängigkeit des Sommeranteils von stationsbezogenen Starkwindtagen . 25
7 Betroffene Stationen an stationsübergreifenden Starkwindtagen 26
8 Histogramme der Länge von Starkwindereignissen 27
9 Stationsübergreifende Häufigkeitsanomalien für Starkwind 28
10 Stationsbezogene Häufigkeitsanomalien für Starkwind 31
11 Häufigkeitsanomalien Gießen/Wettenberg 1951-2024 und 1995-2024 32
12 WZ (Westlage, zyklonal) 34
13 WS (Südliche Westlage) 36
14 SWA (Südwestlage, antizyklonal) 37
15 TRW (Trog Westeuropa) 38

Tabellenverzeichnis

1 Die 29 Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky 6
2 Liste der 18 ausgewählten Messstationen 14
3 Sommeranteil der Starkwindtage für die Perzentil-Varianten 23
4 P-Werte der Chi-Quadrat-Tests für ausgewählte Großwetterlagen 29

1 Einleitung

Neben Hitze und Starkregen stellt Starkwind eine erhebliche Wettergefahr für die Gesellschaft dar. Wind verursacht zum Beispiel Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch herumfligende oder herunterfallende Gegenstände. Das Abbrechen von Ästen oder gar Entwurzeln von ganzen Bäumen führt regelmäßig zu Personenschäden und einer Behinderungen des öffentlichen Verkehrs. Dabei werden die größten Schäden von Windböen verursacht, bei denen die Windgeschwindigkeit kurzzeitig deutlich über der mittleren Windgeschwindigkeit an einem Ort liegt.

Auf Platz drei der verheerendsten Naturkatastrophen in Deutschland in den Jahren 2001-2021 steht der Sturm Kyrill, der im Januar 2007 einen Schadensaufwand von etwa 3,65 Milliarden Euro verursachte (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. 2022). Solche starken Stürme mit großflächigen Auswirkungen, die im Winter häufiger und stärker sind als im Sommer, sind aber nicht die einzige Ursache für starke Windböen. Auch deutlich kleinere und kürzere Gewitter verursachen immer wieder erhebliche Schäden, wie Abbildung 1 anhand eines entwurzelten Baums in Wiesbaden-Biebrich zeigt.



Abbildung 1: Entwurzelter Baum in Wiesbaden-Biebrich, aufgenommen am 21.06.2013 (Quelle: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie).

Im Zuge des anthropogenen Klimawandels verändern sich Häufigkeit und Intensität von vielen extremen Wettereignissen. Der sechste Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) fasst den aktuellen Forschungsstand zu diesem Thema zusammen. Demnach gibt es beispielsweise sehr breite wissenschaftliche Evidenz, dass die maximalen Temperatur und die Häufigkeit von Hitzewellen in Mitteleuropa in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat und in Zukunft weiter zunehmen wird. Die Evidenz für klimawandelbedingte Veränderungen von extremen Windereignissen ist laut IPCC dagegen wesentlich geringer, weil extreme Stürme selten und kurzlebig sind und ihr Auftreten einer hohen Variabilität unterliegt (Seneviratne et al. 2021).

Für extratropische Tiefdruckgebiete sind in zukünftigem Klima Veränderungen zu erwarten, auch wenn Aussagen diesbezüglich noch mit Unsicherheiten verbunden sind. So nimmt die Anzahl der extratropischen Zyklonen seit den 1980ern auf der Nordhalbkugel zu und deren Zugbahnen verlagern sich nordwärts (Gulev et al. 2021). Die Änderungen in den maximalen Windgeschwindigkeiten von Tiefdruckgebieten wird in Zukunft aber eher gering ausfallen. Allerdings könnte eine weitere nordwärts gerichtete Verlagerung der Zugbahnen von Stürmen in Zukunft zu einer deutlichen Veränderung der lokalen maximalen Windgeschwindigkeiten führen (Seneviratne et al. 2021).

Die zukünftige Entwicklung von starken konvektiven Stürme vorherzusagen ist noch schwerer als für extratropische Zykonen, da die wenigsten der aktuellen Klimamodelle Konvektion auflösen können. Aus diesem Grund werden auch die atmosphärischen Bedingungen untersucht, die Konvektion begünstigen, wie zum Beispiel das Vorliegen von konvektiv verfügbarer potentieller Energie (CAPE, engl. Convective Available Potential Energy) oder vertikaler Windscherung (Ranasinghe et al. 2021). Speziell für Europa sind bisher nur wenige Studien mit diesem Ansatz bekannt, wie z. B. die von Púčik et al. (2017), wonach eine Zunahme von CAPE bei ungebremsten Klimawandel für weite Teile Europas zu erwarten ist.

Neben der Sturmhäufigkeit und Intensität beeinflussen je nach Betrachtungsweise weitere nichtmeteorologische Faktoren die von Starkwind verursachten Schäden. Hierzu gehören zum Beispiel der Zustand von Wäldern und Gebäuden und auch die Bevölkerungsdichte bzw. Bebauungsdichte. Der Einfluss solcher Faktoren auf die zu erwartenden Schäden bei einem gegebenen Sturmereignis wird mit Sturmschadenmodellen modelliert. Klawa und Ulbrich (2003) berechneten mit einem solchen Modell, dass in den Jahren 1970 bis 1997 etwa 80 % der versicherten Sturmschäden von den 50 stärksten Stürmen verursacht wurden. Davon ereignete sich nur ein Sturm im Sommer, wobei die größten Schäden bei diesem Sturm durch Hagel verursacht wurden. Hieran wird deutlich, warum sich die Forschung zu Sturmschäden bisher überwiegend auf Winterstürme konzentriert. Inzwischen ist es sogar möglich, das Risiko für Sturmschäden an einzelnen Bäumen vorherzusagen. Gardiner et al. (2024) modellierten beispielsweise das Schadensrisiko an Bäumen entlang von Zugstrecken in Nordrhein-Westfalen und Thüringen. Sie zeigten damit, dass es grundsätzlich möglich ist, besonders vulnerable Streckenabschnitte mit Hilfe von meteorologischen Vorhersagemodellen zu identifizieren. Für das Sturmklima der Zukunft sind solche hochaufgelösten Aussagen noch nicht möglich, da die zugrunde liegende Entwicklung der Windklimatologie noch mit zu großen Unsicherheiten behaftet ist.

Das am 01.07.2024 in Kraft getretene Bundes-Klimaanpassungsgesetz verpflichtet das Bundesland Hessen, bis zum 31.01.2027 eine vorsorgende Klimaanpassungsstrategie zu erstellen. Diese muss auf „Klimarisikoanalysen und Analysen bereits eingetretener Auswirkungen des Klimawandels auf Grundlage von möglichst regionalen Daten“ (KAnG 2024) aufbauen. Das

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (FZK) am Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ist der zentrale Anlaufpunkt für die hessischen Ministerien, Landkreise und Kommunen zu Fragen der Klimaanpassung. Es stellt schon heute vielfältige Klimadaten und Handlungshilfen zur Verfügung, wie zum Beispiel modellierte Temperatur- und Niederschlagsdaten. Aufgrund des neuen Bundes-Klimaanpassungsgesetzes wird das Informationsangebot des FZKs in Zukunft weiter ausgebaut werden.

Um zukünftig auch zum Thema Wind Informationen zu Verfügung stellen zu können, hat das FZK ein externes Forschungsprojekt an die Freie Universität Berlin vergeben, das inzwischen kurz vor dem Abschluss steht. In diesem Projekt wird die anthropogene Änderung des Sturmklimas für Hessen mit Hilfe von Regionalklimasimulationen untersucht, wobei der Fokus auf Winterstürmen liegt (Ulbrich und Kunz 2025). Der aktuellste vorliegende Zwischenbericht hebt hervor, „dass sich sowohl die Sturmwahrscheinlichkeit als auch das potentielle Schadenrisiko von der nahen Vergangenheit (Winter 1971/72 bis 2000/01) hin zum Ende des aktuellen Jahrhunderts (Winter 2069/70 bis 2098/99) erhöhen, dieses Signal jedoch klein ist (i) im Vergleich zur Winter-zu-Winter- wie auch (ii) zur Modell-zu-Modell-Variabilität“.

Ein weiteres vom FZK beauftragtes Forschungsprojekt an der Goethe-Universität Frankfurt untersuchte das konvektive Gefährdungspotential für Hessen im Klima der Gegenwart und Zukunft (Purr, Brisson und Ahrens 2018). In kontinuierlichen Simulationen mit einem regionalen Klimamodell zeigte sich, dass die Gesamtzahl konvektiver Ereignisse in Hessen bis 2100 nahezu konstant bleibt, während die Häufigkeit großer Zellen zunimmt. Diese Änderung in den Zelleigenschaften führt zu einer Erhöhung des kombinierten konvektiven Gefährdungspotentials von Starkniederschlag, Hagel und Blitzen um etwas über 5 %. Das Gefährdungspotential von Wind wurde in diesem Projekt nicht untersucht, bei einer zunehmenden Häufigkeit starker Zellen liegt die Zunahme starker Windereignisse aber zumindest nahe.

Es ist klar geworden, dass präzise Aussagen zum zukünftigen Sturmklima in Hessen zur Zeit noch kaum möglich sind, insbesondere zu sommerlichen Starkwindereignissen. Diese Bachelorarbeit untersucht deshalb die gegenwärtige Starkwindklimatologie in Hessen anhand von Beobachtungsdaten mit Fokus auf Unterschieden zwischen Sommer und Winter. Das Sturmklima wird dabei in Abhängigkeit der Großwetterlage betrachtet, die einen ersten Anhaltspunkt für die Entstehungsbedingungen von Starkwind liefert. So soll beurteilt werden, welchen Anteil die verschiedenen Jahreszeiten und Phänomene für die Starkwindbelastung in Hessen gegenwärtig ausmachen. Darauf aufbauend kann im Anschluss begründet werden, ob und wie das FZK weitere Forschung zu diesem Thema priorisieren sollte.

2 Forschungsstand und Forschungsfrage

In diesem Kapitel werden zunächst verschiedene meteorologische Ansätze zur Definition von Starkwind und zur Klassifikation von Wetterlagen vorgestellt und die Entscheidungen für die verwendeten Methoden erläutert. Anschließend wird der aktuelle Forschungsstand zur Klimatologie von Starkwindereignissen, auch in Zusammenhang mit Wetterlagen, zusammengefasst. Darauf aufbauend wird dann die Fragestellung für diese Arbeit konkretisiert.

2.1 Meteorologische Grundlagen

2.1.1 Definition von Starkwind

Wind beschreibt die „Verlagerung von Luftteilchen in Bezug auf deren Richtung und Geschwindigkeit“ (Deutscher Wetterdienst 2025c). Es handelt sich beim Wind also um eine dreidimensionale Vektorgröße, die durch die drei räumlichen Komponenten oder Betrag und Richtung angegeben werden kann. Der von den Luftteilchen zurückgelegte Weg pro Zeit ist die Windgeschwindigkeit, die typischerweise in m/s oder km/h angegeben wird. Bei einer Bö (auch Böe) wird „der gemessene 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Sekunden (höchstens 20, mindestens 3 Sekunden anhaltend) um mindestens 5,0 m/s überschritten“ (Deutscher Wetterdienst 2025a). Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert als **Böenspitze** (engl. Peak gust) die maximale beobachtete Windgeschwindigkeit in einem frei wählbaren Zeitraum (z. B. 10 Minuten oder ein Tag). Da die kürzesten Windböen aber auf zu kleinen Skalen auftreten, um nennenswerte Schäden zu verursachen, wird für Böen üblicherweise die mittlere Windgeschwindigkeit über ein Zeitintervall von 3 s verwendet (World Meteorological Organization (WMO) 2024).

Für **Starkwind** gibt es keine einheitliche Definition. Hierfür kommen je nach verwendeter Untersuchungsmethode verschiedene Kriterien zum Einsatz. Einerseits wird Starkwind über die Überschreitung eines festen Schwellwerts definiert. Oftmals wird hierfür eine Schwelle von 25,0 m/s oder 26,0 m/s verwendet, wie z. B. in Gatzen (2013). Andererseits werden Starkwindereignisse auch auf Basis der statistischen Verteilung der gemessenen Windgeschwindigkeiten definiert, z. B. als Überschreitung des lokalen 98%-Perzentils der täglichen Böenspitze. Hierbei wird angenommen, dass an jedem Ort an etwa 2 % der Tage Schäden durch Wind auftreten. Das 98 %-Perzentil der täglichen Böenspitze wird dabei als Wert verwendet, weil es an deutschen Wetterstationen im Flachland in etwa einem Grenzwert von 20 m/s entspricht, ab dem deutsche Versicherungsgesellschaften die entstandenen Schäden erstatten (Klawa und Ulbrich 2003).

Zur Definition und Auswahl von Starkwindtagen werden in dieser Arbeit **Perzentile** jeder einzelnen Station verwendet, keine festen Schwellwerte. Die Filterung der Daten nach Perzentilen hat den Vorteil, dass die stärksten Ereignisse jeder Station enthalten sind, unabhängig von der abso-

luten Höhe der Windgeschwindigkeit, und damit die lokale Windklimatologie wider gespiegelt wird. Wenn Gebäude adaptiv gebaut sind und Bäume an ihre Umgebung angepasst sind (d. h. an Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten an diese angepasst sind), dann treten Schäden von Station zu Station oberhalb von unterschiedlichen Werten der Windgeschwindigkeit auf. Eine Definition von Starkwind auf Basis von festen Schwellwerten ist dann nicht zweckmäßig. Darüber hinaus hat die Verwendung von Perzentilen den Vorteil, dass jede Station in etwa gleich viele Starkwind-Tage aufweist. Bei einer Definition über einen festen Schwellwert dagegen haben Stationen mit durchschnittlich höheren Windgeschwindigkeiten wie z. B. Bergstationen mehr Starkwind-Tage und sind somit im gesamten Datensatz überrepräsentiert.

2.1.2 Wetterlagenklassifikationen

In der Meteorologie und Klimatologie existieren viele verschiedene Methoden, Wetterlagen zu klassifizieren. Durch den Vergleich von meteorologischen Parametern sollen dabei Gruppen von Wetterlagen mit ähnlichen Eigenschaften gebildet werden. Zuerst wurden Wetterlagenklassifikationen für die Anwendung in der Wettervorhersage entwickelt. Seit der Verwendung von Computern und damit der Analyse von großen Datenmengen in der Wissenschaft finden Wetterlagenklassifikationen aber auch eine breite Anwendung in der Klimatologie (Huth et al. 2008). Eine umfassende Vorstellung der verschiedenen Klassifikationen und deren Anwendung würde hier den Rahmen sprengen, hierfür sei auf eine Übersichtsarbeit von Huth et al. (2008) verwiesen. Darin identifizieren die Autoren drei grundlegende Arten von Wetterlagenklassifikationen: subjektive, hybride und objektive Klassifikationen. Im Folgenden wird für jede dieser drei Arten exemplarisch eine Klassifikation vorgestellt, deren Verwendung für diese Arbeit in Betracht gezogen wurde und die für die klimatologische Untersuchung von Windereignissen in Gebrauch ist.

Eine in der klimatologischen Anwendung weit verbreitete Wetterlagenklassifikation ist die von **Hess und Brezowsky**. Ursprünglich von Baur et al. eingeführt, wurde sie von Hess und Brezowsky umfassend überarbeitet und in ihrer aktuellsten Version von Werner und Gerstengarbe (2010) veröffentlicht. Bei dieser Klassifikation handelt es sich um eine subjektive Klassifikation, da der Katalog der Großwetterlagen von Synoptiker/innen erstellt wurde und die Einordnung des täglichen Wetters ebenfalls manuell erfolgt. Die Klassifikation wird dabei für jeden Tag anhand der Höhen- und Bodendruckverhältnisse über Europa und dem Nordatlantik vorgenommen. Dieser Katalog enthält 29 Großwetterlagen, die anhand der Strömungsrichtung zu 3 Zirkulationsformen (zonal, meridional, gemischt) und 10 Großwettertypen zusammengefasst werden können. Hess und Brezowsky führten dabei eine Mindestdauer von drei Tagen als Voraussetzung für die Feststellung einer Großwetterlage ein. Die 29 Großwetterlagen sind in Tabelle 1 zusammen mit den zugehörigen Abkürzungen aufgeführt. Hinzu kommt die Klassifikation *U* für unbestimmte Übergangssituationen, die sich keiner der 29 Großwetterlagen zuordnen lassen und auch weniger als drei Tage andauern können.

Tabelle 1: Die 29 Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky mit Großwettertypen, Zirkulationsformen (Zf) und Abkürzungen (Abk) (nach Werner und Gerstengarbe 2010).

Zf	**Großwettertyp**	**Großwetterlage**	**Abk**
zonal	West	Westlage, antizyklonal	WA
		Westlage, zyklonal	WZ
		Südliche Westlage	WS
		Winkelförmige Westlage	WW
gemischt	Südwest	Südwestlage, antizyklonal	SWA
		Südwestlage, zyklonal	SWZ
	Nordwest	Nordwestlage, antizyklonal	NWA
		Nordwestlage, zyklonal	NWZ
	Hoch Mitteleuropa	Hoch Mitteleuropa	HM
		Hochdruckbrücke (Rücken) Mitteleuropa	BM
	Tief Mitteleuropa	Tief Mitteleuropa	TM
meridional	Nord	Nordlage, antizyklonal	NA
		Nordlage, zyklonal	NZ
		Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal	HNA
		Hoch Nordmeer-Island, zyklonal	HNZ
		Hoch Britische Inseln	HB
		Trog Mitteleuropa	TRM
	Nordost	Nordostlage, antizyklonal	NEA
		Nordostlage, zyklonal	NEZ
	Ost	Hoch Fennoskandien, antizyklonal	HFA
		Hoch Fennoskandien, zyklonal	HFZ
		Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal	HNFA
		Hoch Nordmeer-Fennoskandien, zyklonal	HNFZ
	Südost	Südostlage, antizyklonal	SEA
		Südostlage, zyklonal	SEZ
	Süd	Südlage, antizyklonal	SA
		Südlage, zyklonal	SZ
		Tief Britische Inseln	TB
		Trog Westeuropa	TRW
		Übergang/unbestimmt	U

James (2007) entwickelte eine Wetterlagenklassifikation, die auf den Großwetterlagen von Hess und Brezowsky basiert, diese aber nicht eins zu eins reproduzieren möchte. Die Einteilung erfolgt nicht manuell, sondern numerisch und reproduzierbar anhand der Korrelation der meteorologischen Reanalyse-Felder. Da die zu klassifizierende Wetterlage mit den klimatisch mittleren Feldern der subjektiven Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky verglichen wird, handelt es sich um eine hybride Klassifikation. Es ist zu beachten, dass sich die Häufigkeiten und Charakteristika einzelner Wetterlagen nach James von denen der subjektiven Einteilung nach Hess und Brezowsky unterscheiden: An ca. 39 % der Tage stimmt die Zuordnung zu den beiden Klassifikationen überein. So werden beispielsweise bei James Westlagen im Vergleich zu Hess

und Brezowsky seltener als *WZ* (Westlage, zyklonal) identifiziert. Ein klarer Vorteil dieser Klassifikation ist, dass keine Inhomogenitäten aufgrund der wechselnden Synoptiker/innen enthalten sind. Hinzu kommt, dass sie auch auf Basis von Klimamodelldaten berechnet werden kann und somit Aussagen über Wetterlagen in zukünftigem Klima möglich sind.

Eine vollständig objektive Methode zur Wetterlagenklassifikation ist die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelte **objektive Wetterlagenklassifikation**. Hier wird die Wetterlage anhand von Analyse- und Prognosekarten des DWD nach Zyklonalität auf den Druckniveaus 950 und 500 hPa, Anströmrichtung und Feuchtegehalt in 40 Klassen unterteilt (Bissolli und Dittmann 2001).

Für diese Arbeit wurden als Wetterlagenklassifikation die drei zuvor vorgestellten Klassifikationen in Betracht gezogen. Grundsätzlich sind für klimatologische Untersuchungen Klassifikationen mit einer objektiven und reproduzierbaren Zuordnung der Wetterlagen zu bevorzugen. Die hybride Klassifikation nach James wird in thematisch relevanten Studien verwendet (siehe Abschnitt 2.2.2), hat allerdings den Nachteil, dass die Daten dieser Klassifikation nicht öffentlich zugänglich sind. Die objektive Wetterlagenklassifikation des DWDs ist zwar öffentlich verfügbar, wird aber kaum in thematisch relevanten Studien verwendet. Deshalb fiel die Entscheidung trotz ihrer Subjektivität auf die **Großwetterlagenklassifikation nach Hess und Brezowsky**, weil sie in einer Vielzahl an Studien zum Thema verwendet wird (siehe Abschnitt 2.2.2) und die Daten öffentlich zugänglich sind.

2.2 Forschungsstand

2.2.1 Klimatologie von Windböen und Starkwindereignissen

Die räumliche Ausdehnung von meteorologischen Prozessen, die mit Starkwind einher gehen, unterscheidet sich fundamental: Extratropische Zykonen beeinflussen das Wettergeschehen auf synoptischer Skala, konvektive Prozesse wie Gewitter, Böenfronten und Mesoskalige konvektive Systeme auf der Mesoskala und Tornados auf der Mikroskala. Diese große Bandbreite führt dazu, dass Phänomene mit einer Ausdehnung deutlich unterhalb des typischen Abstands von Wetterstationen in den Beobachtungsdaten systematisch unterrepräsentiert sind. Denn je kleiner ein Phänomen, desto geringer die Wahrscheinlichkeit, dass es von einer Wetterstation registriert wird. Weil kleinskalige konvektive Prozesse im Sommer einen größeren Teil der Starkwindmessungen verursachen, muss also insbesondere im Sommer davon ausgegangen werden, dass die Beobachtungsdaten nicht alle aufgetretenen Starkwindereignisse enthalten.

Die geringe räumliche Auflösung der Daten ist – neben der fehlenden zeitlichen Homogenität langer Messreihen – ein wesentlicher Grund dafür, dass Beobachtungsdaten eher selten zur

Untersuchung von Starkwindereignissen verwendet werden (Gliksman et al. 2023). Auch eine umfassende und auf Beobachtungsdaten basierende Starkwind-/ Böenklimatologie für Deutschland, die sowohl konvektive als auch frontale Prozesse einschließt, ist bisher nicht bekannt. Wegen diesen Schwächen in den Beobachtungsdaten werden oft auch Modelldaten zur Untersuchung von Starkwindereignissen/Windböen verwendet. Einige Studien mit dieser Herangehensweise werden in diesem und dem nächsten Abschnitt vorgestellt, der Fokus liegt aber wegen der Ausrichtung dieser Arbeit auf der Verwendung von Beobachtungsdaten aus Deutschland.

Kasperski (2002) untersuchte als einer der wenigen Autoren Starkwindereignisse in Zusammenhang mit Tiefdruckgebieten, Gewittern und Böenfronten gemeinsam. Er teilte Deutschland anhand von Stationsmessungen in fünf Windzonen mit jeweils einer zugehörigen charakteristischen Windgeschwindigkeit ein, die dem 98%-Perzentil der jeweiligen Zone entspricht. Hessen liegt demnach vollständig in der Zone 1 mit der niedrigsten charakteristischen Starkwindgeschwindigkeit in Deutschland mit 22,5 m/s.

Der Großteil der Forschung zu Starkwindereignissen unterscheidet entweder nach deren Entstehungshintergrund (Tiefdruckgebiete mit einem Schwerpunkt im Winter oder konvektive Ereignissen mit Schwerpunkt im Sommer) oder nach besonderen Charakteristika der beobachteten Phänomene (wie z. B. Derechos). Für Winterstürme der Jahre 1971-2000 (September-April) erstellten Hofherr und Kunz (2010) mit Hilfe von statisitschem Downscaling Windfelder für Deutschland mit einer Auflösung von 1 km x 1 km. Auf Basis von ERA-40 Reanalyse-Daten und Stationsmessungen modellierten die Autoren die räumliche Verteilung von Böengeschwindigkeiten mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 50 % bis 5 %, die statistisch gesehen alle 2 bzw. 20 Jahre auftreten. Es zeigt sich insbesondere der Einfluss der Topographie auf die Böengeschwindigkeiten bei Winterstürmen. Hohe Werte ergeben sich für die höchsten Erhebungen, während tiefer liegende Gebiete durch niedrigere Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet sind, wie es in Hessen für das gesamte Rhein-Main-Gebiet der Fall ist.

Im Sommer sind Tiefdruckgebiete weniger stark als im Winter und konvektive Ereignisse spielen eine größere Rolle bei der Entstehung von Starkwind. Die statistischen Eigenschaften von konvektiven Windböen in Deutschland wurden von Gatzen (2013) anhand von Stationsmessungen aus den Monaten April-September der Jahre 1997-2011 untersucht. Dabei wurden 1035 Messungen mit Geschwindigkeiten von 26 m/s oder mehr 268 Ereignissen zugeordnet. 81% dieser Messungen konnten konvektiven Ereignissen zugeordnet werden. 20 großskalige Events waren für 54% der konvektiv verursachten Windmessungen verantwortlich. Die meisten Ereignisse wurden in den Monaten Juli und Juni detektiert. Auch Mohr et al. (2017) untersuchte konvektive Windböen im Sommerhalbjahr und fand die maximalen Häufigkeiten für die Überschreitung der Grenzwerte von 18 m/s und 25 m/s in den Monaten Juni und Juli. Die Häufigkeit von konvektiven Windböen, die einen Grenzwert von 18 m/s überschreiten, nimmt dabei vom Norden zum

Süden Deutschlands zu. Für die Werte des 90‰-, 95‰- und 99‰-Perzentils einzelner Stationen konnte dagegen kein räumlicher Gradient und kein Bezug zur Orographie festgestellt werden.

Als besonders einflussreiches Phänomen sollen abschließend **Derechos** hervorgehoben werden. Diese großskaligen Windereignisse sind (u. a.) charakterisiert durch hohe Windgeschwindigkeiten auf einer Länge von mindestens 400 km und Windböen über 26 m/s und treten in Zusammenhang mit Mesoskaligen Konvektiven Systemen (Mesoscale Convective Systems, MCSs) auf. Nach Gatzen (2013) trugen Derechos zu 36 % der konvektiven Windmessungen in den Sommerhalbjahren der Jahre 1997-2011 in Deutschland bei. Je nach synoptischer Situtation und Eigenschaften kann zwischen „warm-season-type derechos“ (Mai-August) und „cold-season-type derechos“ (Oktober - April) unterschieden werden (Gatzen et al. 2020).

2.2.2 Starkwindereignisse und Wetterlagen

Bisher sind keine Studien bekannt, die den Zusammenhang von Starkwindereignissen und Wetterlagen unabhängig von den zugrunde liegenden Prozessen untersuchen. Es gibt aber diverse wissenschaftliche Untersuchungen, die sich auf Phänomene fokussieren, die mit Starkwindereignissen in Zusammenhang stehen, wie beispielsweise Winterstürme und Gewitter, von denen die wichtigsten hier vorgestellt werden.

Donat et al. (2010) untersuchten die Häufigkeit von Winterstürmen (Oktober-März) in Abhängigkeit der Wetterlage sowie deren Zugbahnen. Dafür wurde eine hybride Wetterlagenklassifikation verwendet, die auf den Lamb weather types basiert, aber im Gegensatz zu diesen numerisch bestimmt wird. 80 % der Starkwindtage treten demnach bei westlicher Strömung auf. Durch die je nach Wetterlage variierenden Zugbahnen von Tiefdruckgebieten unterscheiden sich auch die regionalen Auswirkungen dieser Stürme. Während zum Beispiel Stürme aus Richtung Nordwest die höchsten Windgeschwindigkeiten über Ostdeutschland und Polen aufweisen, liegt der Schwerpunkt von Stürmen aus Richtung Südwest über Westeuropa.

Kunz, Sander und Kottmeier (2009) untersuchten die Hagelhäufigkeit in Baden-Württemberg in Abhängigkeit von der Wetterlage nach Hess und Brezowsky anhand von Radar- und Versicherungsdaten. Im Sommerhalbjahr (April-September) sind die drei Wetterlagen mit den höchsten Hagelhäufigkeiten *BM* (Brücke Mitteleuropa), *SWZ* (Südwestlage, zyklonal) und *SWA* (Südwestlage, antizyklonal). Bei diesen Wetterlagen wird häufig warme und feuchter Luft aus dem Südwesten nach Deutschland transportiert, die die Gewitterentstehung begünstigt.

Wapler und James (2015) verwendeten die SynopVis Großwetterlagen um Gewitterhäufigkeit und -eigenschaften in Deutschland zu untersuchen. Die SynopVis Großwetterlagen basieren auf der Klassifikation von James und berücksichtigen ergänzend die relative Schichtdicke zwischen 500 hPa und 100 hPa sowie das totale niederschlagbare Wasser der atmosphäreischen Luftsäule.

Hier stellten sich *SZ* (Südlage, zyklonal) und *SEA* (Südostlage, antizyklonal) als Wetterlagen mit den meisten konvektiven Zellen heraus, gefolgt von *SWZ* (Südwestlage, zyklonal), *TRW* (Trog Westeuropa) und *TB* (Tief Britische Inseln). Zum Teil sind die Unterschiede zu den Ergebnissen von Kunz, Sander und Kottmeier sicherlich durch die verschiedenen betrachteten Phänomene (Hagel/Gewitter) und Gebiete (Baden-Württemberg/Deutschland) erklärbar. Wapler und James weisen darüber hinaus aber darauf hin, dass die Wetterlage *BM* in der Klassifikation nach Hess und Brezowsky ein „catch-all type“ sei. *BM* könne demnach auch Situationen umfassen, bei dem die Hochdruckbrücke ungewöhnlich weit im Norden, d. h. über Norddeutschland, liegt. Der süddeutschen Raum unterliegt dagegen dem Einfluss einer quasi-stationären Front, auf deren Südseite bei schwach östlicher Strömung warme und feuchte Luftmassen vorherrschen. Solche Wetterlagen werden in der numerischen Klassifikation oft als *HNZ* (Hoch Nordmeer zyklonal) erfasst und weisen dann eine hohe Gewitterhäufigkeit im Süden auf.

Bissolli, Grieser et al. (2007) verwendeten die objektive Wetterlagenklassifikation des DWDs, um 275 Tornados in Deutschland aus den Jahren 1950-2003 nach Wetterlage einzuordnen. In diesem Datensatz trat der Großteil der Tornados bei Wetterlagen mit südwestlicher Anströmrichtung und feuchten Bedingungen auf. Jüngste Ergebnisse von Wapler, Beyer und James (2025) identifizieren mit der Klassifikation von Hess und Brezowsky die Großwetterlagen *WZ* und *SWZ* als Wetterlagen mit den meisten Tornadobeobachtungen in Deutschland (1940-2024).

2.3 Forschungsfrage

In den vorigen Unterkapiteln ist klar geworden, dass sich die vorliegende Forschung zu Starkwindereignissen inkl. deren Zusammenhang mit Wetterlagen überwiegend auf einzelne Phänomene wie z. B. Winterstürme oder Sommergewitter beschränkt. Für eine ganzheitliche Gefährdungsbeurteilung sind aber alle Windereignisse unabhängig von ihrem meteorologischen Hintergrund relevant. Deshalb werden in dieser Arbeit alle Tage mit starken Böen (kurz: Starkwindtage) eines gewählten Zeitraums betrachtet und insbesondere die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr untersucht. Dabei sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie sind Starkwindtage in Hessen im Jahresverlauf verteilt?
- Bei welchen Wetterlagen sind Starkwindtage besonders häufig?
- Gibt es dabei räumliche Unterschiede und Unterschiede zwischen Sommer und Winter?

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden am Ende dieser Arbeit unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden meteorologischen Prozesse synoptisch eingeordnet und soweit möglich in Hinblick auf ihr Gefährdungspotential beurteilt. Idealerweise können anschließend gezielt Schwerpunkte für künftige Forschungsprojekte zur Gefährdung der Bevölkerung und Infrastruktur durch Starkwindereignisse in Gegenwart und Zukunft gesetzt werden.

3 Daten und Methoden

Nach Vorstellung der Datengrundlage für die Windmessungen sowie die Großwetterlagenklassifikation werden in diesem Kapitel die Auswahlkriterien für Messstationen konkretisiert und die Berechnung der Perzentile erläutert. Für den Zusammenhang von Starkwind und Großwetterlagen wird anschließend der verwendete Chi-Quadrat-Test und die Berechnung der verwendeten Häufigkeitsanomalien vorgestellt.

Für die gesamte Datenauswertung wurde die Programmiersprache python inklusive der gängigen Bibliotheken zur multidimensionalen Datenverarbeitung verwendet. Das Large Language Model ChatGPT wurde unterstützend hinzugezogen, um Code-Abschnitte zu generieren und zu überarbeiten (siehe Hilfsmittel). Alle so erhaltenen Code-Abschnitte wurden vor der Verwendung sorgfältig auf sachliche Richtigkeit und eine korrekte Funktionsweise geprüft.

3.1 Datengrundlage

Für die Windmessungen werden Daten von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Diese sind über das Climate Data Center des DWDs öffentlich zugänglich. Es werden Messdaten in täglicher Auflösung – und nicht höherer zeitlicher Auflösung – verwendet, da auch Wetterlagenklassifikationen „nur“ täglich erstellt werden. Aus dem entsprechenden Verzeichnis im Climate Data Center (Deutscher Wetterdienst 2024) wird das Verzeichnis `\historical` verwendet, dessen Daten abschließend qualitätsgeprüft sind und bis zum Jahresende 2024 vorliegen. Das Ende des Untersuchungszeitraum dieser Arbeit ist somit der 31.12.2024. Die Daten enthalten neben den Messdaten auch zugehörige Metadaten wie die Standorte der Stationen, verwendete Messgeräte und Informationen zu Fehldaten. In den täglichen Klimadaten des deutschen Wetterdienstes stehen als Messgrößen die mittlere Windgeschwindigkeit sowie die tägliche Böenspitze zur Verfügung. Für diese Untersuchung wurde die **tägliche Böenspitze** gewählt, weil diese als relevanter für Schäden durch hohe Windgeschwindigkeiten eingeschätzt wird.

Zur Auswahl der verwendeten Stationen wurde die dort ebenfalls zur Verfügung gestellte Übersicht über die Zeitreihen genutzt, welche alle aktuell aktiven Stationen mit einer Zeitreihe der täglichen Windspitze von mindestens 30 Jahren umfasst. Anhand dieser Liste wurde die Stationsauswahl begonnen, welche in Abschnitt 3.2 erläutert wird. Aus dieser Liste von Stationen ergibt sich – neben der häufigen Verwendung von 30 Jahren als klimatologischem Referenzzeitraum – die Länge des Untersuchungszeitraumes von 30 Jahren. Die Verwendung einer etwas kürzere Zeitspanne von beispielsweise 25 Jahren hätte zwar unter Umständen die Anzahl der Stationen erhöht, wäre aber nur unter unverhältnismäßigem Aufwand möglich gewesen. Denn ohne eine solche Liste hätten die Daten aller in Frage kommenden Stationen heruntergeladen und auf Datenverfügbarkeit der täglichen Windspitze geprüft werden müssen. Der **Untersuchungszeitraum** dieser Arbeit umfasst also den 30-jährigen Zeitraum vom 01.01.1995 bis zum 31.12.2024.

Die Klassifikation der Großwetterlage nach Hess und Brezowsky von 1881 bis 2009 ist in Werner und Gerstengarbe (2010) aufgeführt. Auf der Webseite des DWDs (Deutscher Wetterdienst 2025d) können zudem monatliche und teilweise auch jährliche Übersichten ab 2003 heruntergeladen werden. Der in dieser Arbeit verwendete Datensatz wurde nach persönlichem Kontakt mit dem Kundenservice des DWD zur Verfügung gestellt und enthält die Großwetterlagenklassifikation von Januar 1881 bis August 2025 in leicht zur verarbeitender, tabellarischer Form. In den folgenden Abschnitten dieser Arbeit meint (sofern nicht anders angegeben) die „Großwetterlage (GWL)“ die Großwetterlage nach Hess und Brezowsky.

3.2 Auswahl der Messstationen

Die für die Untersuchungen verwendeten Wetterstationen wurden sorgfältig ausgewählt, um einerseits eine möglichst homogene Zeitreihe an Messdaten der täglichen Böenspitze zu erhalten, d. h. die Beeinflussung durch nicht-meteorologische Faktoren möglichst gering zu halten. Andererseits soll die Anzahl der Stationen möglichst groß sein, um das Untersuchungsgebiet möglichst gut abzudecken.

Anhand der Übersicht über die 30-jährigen Zeitreihen der täglichen Böenspitze wurden alle Stationen ausfindig gemacht, die eine mindestens 30-jährige Zeitreihe bis zum Ende des Untersuchungszeitraums am 31.12.2024 aufweisen. In Hessen erfüllen lediglich 11 Stationen diese Kriterium. Deshalb wurden weitere Stationen mit einer Entfernung von maximal 50 km zur der hessischen Grenze hinzugenommen. Damit erhöhte sich die Anzahl der Stationen auf 28.

Anschließend wurde anhand der Metadaten der einzelnen Stationen geprüft, welchen Anteil an Fehldaten sie haben, wobei ein maximaler Anteil von 10 % akzeptiert wurde. Nach dieser Filterung verblieben 19 Stationen in der Auswahl.

Von diesen 19 Stationen wurden die Zeitreihen der täglichen Böenspitze über den gesamten Untersuchungszeitraum graphisch dargestellt und auf Auffälligkeiten untersucht (hier nicht näher gezeigt). Mit diesem Vorgehen soll sicher gestellt werden, dass keine größeren systematischen Einflüsse von Messgerätewechseln und Verlegungen der Stationen die Auswertung beeinflussen. Insbesondere die Zeitpunkte der Gerätewechsel von Rotationsanemometern zu Ultraschallanemometern wurde betrachtet, da die größere Trägheit von Rotationsanemometern zu niedrigeren Messwerten der Böenspitze führen könnte. Obwohl bei allen Stationen im Untersuchungszeitraum ein Wechseln von Rotations- zu Ultraschallanemometern statt fand, konnte keine Auffälligkeiten in den Datenreihen ausgemacht werden. Deshalb wurde auf eine weitere Filterung der Stationen verzichtet. Bei einer Station (Bad Kissingen) konnte allerdings eine deutliche Erhöhung der Messwerte mit Beginn des Jahrs 2005 festgestellt werden (hier nicht näher

gezeigt). Diese kann mit einer Verlegung der Station zum 21. Dezember 2004 von einer Höhe von 262,0 m auf 281,8 m in Verbindung gebracht werden. Die Station Bad Kissingen wurde deshalb nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Die finale Stationsauswahl umfasst also **18 Wetterstationen**, von denen 7 in Hessen liegen. Abbildung 2 fasst die verschiedenen Schritte der Stationsauswahl in Form einer Karte zusammen. Weitere Informationen zu den ausgewählten Stationen finden sich in Tabelle 2.

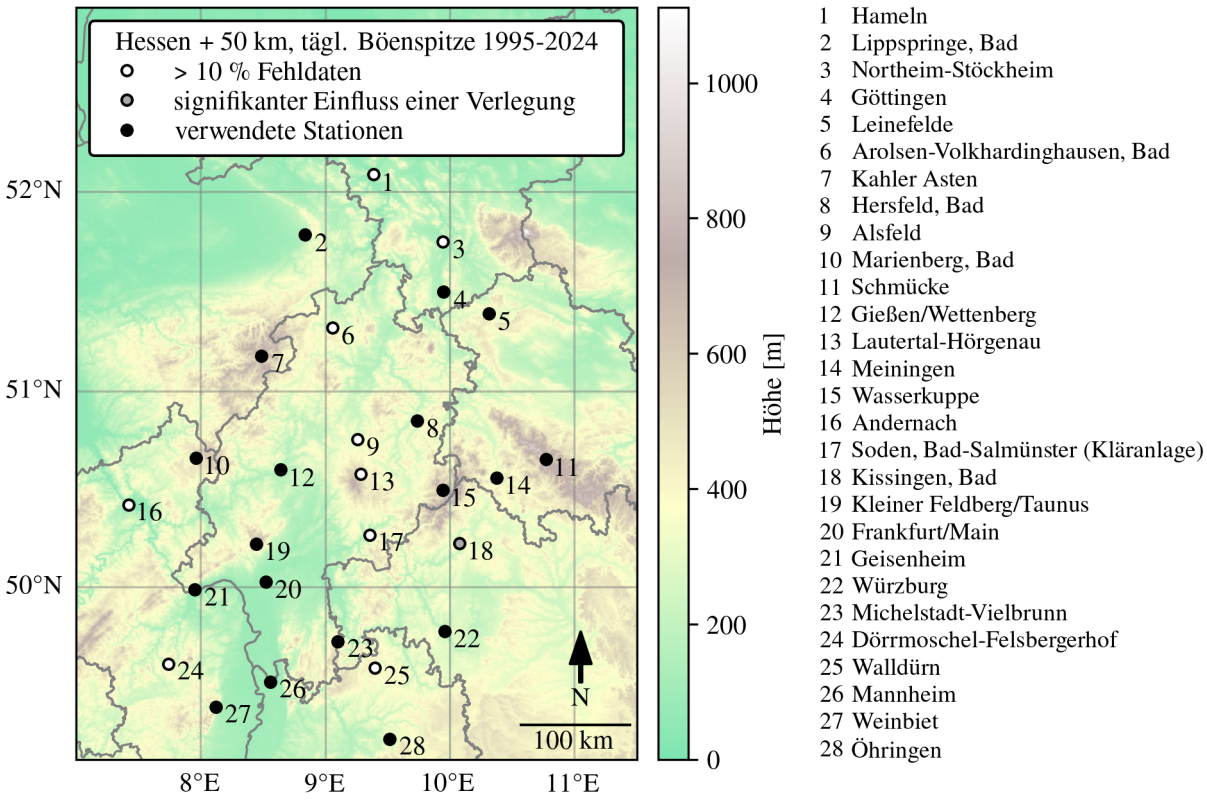


Abbildung 2: Karte aller Stationen, die in Hessen oder in einer maximalen Entfernung von 50 km zur hessischen Grenze liegen und eine mindestens 30-jährige Zeitreihe bis 31.12.2024 aufweisen. Weiß: Nicht verwendete Stationen mit mehr als 10% Fehldaten; Grau: Station, die aufgrund einer die Messwerte beeinflussenden Stationsverlegung nicht verwendet wird; Schwarz: Stationen, deren Daten verwendet werden. Hintergrund: Topographie (Quelle: Copernicus WorldDEM-30).

Um zu beurteilen, welchen Einfluss die Wahl des Untersuchungszeitraums auf den Zusammenhang von Starkwindtagen und Großwetterlagen hat und welche Unsicherheiten insbesondere die Ergebnisse für seltenere Großwetterlagen aufweisen, wurde zusätzlich eine möglichst lange Zeitreihe einer einzelnen Station analysiert. Hierzu kamen von den 18 betrachteten Stationen die beiden Stationen Gießen/Wettenberg und Geisenheim in Betracht, weil sie mit Beginn am

01.01.1951 die längsten Zeitreihen der täglichen Böenspitze aufweisen. Auch in diesem, längeren Zeitraum (01.01.1951 - 31.12.2024, nachfolgend **Vergleichszeitraum** genannt) beträgt der Anteil an Fehldaten für beide Stationen nicht mehr als 10 %. Die beiden Zeitreihen weisen deutlich sichtbare Inhomogenitäten auf, die auf Stationsverlegungen und Messgerätewechsel zurückzuführen sind. Für den Vergleich der Ergebnisse der beiden Zeiträume wurde die Station Gießen/Wettenberg gewählt, weil hier die Inhomogenitäten kleiner ausfallen als bei der Station Geisenheim. Dennoch muss beachtet werden, dass die verwendete Zeitreihe inhomogen ist und diese Ergebnisse lediglich als erste Anhaltspunkte verstanden werden können.

Tabelle 2: Liste der 18 ausgewählten Messstationen mit Stationsname, Stations-ID, Höhe über dem Meeresspiegel und Bundesland, wobei die Stations-ID vom DWD zur eindeutigen Identifikation einer Wetterstation vergeben wird und die Höhe am 31.12.2024 angegeben ist.

Stationsname	**Stations-ID**	**Höhe [m]**	**Bundesland**
Frankfurt/Main	1420	100	Hessen
Geisenheim	1580	111	Hessen
Gießen/Wettenberg	1639	203	Hessen
Göttingen	1691	167	Niedersachsen
Hersfeld, Bad	2171	272	Hessen
Kahler Asten	2483	839	Nordrhein-Westfalen
Kleiner Feldberg/Taunus	2601	822	Hessen
Leinefelde	2925	356	Thüringen
Lippspringe, Bad	3028	157	Nordrhein-Westfalen
Mannheim	5906	98	Baden-Württemberg
Marienberg, Bad	3167	547	Rheinland-Pfalz
Meiningen	3231	450	Thüringen
Michelstadt-Vielbrunn	3287	453	Hessen
Öhringen	3761	276	Baden-Württemberg
Schmücke	4501	938	Thüringen
Wasserkuppe	5371	920	Hessen
Weinbiet	5426	553	Rheinland-Pfalz
Würzburg	5705	268	Bayern

3.3 Berechnung der Perzentile

Das p %-Perzentil ist definiert als derjenige Wert der täglichen Böenspitze, unter dem p % der Messdaten liegen. Ist dieser Wert nicht in den Messdaten enthalten, wird zwischen den beiden nächsten Messwerten linear interpoliert. Als **Starkwindtage** werden dann alle Tage definiert, deren tägliche Böenspitze größer oder gleich dem Perzentil der jeweiligen Station ist.

Je höher das Perzentil, d. h. je höher p, desto höher die berücksichtigten Böenspitzen und desto größer die zu erwartenden Schäden. Da aber bei höheren Perzentilen per Definition weniger Tage Starkwind aufweisen, bringt ein höheres Perzentil auch eine geringere statistische Aussagekraft der Untersuchung mit sich. Deshalb muss bei der Wahl der Perzentil-Höhe abgewogen werden zwischen einer möglichst großer Datenbasis (niedriges Perzentil) und einer Konzentration auf die Tage mit den größten Schäden (hohes Perzentil). Hierbei wird in dieser Arbeit das 98,0 %-Perzentil als untere Grenze verwendet, weil ab hier mit versicherungsrelevanten Schäden zu rechnen ist (Klawa und Ulbrich 2003). Zudem wird auch das 99,0 %-Perzentil und das 99,5 %-Perzentil untersucht.

Die Perzentile werden in dieser Arbeit zudem für zwei verschiedene Berechnungsfrequenzen bestimmt: über den gesamten Untersuchungszeitraum (**„Langzeit-Perzentile“**) und jährlich (**„Jahres-Perzentile“**). Bei den Langzeit-Perzentilen sind beispielsweise für das 99%-Perzentil einer Station die höchsten 1% der Messwerte im gesamten Untersuchungszeitraum enthalten. Dabei können einzelne „windige“ Jahre öfter vertreten sein als Jahre mit weniger Tagen mit hohen Böenspitzen. Bei den Jahres-Perzentilen werden die höchsten 1% der Messwerte eines jeden Jahres einbezogen. Hier kann es sein, dass der höchste Wert eines Jahres niedriger ist als alle enthaltenen Messwerte eines anderen Jahres, und bei der Berechnung über den ganzen Zeitraum nicht in den obersten 1% der Daten enthalten wäre.

Bei der Filterung der Daten nach Perzentilen gilt im Allgemeinen: Je größer die Datenbasis, desto mehr extrem hohe Werte sind enthalten. Denn extrem hohe Werte sind so selten, dass es unwahrscheinlich ist, dass sie in kleineren Datensätzen enthalten sind. In dieser Arbeit ist die Datenbasis für großskalige Ereignisse aus mehreren Gründen größer als die Datenbasis für kleinskalige Ereignisse. Erstens führt die geringe Stationsdichte dazu, dass nur ein Teil der kleinskaligen Ereignisse überhaupt in den Beobachtungsdaten erfasst sind. Zweitens führt die hohe räumliche Ausdehnung von großflächigen Ereignissen wie Tiefdruckgebieten dazu, dass solch ein Ereignis öfter von mehreren Stationen registriert wird. Kleinräumigen Ereignissen wie z. B. Gewitter betreffen dagegen oft nur eine Station. Drittens kann ein großskaliges Ereignis an mehreren Tagen in Folge Starkwind verursachen, bei kleinskaligen Prozessen ist das deutlich seltener. Die schlechtere Repräsentanz von kleinskaligen Ereignissen in den Starkwinddaten hat zur Folge, dass sommerliche Starkwindereignisse schlechter in den Starkwinddaten repräsentiert sind als winterliche Starkwindereignisse.

Es ist zu erwarten, dass die Wahl der Perzentil-Höhe (98,0 %, 99,0 % oder 99,5 %) und der Berechnungsfrequenz (Langzeit-Perzentile oder Jahres-Perzentile) die Ausprägung dieser systematischen Unterrepräsentanz sommerlicher Starkwindereignisse beeinflusst. Bei Verwendung eines hohen Perzentils werden etwa nur die sehr extremen und damit sehr seltenen Ereignisse

berücksichtigt, die im Sommer aus den genannten Gründen seltener in den Daten vorhanden sind als im Winter. Während bei der Verwendung von Langzeit-Perzentilen die Messwerte mit den extremsten Böenspitzen des gesamten Untersuchungszeitraums verglichen werden, wird bei Jahres-Perzentilen nur mit den extremsten Werten des gleichen Jahrs verglichen, unter denen aufgrund der kleineren Anzahl an Tagen tendentiell auch nicht ganz so extreme Werte enthalten sind. Deshalb werden in dieser Arbeit zunächst die verschiedenen Perzentil-Varianten verglichen, wobei besonders die Unterschiede in der jahreszeitliche Verteilung der Starkwindtage in den Blick genommen werden (siehe Abschnitt 4.2.1).

3.4 Starkwindtage und Starkwindereignisse

Nach Filterung der Stationsdaten nach Werten, die gleich oder größer dem Perzentil sind, liegen Starkwindtage für jede Messstation vor. Zu beachten ist, dass im Rahmen dieser Arbeit „Starkwindtage“ als Kurzbezeichnung für „Tage mit starken Böen“ verwendet wird. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika von Stürmen (großräumig, lang) und Gewittern (kleinräumig, kurz) werden in dieser Arbeit je nach Ziel der Analyse verschiedene Betrachtungsweisen verwendet.

Für einige der ausgeführten Untersuchungen ist es von Vorteil, Starkwindereignisse anstatt von Starkwindtagen zu betrachten. Als Starkwindereignis sind hier direkt aufeinander folgende Starkwindtage zusammengefasst. Solche zusammenhängenden Starkwindtage sind insbesondere bei mehrtägigen Stürmen im Winter zu erwarten, seltener bei kurzen konvektiven Ereignissen im Sommer. Die Betrachtung von Ereignissen statt Tagen verhindert also, dass winterliche Starkwindereignisse im Vergleich zu den sommerlichen Starkwindereignissen aufgrund ihrer durchschnittlich längeren Dauer überrepräsentiert sind. Da die Großwetterlagenklassifikation in täglicher Auflösung vorliegt, werden die Zusammenhänge von Starkwind und Wetterlage anhand von Starkwindtagen durchgeführt. Für ein besseres Verständnis der Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr werden aber zusätzlich Starkwindereignisse betrachtet.

Für manche Auswertungen ist es zudem sinnvoll, Starkwindtage oder -ereignisse stationsübergreifend zu untersuchen. Ein stationsübergreifender Starkwindtag ist ein Tag, an dem an mindestens einer Station ein Starkwindtag vorliegt. Ein stationsübergreifendes Starkwindereignis besteht aus mehreren zusammenhängenden stationsübergreifenden Starkwindtagen. Diese Betrachtung verhindert (im Gegensatz zu einer Mittelung über die Stationen), dass Tage/Ereignisse überrepräsentiert sind, die mehrere Stationen betreffen. Beim Zusammenhang von Großwetterlagen mit Starkwind sind sowohl stationsbezogene (An welchen Stationen ist eine Großwetterlage besonders starkwindanfällig?) als auch stationsübergreifende (Bei welcher GWL sind besonders viele Stationen betroffen?) Betrachtungen interessant, weshalb beide Betrachtungsweisen in dieser Arbeit verwendet werden.

In dieser Arbeit wird Starkwind also sowohl auf Basis von Starkwindtagen und -ereignissen, als auch stationsbezogen und stationsübergreifend betrachet. Für eine klare Unterscheidung der Datengrundlagen werden im Folgenden diese Bezeichnungen verwendet:

- **stationsbezogener Starkwindtag:** Tag, an dem die tägliche Böenspitze größer oder gleich dem Perzentil der jeweiligen Station ist
- **stationsbezogenes Starkwindereignis:** direkt aufeinander folgende stationsbezogene Starkwindtage
- **stationsübergreifender Starkwindtag:** Tag, an dem an mindestens einer Station ein stationsbezogener Starkwindtag vorliegt
- **stationsübergreifendes Starkwindereignis:** direkt aufeinander folgende stationsübergreifende Starkwindtage

3.5 Chi-Quadrat-Test

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung, bei welchen Großwetterlagen Starkwind häufiger auftritt als im klimatologischen Mittel. Um die Signifikanz solcher Aussagen statistisch zu testen, wurde für jede Großwetterlage ein Chi-Quadrat Anpassungstest durchgeführt (Signifikanzniveau: 0,05). Für jede Großwetterlage wird dabei getestet, ob die erwartete Starkwindhäufigkeit signifikant von der beobachteten Starkwindhäufigkeit abweicht. Als Nullhypothese wird angenommen, dass die erwartete Starkwindhäufigkeit bei der getesteten Großwetterlage nur von der Auftrittshäufigkeit dieser Großwetterlage abhängt, nicht von der Großwetterlage selbst. Die Nullhypothese wird verworfen, wenn die Wahrscheinlichkeit für ein zufälliges Auftreten (p-Wert) der beobachteten Häufigkeiten unter 5 % liegt. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Großwetterlage die Häufigkeit von Starkwind signifikant beeinflusst, ohne das die Richtung diese Einflusses näher quantifiziert wird. Zugrunde gelegt sind die Häufigkeiten von Wetterlagen und Starkwindtagen über den gesamten Untersuchungszeitraum. Die Unterteilung der Großwetterlagen erfolgt jeweils in die getestete Großwetterlage und alle anderen Großwetterlagen.

Dieser Test wurde für jede Großwetterlage sowohl für das Sommer- und Winterhalbjahr als auch für das gesamte Jahr durchgeführt. Da der Chi-Quadrat Test nur für erwartete Häufigkeiten von über 5 Tagen zuverlässige Aussagen liefert, konnte er nicht für alle Wetterlagen bzw. Zeiträume durchgeführt werden. Es muss beachtet werden, dass die monatlich variierende Verteilung von Starkwindtagen und Großwetterlagen hierbei aufgrund der zu kleinen Häufigkeiten nicht betrachtet wurden. Die erhaltenen statistischen Aussagen geben somit nur einen ersten Anhaltspunkt für die Signifikanz der Häufigkeitsunterschiede.

3.6 Anomalien der Starkwindhäufigkeiten

Um die Richtung des Einflusses (positiv/negativ) einer Großwetterlage auf die Starkwindhäufigkeit zu bestimmen, wird für jede Wetterlage eine **Häufigkeitsanomalie *a*** berechnet. Sie gibt an, wie das Vorliegen einer bestimmten Großwetterlage die Häufigkeit von Starkwindtagen beeinflusst. Dazu wird die Starkwindhäufigkeit bei einer gegebenen Großwetterlage mit der klimatologischen Starkwindhäufigkeit aller Großwetterlagen verglichen. Die variierende Häufigkeit N einer Großwetterlage im Jahresverlauf und die variierende Anzahl von Starkwindtagen SW im Jahresverlauf könnte allerdings zu Ungenauigkeiten der Anomalien führen, wenn dafür das gesamten Sommerhalbjahr/Winterhalbjahr/Jahr betrachtet wird. Dazu stelle man sich eine Situation vor, in der die Starkwindtage bei einer GWL überwiegend in Monaten mit klimatologisch niedriger Starkwindhäufigkeit auftreten oder die Starkwindtage bei dieser Großwetterlage überwiegend in Monaten auftreten, in denen diese Großwetterlage nicht häufig ist. Intuitiv ist klar, dass diese Großwetterlage wahrscheinlich eine erhöhte Starkwindanomalie aufweist. Allerdings ist es bei Betrachtung eines längeren Zeitraums möglich, dass sich solche Effekte über die verschiedenen Monate kompensieren. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit analog zu Wapler und James (2015) die Abweichung von der Klimatologie Monat für Monat bestimmt und erst dann für den gesamten Zeitraum zusammengefasst:

$$a = \frac{1}{N_{\text{Jan-Dez}}} \cdot \left[N_{\text{Jan}} \cdot \left(\frac{SW_{\text{Jan}}}{N_{\text{Jan}}} - \frac{KSW_{\text{Jan}}}{31} \right) + \ldots + N_{\text{Dez}} \cdot \left(\frac{SW_{\text{Dez}}}{N_{\text{Dez}}} - \frac{KSW_{\text{Dez}}}{31} \right) \right] \tag{1}$$

Hierbei ist

- a: Anomalie der Starkwindhäufigkeit der jeweiligen Wetterlage
- $N_{\text{Jan-Dez}}$: Anzahl der Tage mit der jeweiligen Wetterlage im ganzen Jahr
- N_{Jan}, N_{Dez}: Anzahl der Tage mit der jeweiligen Wetterlage im Januar bzw. Dezember
- SW_{Jan}, SW_{Dez}: Anzahl der Starkwindtage mit der jeweiligen Wetterlage im Januar bzw. Dezember
- KSW_{Jan}, KSW_{Dez}: durchschnittliche Anzahl der Starkwindtage im Januar bzw. Dezember bei allen Wetterlagen
- 31: Länge der Monate Januar und Dezember, welche für die restlichen Monate entsprechend angepasst wird.

Alle Größen sind über den gesamten Untersuchungszeitraum zu ermitteln. In Gleichung 1 ist die Berechnung der Häufigkeitsanomalien für das ganzes Jahr gezeigt, für das Sommer- und Winterhalbjahr werden jeweils nur sechs Monate verwendet.

Die Berechnung wird für die stationsübergreifenden und stationsbezogenen Starkwindtage analog durchgeführt. Allerdings sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar, weil sich die Bezugsgröße (klimatologische Starkwindhäufigkeit) unterscheidet. Dieser Sachverhalt soll hier kurz illustriert werden. Eine Häufigkeitsanomalie von 0,02 bzw. 2 % bedeutet in beiden Fällen, dass die Starkwindanfälligkeit dieser Großwetterlage im Vergleich zur Klimatologie um 2 % erhöht ist. Bei einer stationsbezogenen Berechnung wird für jede Station und jede Großwetterlage eine Anomalie berechnet. Mit den Werten des 98%- Perzentils ist die klimatologische Starkwindhäufigkeit im ganzen Jahr ca. 2 %, d. h. an 2 % der Tage liegt ein stationsbezogener Starkwindtag vor. Damit bedeutet eine Anomalie von 0,02 bzw. 2 %, dass bei dieser Großwetterlage ca. 4 % der Tage Starkwindtage an der untersuchten Station sind. Somit ist Starkwind bei dieser GWL und dieser Station doppelt so häufig wie an einem beliebigen Tag. Bei Berechnung der Anomalien mit stationübergreifenden Starkwindtagen ist die klimatologische Starkwindhäufigkeit im ganzen Jahr ca. 10 %, d. h. an 10 % der Tagen weist mindestens eine der Stationen Starkwind auf. Hier bedeutet eine Anomalie von 0,02 bzw. 2 %, dass 12 % der Tage dieser Großwetterlage Starkwind an mindestens einer Station aufweisen. Diese Großwetterlage erhöht die stationsübergreifende Starkwindhäufigkeit also um ca. ein Fünftel.

4 Ergebnisse

4.1 Perzentile

Abbildung 3 stellt die erhaltenen Werte für das 98,0%-, 99,0% und 99,5%-Langzeit-Perzentil der täglichen Böenspitze aller Stationen als Karte dar. Die Werte steigen mit größer werdendem Perzentil, wie es per Definition der Perzentile zu erwarten ist. Das räumliche Muster der Werte unterscheidet sich kaum zwischen den verschiedenen Perzentilen. Die vier Stationen mit den höchsten Werten für alle drei Perzentile sind die Bergstationen Weinbiet (Rheinland-Pfalz), Wasserkuppe (Hessen), Kahler Asten (Nordrhein-Westfalen) und Schmücke (Thüringen). Die Werte dieser vier Bergstationen liegen überwiegend im Bereich von schweren Sturmböen bis zu orkanartigen Böen. Der Weinbiet ist mit 30,4 m/s (98,0%-Perzentil), 32,9 m/s (99,0%-Perzentil) und 35,4 m/s (99,5%-Perzentil) die Station mit den höchsten Werten für alle drei Perzentile. Er liegt mit dem 99,5%-Perzentil als einzige Station im Bereich von Orkanböen. Mannheim ist mit 18,0 m/s, 19,7 m/s und 21,3 m/s die Station mit den niedrigsten Werten.

Dass die höchsten Perzentile an Bergstationen erreicht werden, ist für die Windklimatologie nicht weiter überraschend. Bemerkenswert ist allerdings, dass der Kleine Feldberg/Taunus nicht in dieser Liste auftaucht, sondern im Vergleich mit den anderen Bergstationen mit 20,1 m/s, 22,1 m/s und 23,9 m/s deutlich niedrigere Werte aufweist, welche lediglich Sturmböen entsprechen. Erklärbar ist dieser Befund möglicherweise durch die Lage des Kleinen Feldbergs auf dem Hauptkamm des Taunus', welcher sich von Südwest nach Nordost erstreckt. Bei relativ häufig

vorherrschender südwestlichen Anströmungsrichtungen kommt es am Taunushauptkamm eher zu einer Kanalisierung und Umströmung als zu einer Überströmung des Höhenzuges, sodass die Windgeschwindigkeiten auf dem kleinen Feldberg nicht zusätzlich erhöht werden. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen zum Einfluss der Strömungsverhältnisse auf konvektive Zellen am Taunus (Purr, Brisson und Ahrens 2018).

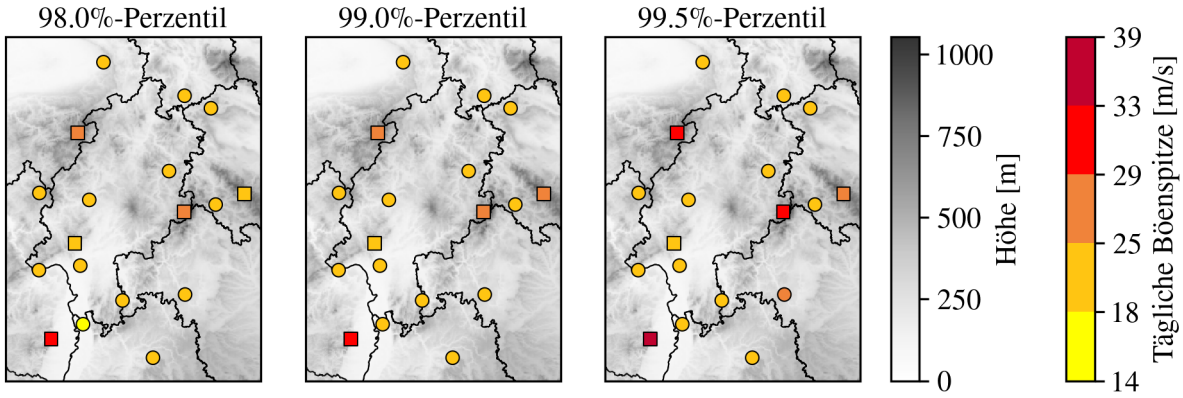


Abbildung 3: Karte der Langzeit-Perzentile für jede Station für das 98,0%-, 99,0%- und 99,5%-Perzentil. Bergstationen sind mit einem Quadrat gekennzeichnet, die restlichen Stationen mit einem Kreis. Die Farbgebung ist angelehnt an die Warnschwellen des Deutschen Wetterdienstes (Deutscher Wetterdienst 2025b). Dieser warnt vor Windböen ab 14 m/s (gelb), vor Sturmböen ab 18 m/s (helles orange), vor schweren Sturmböen ab 25 m/s (dunkles orange), vor orkanartigen Böen ab 29 m/s (helles rot) und vor Orkanböen ab 33 m/s (dunkles rot). Hintergrund: Topographie (Quelle: Copernicus WorldDEM-30).

Die Werte für die Jahres-Perzentile sind in Abbildung 4 im Zeitverlauf dargestellt. Konsistent mit den Langzeit-Perzentilen weisen dieselben Bergstationen Weinbiet, Wasserkuppe, Kahler Asten und Schmücke die höchsten Werte auf und heben sich deutlich von den anderen Werten ab. Bei den restlichen Stationen sind die Schwankungen von Jahr zu Jahr meist größer als die Unterschiede in der Höhe der Werte, sodass diese Stationen nicht nach unterschiedlich starker Windbelastung unterschieden werden können. Die Schwankungen verlaufen von Jahr zu Jahr oft für viele Stationen ähnlich. Das ist plausibel, da großskalige Ereignisse viele Stationen betreffen und deren Starkwindtage dann oft übereinstimmen. Das Jahr 2007 hat beispielsweise für nahezu alle Stationen höhere Perzentile als das vorausgehende und nachfolgende Jahr, was auf das Orkantief Kyrill zurückgeführt werden kann. Auffällig ist der besonders hohe Wert für das 99,5%-Perzentil an der Station Kleiner Feldberg/Taunus im Jahr 2003, der sich deutlich von den Werten der anderen Jahre unterscheidet. Die zwei Starkwindtage des Jahres konnten mit hohen Windgeschwindigkeiten von 47,0 m/s (01.07.2003) und 38,5 m/s (16.07.2003) bei starken Gewittern in Verbindung gebracht werden.

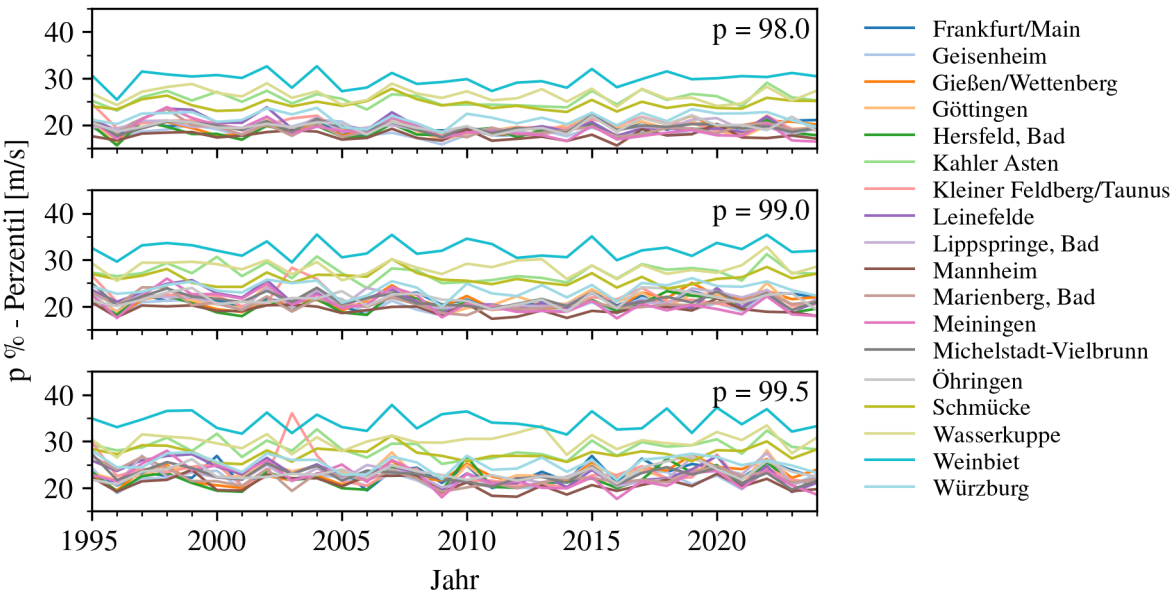


Abbildung 4: Zeitverlauf der 98,0 %-, 99,0 %- und 99,5 %-Jahres-Perzentile für jede Station.

4.2 Starkwindtage und Starkwindereignisse

4.2.1 Jahreszeitliche Verteilung der Daten für verschiedene Perzentil-Varianten

In Abbildung 5 ist die monatliche Verteilung der Starkwindtage des gesamten Untersuchungszeitraums für die verschiedenen Varianten der Perzentile dargestellt. Für die obere Zeile wurden die monatlichen Anteile der Starkwindtage zunächst für jede Station einzeln berechnet und anschießend über alle Stationen gemittelt. Die untere Zeile zeigt den monatlichen Anteil der stationsübergreifenden Starkwindtage. Tabelle 3 auf Seite 23 listet zudem für alle abgebildeten Varianten auf, welcher Anteil aller Starkwindtage im Sommerhalbjahr liegt.

Bei allen Perzentil-Varianten in Abbildung 5 ist eine klare Saisonalität erkennbar: Von Oktober bis März ist der Anteil an Starkwindtagen pro Monat deutlich höher als von April bis September, das Maximum liegt im Januar bzw. Februar. Bei den Analysen in den folgenden Teilen dieser Arbeit wird das Jahr deshalb in ein Sommerhalbjahr (April-September) und Winterhalbjahr (Oktober-März) unterteilt. Dass im Winterhalbjahr mehr Starkwindtage als im Sommerhalbjahr vorhanden sind, heißt aber noch nicht zwangsläufig, dass die Böen sommerlicher Ereignisse per se schwächer sind als die Böen winterlicher Ereignisse. Denn sommerliche Ereignisse werden, wie schon in Abschnitt 3.3 erläutert, seltener von Stationen erfasst, womit auch die Wahrscheinlichkeit für extreme Werte im Datensatz verringert ist.

Die Ausprägung der Saisonalität ist bei der stationsübergreifenden Betrachtung deutlich kleiner als bei der stationsbezogenen Betrachtung. Gleichzeitig ist der Anteil an Starkwindtagen, die ins

Sommerhalbjahr fallen, bei stationsübergreifender Betrachtung größer als bei stationsbezogener Betrachtung. Beispielweise liegt für das 98,0-%-Jahres-Perzentil der Anteil der Starkwindtage im Sommer bei stationsbezogener Betrachtung bei 22,5 %, bei stationsübergreifender Betrachtung bei 37,0 % (vgl. Tabelle 3 auf Seite 23). Bei der stationsübergreifenden Betrachtung ist in der monatlichen Verteilung zudem ein zweites Maximum im Juni/Juli zu erkennen. Diese Unterschiede zwischen stationsbezogener und stationsübergreifender Betrachtung sind plausibel, weil bei der stationsbezogenen Betrachtung winterliche Tage mit Starkwind an vielen Stationen durch die Mittelung über die Stationen mehrfach eingehen. Einzelne Sommergewitter mit Starkwind an nur einer Station, die vermehrt in den konvektiv aktivsten Monaten Juni und Juli auftreten, gehen dagegen nur einfach in die Berechnung ein. Im Gegensatz dazu werden in der stationsübergreifenden Betrachtung Starkwindtage unabhängig von der betroffenen Anzahl an Stationen berücksichtigt, weshalb ein zweites Maximum im Juli sichtbar wird.

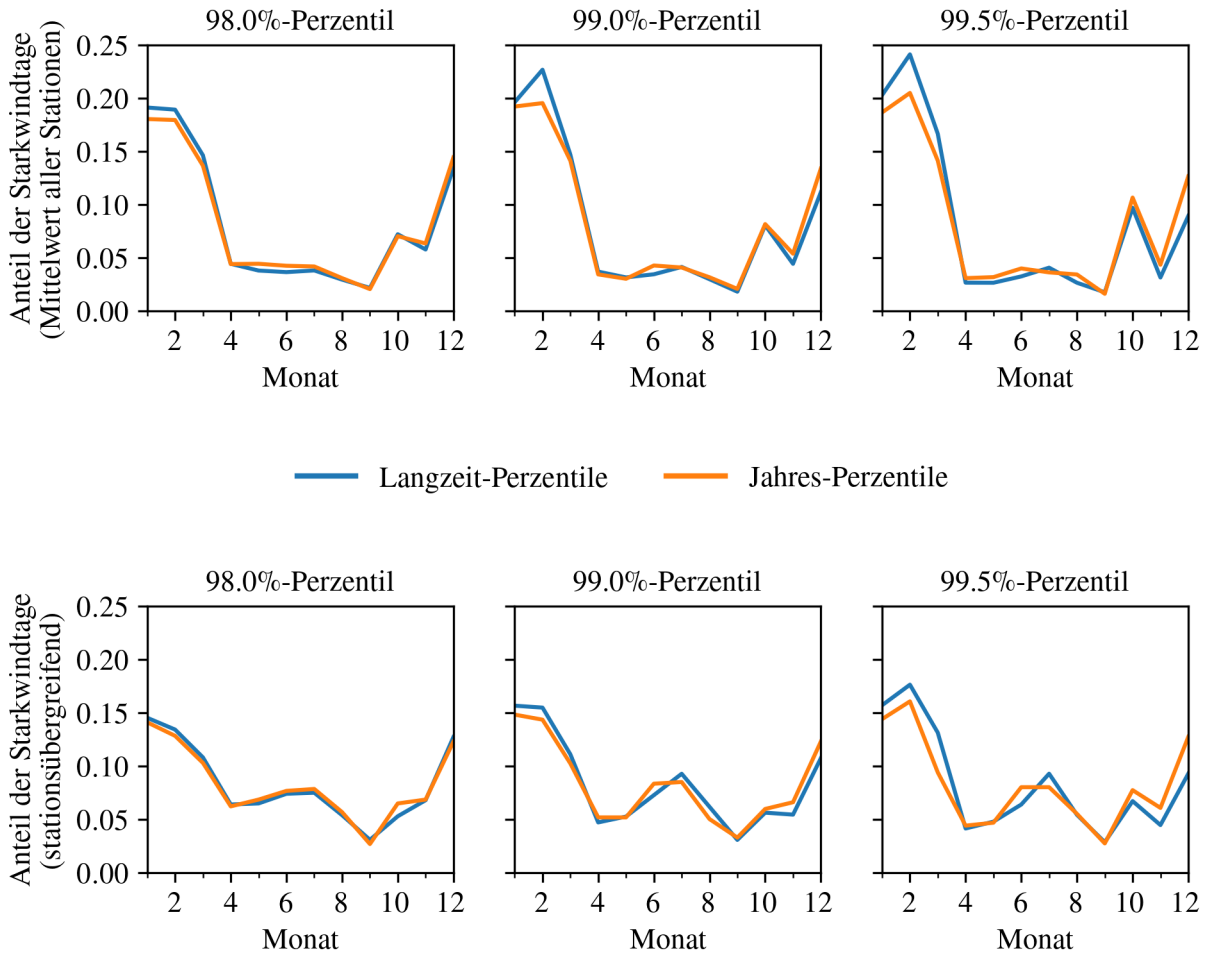


Abbildung 5: Relative Häufigkeitsverteilung der Starkwindtage des gesamten Untersuchungszeitraums auf die Monate. Oben: Gemittelte Verteilung der stationsbezogenen Starkwindtage, unten: stationsübergreifende Starkwindtage. Langzeit-Perzentile: blau, Jahres-Perzentile: orange.

Die Analyse des Zusammenhangs von Großwetterlage und Starkwindtagen wird letztendlich nur für eine der sechs Perzentil-Varianten durchgeführt. Dabei sollen insbesondere die Unterschiede der Starkwindhäufigkeit zwischen Sommer und Winter untersucht werden. Wie schon in Abschnitt 3.3 diskutiert, beeinflussen die Höhe des Perzentils (98,0%, 99,0% oder 99,5%) und die Berechnungsfrequenz (Langzeit-Perzentile oder Jahres-Perzentile) vermutlich, wie stark sommerlicher Ereignisse in den Daten unterrepräsentiert sind. Deshalb wird hier beleuchtet, welchen Einfluss die Perzentil-Variante auf die jahreszeitliche Verteilung der Daten hat.

Die Unterschiede in der monatlichen Verteilung der verschiedenen Perzentil-Varianten sind relativ gering und unterliegen einer gewissen monatlichen Variabilität. Deshalb werden zur Analyse dieser Unterschiede die Sommeranteile der stationsbezogenen Starkwindtage aus Tabelle 3 ausgewertet. Es handelt sich dabei um den Anteil aller Starkwindtage, die im Sommerhalbjahr liegen. Zunächst seien die Unterschiede zwischen den verschiedenen Höhen der Perzentile betrachtet (98,0%, 99,0%, 99,5%). Der Sommeranteil sinkt für beide Berechnungsfrequenzen (Langzeit-Perzentile und Jahres-Perzentile) mit Höhe des Perzentils um 3,5 % bzw. 3,7 % zwischen dem 98,0%-Perzentil und dem 99,5%-Perzentil. Für die stationsbezogenen Starkwindtage der Jahres-Perzentile beträgt der Sommeranteil der Starkwindtage beispielsweise 22,5 % (98,0%-Perzentil), 20,2 % (99,0%-Perzentil) und 19,0 % (99,5%-Perzentil). Je höher das Perzentil, desto weniger Starkwindtage liegen also im Sommerhalbjahr.

Tabelle 3: Prozentualer Anteil aller stationsbezogenen bzw. stationsübergreifenden Starkwindtage, die ins Sommerhalbjahr fallen. Auf das Winterhalbjahr entfallen jeweils die restlichen Daten (in Summe 100 %). Die Werte sind für die verschiedenen Varianten der Perzentil-Berechnung aufgeführt.

	98,0%	**99,0%**	**99,5%**
stationsbezogen, Langzeit-Perzentile	20,9	19,3	17,2
stationsbezogen, Jahres-Perzentile	22,5	20,2	19,0
stationsübergreifend, Langzeit-Perzentile	36,4	35,9	33,0
stationsübergreifend, Jahres-Perzentile	37,0	35,7	33,5

Die Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsfrequenzen (Langzeit-Perzentile und Jahres-Perzentile) sind mit 0,9 % bis 1,8 % im Vergleich dazu kleiner, wobei die Jahres-Perzentile den höheren Sommeranteil aufweisen. Der Sommeranteil der stationsbezogenen Starkwindtage des 98,0%-Perzentils beträgt beispielsweise 20,9 % für die Langzeit-Perzentile und 22,5 % für die Jahres-Perzentile. Für die höheren Sommeranteile der Jahres-Perzentile im Vergleich zu den Langzeit-Perzentile konnten zwei Gründe identifiziert werden. Erstens unterscheidet sich die Anzahl der Tage gleich und oberhalb des Perzentils aufgrund von unterschiedlich dichten Verteilung der Daten je nach Berechnungsfrequenz und Rundungseffekten. So sind bei Verwendung des 98,0%-Langzeit-Perzentils im Durchschnitt etwa 7,4 Tage pro Jahr gleich oder oberhalb des Perzentils verortet, während es bei Verwendung des Jahres-Perzentils 8,1 Tag pro Jahr sind. Diese höhere Anzahl an Tagen im Jahres-Perzentil und damit der höhere Anteil von niedrigeren

Werten spiegelt sich in einem höheren Sommeranteil wider. Dieser indirekte statistische Effekt reicht allerdings noch nicht aus, um den Unterschied in den Sommeranteilen zu erklären. Deshalb kann zweitens davon ausgegangen werden, dass die Verwendung von Jahres-Perzentilen auch direkt zu einem höheren Sommeranteil führt. Das ist plausibel, da in diesem Fall die Sommerereignisse nicht mit den stärksten Winterstürmen überhaupt verglichen werden, sondern nur mit denen im selben Jahr. Diese Effekte sind allerdings mit etwa 1 % nicht sonderlich ausgeprägt.

Es konnte also gezeigt werden, dass die Wahl der Perzentil-Variante den Sommeranteil der Daten in geringem Umfang beeinflusst, die Saisonalität aber für alle Perzentil-Varianten dieselbe ist. Die gewählte Höhe des Perzentils hat dabei einen größeren Einfluss als die gewählte Berechnungsfrequenz, wobei die Unterschiede dort nur zum Teil auf meteorologische Effekte zurück zu führen sind. Um sowohl sommerliche als auch winterliche Ereignisse mit einer ausreichend großen Datenbasis analysieren zu können, werden für die folgenden Analysen die Tage mit einer täglichen Böenspitze gleich oder oberhalb der **98,0%-Jahres-Perzentile** verwendet. Die Verwendung von Jahres-Perzentilen im Vergleich zu Langzeit-Perzentilen hat für die einzelne längere Zeitreihe (1951-2024, Gießen/Wettenberg) mit größeren Inhomogenitäten den Vorteil, dass die Inhomogenitäten einen geringeren Einfluss auf die Auswahl der Starkwindtage haben.

Für Starkwindereignisse zeigen sich überwiegend ähnliche Muster in der monatlichen Verteilung (siehe Anhang 6). Auch hier sinkt der Sommeranteil mit steigender Höhe des Perzentils und auch die Saisonalität ist für die stationsübergreifende Betrachtung weniger stark ausgeprägt. Die Sommeranteile der Starkwindereignisse sind im Vergleich zu den entsprechenden Sommeranteile der Starkwindtage noch größer. Für die Daten gleich oder oberhalb des 98,0%-Jahres-Perzentils ist der Sommeranteil an stationsbezogenen Starkwindereignissen beispielsweise 25,9 % (Starkwindtage 22,5 %) und an stationsübergreifenden Ereignissen 45,0 % (Starkwindtage 37,0 %). Dies ist plausibel, da bei den Starkwindereignissen im Gegensatz zu den Starkwindtagen mehrtägige Stürme, die vermehrt im Winter auftreten, nur einmal gezählt werden und somit zu einem niedrigeren Winteranteil führen. Allerdings muss bei den Zahlen der stationsübergreifenden Ereignisse beachtet werden, dass hier sowohl ein mehrtägiges Starkwindereignisses an vielen Stationen als auch ein einzelner Gewittertag als ein Ereignis zählen kann und sich die Auswirkungen dieser Ereignisse deutlich unterscheiden.

4.2.2 Eigenschaften von Starkwindtagen/-ereignissen im Sommer und Winter

Im vorigen Abschnitt ist klar geworden, dass die Anzahl der betroffenen Stationen pro Starkwindtag und die Länge von Starkwindereignissen die Klimatologie der Starkwindtage und -ereignisse beeinflusst. Da sich das auch auf den Zusammenhang von Starkwindtagen und Großwetterlagen auswirkt, werden im nächsten Abschnitt die Charakteristika des gewählten Datensatzes (tägliche Böenspitzen gleich oder oberhalb des 98,0%-Jahres-Perzentils) detaillierter beschrieben.

Nach Filterung der Messdaten mit den 98,0%-Jahres-Perzentilen verbleiben pro Station im Mittel 243,6 Starkwindtage im gesamten 30-Jahres-Zeitraum, was ca. 8,1 Starkwindtage pro Jahr entspricht. Damit sind im Mittel 2,2 % der Tage an einer Station Starkwindtage. Die Abweichung von 0,2 % zum intuitiv erwarteten Anteil von 2,0 % für das 98,0%-Perzentil ergibt sich aufgrund der Berechnungsweise der Jahres-Perzentile und aufgrund von Rundungseffekten. Von diesen Starkwindtagen entfallen pro Station im Mittel 54,8 Tage auf die Sommerhalbjahre und 188,8 Tage auf die Winterhalbjahre des 30-jährigen Zeitraums, sodass pro Station 1,0 % aller Tage in den Sommerhalbjahren und 3,5 % aller Tage in den Winterhalbjahren Starkwindtage sind. Die stationsbezogenen Starkwindtage könnten zu 1106 stationsübergreifenden Starkwindtagen zusammengefasst werden, die damit einen Anteil von 10,1 % aller Tage im Untersuchungszeitraum ausmachen. Das heißt, dass an etwa jedem zehnten Tag an mindestens einer Station Starkwind vorliegt. Von den stationsübergreifenden Starkwindtagen im gesamten 30-jährigen Zeitraum entfallen 410 auf die Sommerhalbjahre und 696 auf die Winterhalbjahre, sodass im Sommerhalbjahr 7,5 % und im Winter 12,7 % der Tage stationsübergreifende Starkwindtage sind. Hieran wird deutlich, dass sich die Starkwindtage von Station zu Station unterscheiden, da sonst der Anteil der stationsbezogenen und stationsübergreifenden Starkwindtage übereinstimmen würde.

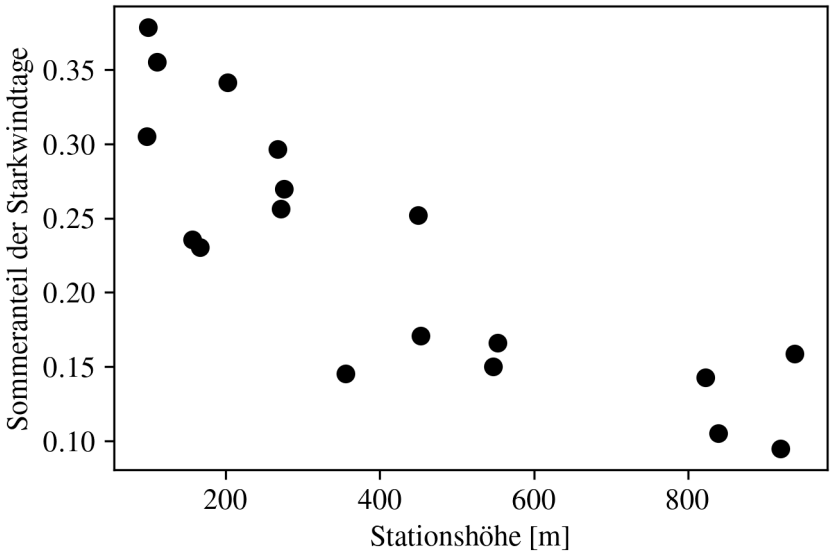


Abbildung 6: Sommeranteil der Starkwindtage für alle Stationen in Abhängigkeit der jeweiligen Stationshöhe. Der Sommeranteil ist der prozentuale Anteil aller Starkwindtage einer Station, der ins Sommerhalbjahr fällt. Auf das Winterhalbjahr entfallen jeweils die restlichen Daten (in Summe 100 %).

Im Mittel über alle Stationen liegen 22,5 % der Starkwindtage im Sommerhalbjahr (vgl. Tabelle 3). Der Anteil der Starkwindtage im Sommerhalbjahr unterscheidet sich aber stark von Station zu Station und weist eine klare Höhenabhängigkeit auf, die in Abbildung 6 dargestellt

ist. Während auf der Wasserkuppe mit 9,5 % der geringste Anteil der Starkwindtage auf das Sommerhalbjahr entfällt, ist der Anteil in Frankfurt mit 37,9 % fast viermal so groß. Auch bei den bevölkerungsreichen und tiefliegenden Großstädten Mannheim und Würzburg entfällt mit über 30 % ein deutlich überdurchschnittlicher Anteil der Starkwindtage auf das Sommerhalbjahr. Diese Beobachtung lässt sich mit dem Forschungsstand in der Windböenklimatologie erklären: Bei Winterstürmen sind die Windgeschwindigkeiten in höheren exponierten Lagen stark von der Orographie beeinflusst (Hofherr und Kunz 2010), bei konvektiven Böen im Sommer kann kein solcher Zusammenhang hergestellt werden (Mohr et al. 2017). Somit ergibt sich ein höherer Winteranteil und ein niedriger Sommeranteil für die Bergstationen.

Abbildung 7 zeigt für Sommer- und Winterhalbjahr, wie viele Stationen pro stationsübergreifendem Starkwindtag betroffen sind. Damit Sommer (410 stationsübergreifende Starkwindtage) und Winter (696 stationsübergreifende Starkwindtage) vergleichbar sind, ist ein relative Häufigkeit dargestellt, also der Anteil der Starkwindtage des jeweiligen Halbjahrs, der die jeweilige Anzahl an betroffenen Stationen aufweist. Sowohl für das Sommerhalbjahr, als auch für das Winterhalbjahr sinkt der Anteil der Starkwindtage mit zunehmender Anzahl betroffener Stationen. Im Sommer sind pro Starkwindtag allerdings deutlich weniger Stationen betroffen als im Winter. Während beispielsweise im Sommer 54 % der Starkwindtage nur eine Station betreffen, sind es im Winter nur 35 %. Starkwindtage mit mehr als fünf betroffenen Stationen machen im Sommer 8 % der Starkwindtage aus, im Winter dagegen 31 %. Die durchschnittliche Anzahl an betroffenen Stationen beträgt im Sommerhalbjahr 2,4, im Winter 4,9. Damit sind im Winter im Durchschnitt etwa doppelt so viele Stationen betroffen wie im Sommer. Dass alle 18 Stationen am selben Tag Starkwind aufweisen, kommt im Untersuchungszeitraum insgesamt 18 mal vor. Diese Starkwindtage liegen alle im Winterhalbjahr und bei den westlichen Großwetterlagen *NWZ* (Nordwestlage, zyklonal), *WZ* (Westlage, zyklonal), *SWZ* (Südwestlage, zyklonal) und *WW* (winkelförmige Westlage) vor. Hierunter fallen auch die besonders schadensträchtigen Stürme Friederike (18.01.2018) und Kyrill (18.01.2007).

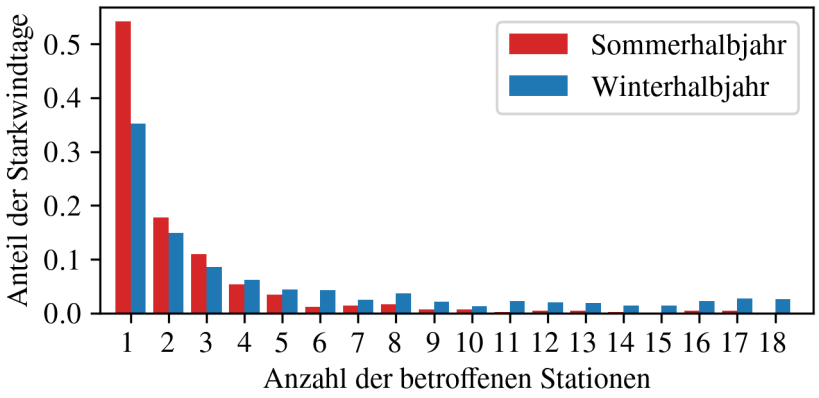


Abbildung 7: Relative Häufigkeitsverteilung der stationsübergreifenden Starkwindtage nach Anzahl der betroffene Stationen, für Sommer- und Winterhalbjahr im Vergleich.

Abbildung 8 stellt die relative Häufigkeit von Starkwindereignissen verschiedener Längen für Sommer- und Winterhalbjahr im Vergleich dar. Links sind die stationsbezogenen Starkwindereignisse dargestellt. Dazu wurde pro Station der Anteil der Starkwindereignisse einer bestimmten Länge ermittelt und anschließend wurde über alle Stationen gemittelt. Im Sommerhalbjahr haben 97 % der durchschnittlich 52 Starkwindereignisse pro Station eine Dauer von nur einem Tag, im Winter sind es immerhin 77 % der durchschnittlich 148 Ereignisse pro Station. Die durchschnittliche Länge eines Ereignisse beträgt 1,04 Tage im Sommer und 1,28 Tage im Winter. Die maximale Länge von 6 Starkwindtagen in Folge wurde an den Stationen Kleiner Feldberg und Wasserkuppe im Januar 2022 erreicht, als die Orkantiefs Ylenia und Zeynep und das Sturmtief Antonia kurz nacheinander über Deutschland zogen.

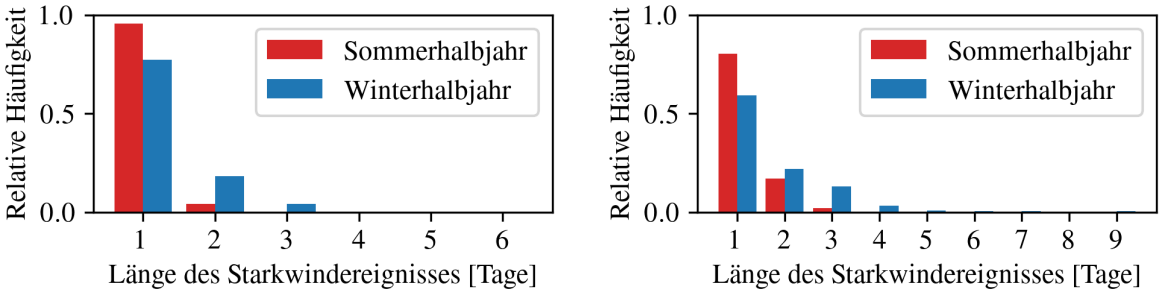


Abbildung 8: Relative Häufigkeitsverteilung der Starkwindereignisse nach ihrer Dauer in Tagen. Links: Mittelwerte der stationsbezogenen Starkwindereignisse, rechts: stationsübergreifende Starkwindereignisse.

Rechts in Abbildung 8 sind die stationsübergreifenden Starkwindereignisse dargestellt, welche im Vergleich zu den stationsbezogenen Starkwindereignissen länger sind. Hier beträgt die durchschnittliche Länge 1,22 Tage im Sommerhalbjahr bzw. 1,70 Tage im Winterhalbjahr. Im Sommerhalbjahr sind 81 % der 334 Starkwindereignisse nur einen Tag lang, im Winterhalbjahr 59 % der 409 Starkwindereignisse. Die maximale Länge von 9 Tagen wurde im Untersuchungszeitraum bei zwei stationsübergreifenden Ereignissen erreicht. Auch hier sind die Ursache mehrere aufeinander folgende Tiefdruckgebiete bei westlichen Wetterlagen. Allerdings weisen einzelne Stationen bei diesen Ereignissen lediglich ein bis drei Tage Starkwind in Folge auf. Also fassen die stationsübergreifenden Ereignisse Stürme mit regional unterschiedlichen Auswirkungen derart zusammen, dass die resultierenden Ereignisse nicht unbedingt einen gemeinsamen meteorologischen Hintergrund haben. Aus diesem Grund werden die stationsübergreifenden Starkwindereignisse für die folgenden Analysen nicht weiter verwendet.

4.3 Zusammenhang von Starkwindtagen und Großwetterlage

4.3.1 Stationsübergreifende Häufigkeitsanomalien

Für alle Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky wurde die Häufigkeitsanomalie für Starkwind bestimmt, welche in Abbildung 9 visualisiert sind. Für Großwetterlagen, die größere positive Häufigkeitsanomalien zeigen, sind die Ergebnisse des Chi-Quadrat-Tests in Tabelle 4 aufgeführt. Ein signifikantes Testergebnis bedeutet, dass sich die beobachtete Starkwindhäufigkeit bei einer Großwetterlage signifikant von der Starkwindhäufigkeit unterscheidet, die ohne Einfluss der Großwetterlage zu erwarten wäre. Allein die Signifikanz ermöglicht allerdings keine Aussage darüber, ob eine Großwetterlage die Starkwindhäufigkeit positiv oder negativ beeinflusst. Hierzu werden die Häufigkeitsanomalien betrachtet, die zusätzlich noch die monatliche Verteilung der Starkwindtage berücksichtigen. Bei der Großwetterlage *SWA* (Südwestlage, antizyklonal) liegt beispielsweise im Sommerhalbjahr eine positive und im Winterhalbjahr eine negative Anomalie vor. Da in beiden Fällen ein signifikanter Unterschied in den Häufigkeiten vorliegt, wird angenommen, dass im Winter ein negativer, im Sommer ein positiver Einfluss auf die Starkwindhäufigkeit vorliegt. Diese kombinierte Interpretation der Testergebnisse und Anomalien wird im Folgenden sprachlich zum Ausdruck gebracht, indem von „signifikant positiven Anomalien“ bzw. „signifikant negativen Anomalien“ die Rede ist.

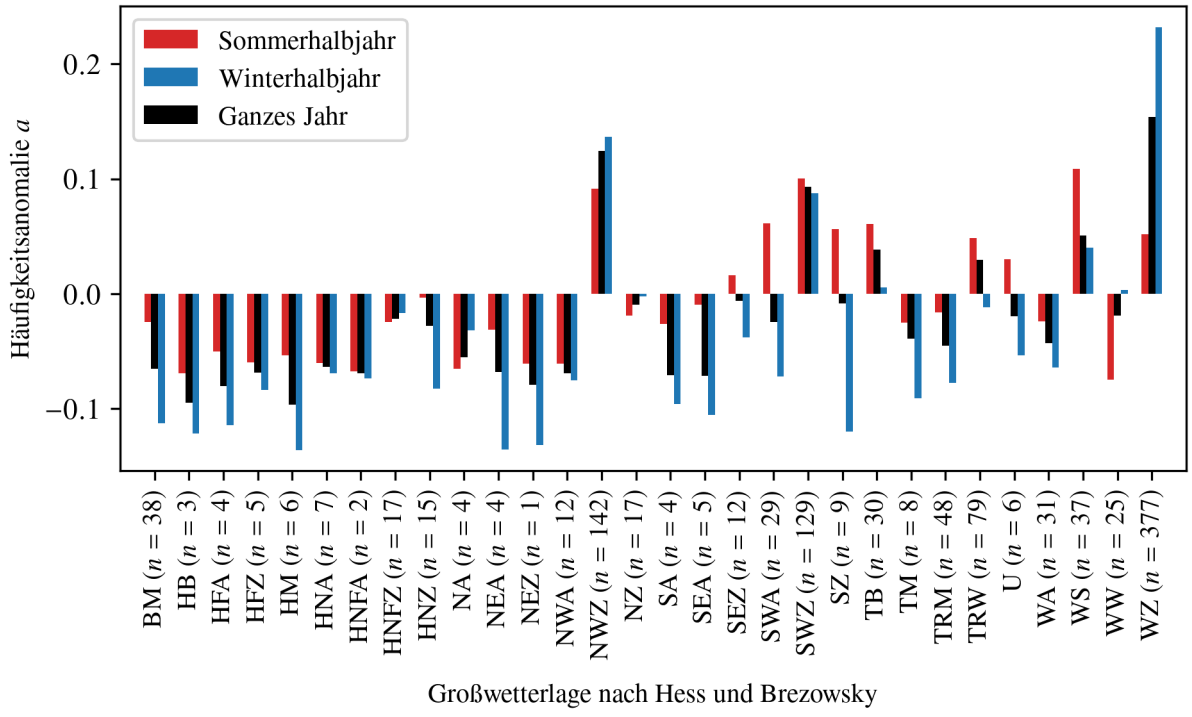


Abbildung 9: Stationsübergreifende Häufigkeitsanomalien a für alle Großwetterlagen. Rot: Sommerhalbjahr, blau: Winterhalbjahr, schwarz: ganzes Jahr. n: Anzahl der Starkwindtage im gesamten Untersuchungszeitraum (ganzes Jahr).

Im Winterhalbjahr gibt es vier Großwetterlagen mit positiven Häufigkeitsanomalien für Starkwind von mindestens 0,04: *WZ* (Westlage, zyklonal) mit 0,23 , *NWZ* (Nordwestlage, zyklonal) mit 0,14 , *SWZ* (Südwestlage, zykonlal) mit 0,09 und textitWS (südliche Westlage) mit 0,04 . Bei diesen vier Großwetterlagen sind Starkwindtage demnach deutlich häufiger zu erwarten als im klimatologischen Mittel. Es handelt sich dabei durchweg um Großwetterlagen der zonalen und gemischten Zirkulationsform mit Ströumgsrichutung Nordwest bis Südwest. Bei diesen Großwetterlagen kann das Untersuchungsgebiet von Tiefdruckgebieten passiert werden, die das Wettergeschehen in Deutschland beeinflussen. Die zugrunde liegenden Starkwindhäufigkeiten im Winter unterscheiden sich für *WZ, NWZ* und *SWZ* signifikant von den erwarteten Häufigkeiten ohne Einfluss der Großwetterlage (vgl. Tabelle 4). Bei *WS* ist das nicht der Fall, sodass auch die Aussagekraft der zugehörigen Anomalie begrenzt ist. Eine erhöhte Anomalie wäre meteorologisch aber plausibel, weil wie bei den anderen westlichen Lagen der Einfluss von Tiefdruckgebieten oft gegeben ist.

Im Sommerhalbjahr weisen acht Großwetterlagen positive Häufigkeitsanomalien größer als 0,04 auf. Davon treten die größten Anomalien bei den drei Großwetterlagen *WS* (Südliche Westlage), *SWZ* (Südwestlage, zyklonal) und *NWZ* (Nordwestlage, zyklonal) mit 0,11 , 0,10 und 0,09 auf. Sie zeigten auch im Winter positive Anomalien, und genauso ist auch im Sommer bei diesen Großwetterlagen der Einfluss von Tiefdruckgebieten möglich. Wie im Winter unterscheidet sich auch im Sommer die zugrunde liegende Häufigkeitsverteilung für die Wetterlagen *NWZ* und *SWZ* signifikant von der ohne Einfluss der Großwetterlage auf Starkwind. Für *WS* kann im Sommer aber aufgrund der geringen Auftrittshäufigkeit der Großwetterlage keine Aussage zur Signifikanz gemacht werden. Deshalb wird angenommen, dass auch die Häufigkeitsanomalie von *WS* im Sommer mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist.

Tabelle 4: P-Werte der Chi-Quadrat-Tests für ausgewählte Großwetterlagen. Fett gedruckt sind p-Werte < 0,05 , bei denen die beobachtete Starkwindhäufigkeiten signifikant von den erwarteten Starkwindhäufigkeiten ohne Einfluss der Großwetterlage abweichen. „-“ : Test wurde aufgrund zu geringer Häufigkeiten nicht durchgeführt.

	NWZ	SWA	SWZ	SZ	TB	TRW	WS	WZ
Ganzes Jahr	**0,00**	0,10	**0,00**	0,60	0,22	0,15	**0,00**	**0,00**
Sommer	**0,00**	**0,02**	**0,00**	0,07	**0,01**	**0,00**	-	**0,00**
Winter	**0,00**	**0,00**	**0,00**	-	0,70	0,28	0,06	**0,00**

Weitere Großwetterlagen mit positiven Häufigkeitsanomalien im Sommerhalbjahr sind *SWA* (Südwestlage, antizyklonal), *TB* (Tief Britische Inseln) und *SZ* (Südlage, zyklonal) mit jeweils 0,06 , gefolgt von *TRW* (Trog Westeuropa) und *WZ* (Westlage, zyklonal) mit jeweils 0,05 . Diese Großwetterlagen lassen sich den Großwettertypen Nordwest (*NWZ*), West (*WS, WZ*), Südwest (*SWZ, SWA*) und Süd (*TB, SZ, TRW*) zuordnen. Von den Großwetterlagen mit positiven Anomalien im Sommerhalbjahr ist *SZ* ist die einzige mit nicht signifikant positiver Anomalie, auch

wenn die positive Anomalie wie auch für die anderen Großwetterlagen meteorologisch plausibel ist. Besonders die südwestlichen bis südlichen Strömungen transportieren im Sommer warme und feuchte Luft nach Deutschland. Diese begünstigt die Gewitterbildung, schließt aber im Allgemeinen auch nicht aus, dass die Starkwindtage mit frontalen Prozessen zusammenhängen. Interessant ist, dass hier auch antizyklonale Großwetterlage *SWA* auftritt, bei der im Gegensatz zu den anderen Großwetterlagen der Einfluss von Tiefdruckgebieten unwahrscheinlich ist, sodass hier überwiegend von konvektiven Prozessen ausgegangen werden kann.

Einige Großwetterlagen mit positive Anomalien in Sommerhalbjahr weisen im Gegesatz dazu im Winterhalbjahr negative Anomalien auf. Hierzu gehören *SWA, SZ* und *TRW*. Für Sommer- und Winterhalbjahr sind aber nur für *SWA* signifikanten Unterschiede der Anomalien festgestellt worden. Nur bei *SWA* kann also von einem robusten Vorzeichenwechsel der Anomalien ausgegangen werden.

Zusammenfassend können nun erste Unterschiede zwischen den Häufigkeitsanomalien in Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr festgehalten werden. Im Winterhalbjahr begünstigen die westlichen Großwetterlagen *SWZ*, *NWZ* und *WZ* das Auftreten von Starkwind. Auch im Sommer sind diese drei westlichen Großwetterlagen, bei denen Deutschland häufig unter dem Einfluss von Tiefdruckgebieten steht, für Starkwind relevant. Im Sommerhalbjah haben zudem weitere Großwetterlagen einen positiven Einfluss auf die Starkwindhäufigkeit: *SWA*, *TB*, *TRW* sind gekennzeichnet von einer südwestlichen bis südlichen Strömung, bei der in warmer und feuchter Luft Konvektion ausgelöst werden kann. Bei *SWA* ist ein klarer Vorzeichenwechsel zwischen sommerlichen und winterlichen Anomalien erkennbar. Auch für *WS* im Winterhalbjahr und *SZ* im Sommerhalbjahr zeigen sich positive Häufigkeitsanomalien, diese sind aber nicht signifikant.

4.3.2 Stationsbezogene Häufigkeitsanomalien

Die Häufigkeitsanomalien für Starkwind wurden außerdem auch für alle Stationen einzeln aus den jeweiligen stationsbezogenen Starkwindtagen bestimmt. Die Ergebnisse sind für ausgewählte Großwetterlagen, die bei den stationsübergreifenden Anomalien größere positive Werte zeigen, in Abbildung 10 dargestellt. Insgesamt gibt es viele Ähnlichkeiten zu den zuvor herausgearbeiteten Eigenschaften der stationsübergreifenden Anomalien. Diejenigen Großwetterlagen, die bei den stationübergreifenden Anomalien größere Anomalien zeigen, weisen auch bei stationsbezogener Betrachtung größere Anomalien auf. Die stationsbezogenen Häufigkeitsanomalien haben aber insgesamt deutlich kleinere Werte als die stationsübergreifenden Häufigkeitsanomalien. Wie schon bei der Vorstellung der Häufigkeitsanomalien in Kapitel 3.6 erwähnt, ist dies nicht weiter überraschend, weil stationsübergreifende Starkwindtage deutlich häufiger als stationsbezogene Starkwindtage sind und damit auch die Anomalien größer sind.

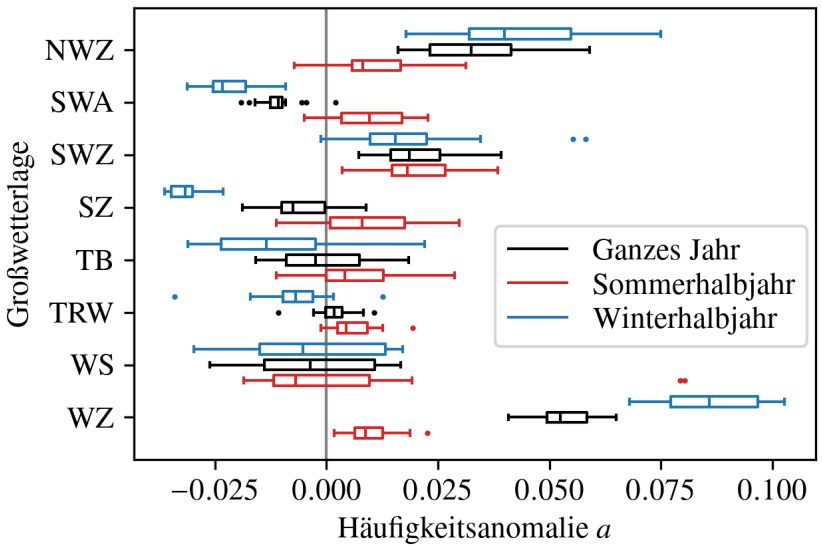


Abbildung 10: Stationsbezogene Häufigkeitsanomalien *a* für ausgewählte Großwetterlagen. Rot: Sommerhalbjahr, blau: Winterhalbjahr, schwarz: ganzes Jahr. Die Anomalien der einzelnen Stationen für den jeweiligen Zeitraum sind als Boxen zusammengefasst, welche den Bereich zwischen dem ersten und dritten Quantil umfassen. Die mittlere Linie der Boxen ist der Median, die Balken erstrecken sich bis zum letzten Wert, der innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstand von der Box liegt.

Bei den meisten Großwetterlagen gibt es nur eine relativ geringe „Überschneidung“ der Verteilungsbreite zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, d. h. die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr sind größer als die Unterschiede zwischen den Stationen im entsprechenden Halbjahr. Für die Großwetterlagen *SWZ* und *WS* ist das allerdings nicht der Fall. Hier sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen größer als die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr. Bei *SWZ* stimmt diese Beobachtung mit den stationsübergreifenden Anomalien überein, hier kann also davon ausgegangen werden, dass sich die Starkwindhäufigkeit von Sommer- und Winterhalbjahr tatsächlich kaum unterscheidet. Bei *WS* sind die stationsbezogenen Anomalien im Sommer und Winter breit um die 0,0 gestreut und haben einen leicht negativen Median. Das steht insbesondere im Sommer im Widerspruch zu der stark positiven stationsübergreifenden Häufigkeitsanomalie (vgl. Abbildung 9). Für diese sind die beiden Stationen verantwortlich, die für *WS* stark positive Werte von etwa 0,08 aufweisen und sich deutlich von den restlichen Stationen unterscheiden. Hieran wird wieder deutlich, dass bei *WS* v. a. im Sommerhalbjahr die Anzahl der Starkwindtage zu gering für quantitativ sinnvolle Aussagen ist.

Die Breite der Verteilung der einzelnen Stationen variiert zwischen Sommer und Winter und den einzelnen Großwetterlagen. Als Gründe dafür kommen einerseits die stark variierenden Häufigkeiten der Großwetterlagen in Betracht. Je seltener eine Großwetterlage, desto größer der Einfluss von Einzelereignissen und desto größer können die Unterschiede zwischen einzelnen

Stationen werden. Andererseits kann auch die räumliche Ausdehnung von Starkwindphänomenen bei verschiedenen Wetterlagen die Verteilungsbreite beeinflussen. Wenn zum Beispiel bei einer Wetterlage großskalige Ereignisse mit vielen betroffenen Stationen häufig vorkommen, folgt daraus geringere Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen. Diese Effekte werden bei der detaillierten Diskussion der einzelnen Wetterlagen in Abschnitt 4.3.4 näher beleuchtet.

4.3.3 Vergleich der Häufigkeitsanomalien mit einer längeren Zeitreihe

Für die Station Gießen/Wettenberg wurden die stationsbezogenen Häufigkeitsanomalien des 30-jährigen Untersuchungszeitraums (1995-2024) den Anomalien eines 74-jährigen Vergleichszeitraums (1951-2024) gegenübergestellt. Dieser Vergleich ermöglicht eine Einschätzung, wie die Wahl des Zeitraums und die Seltenheit mancher Großwetterlagen die ermittelten Anomalien beeinflusst. Die Häufigkeitsanomalien der beiden Zeiträume sind für Sommer- und Winterhalbjahr separat in Abbildung 11 dargestellt, wobei Großwetterlagen mit positiven Anomalien in Sommer- und/oder Winterhalbjahr für die Darstellung ausgewählt wurden.

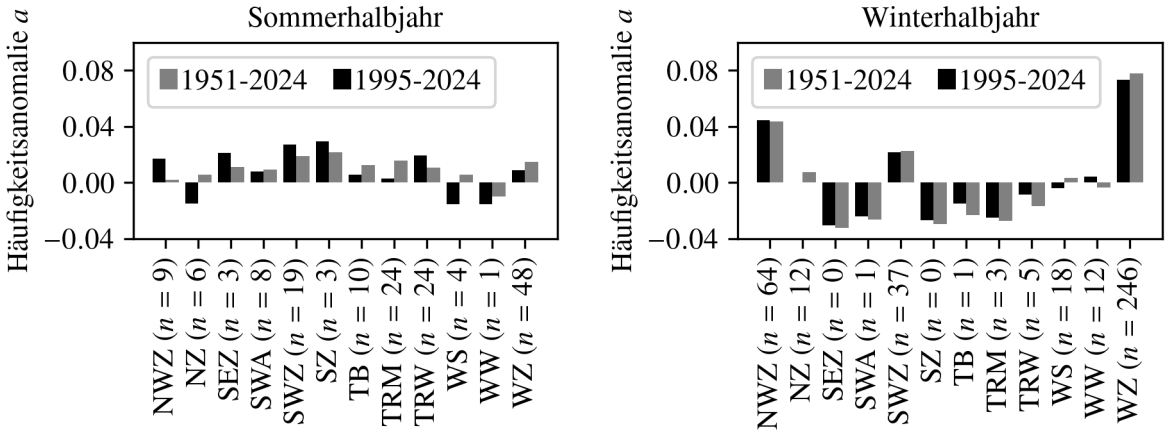


Abbildung 11: Häufigkeitsanomalien *a* für Starkwind an der Station Gießen/Wettenberg, Werte für den 74-jährigen Vergleichszeitraum (1951-2024, grau) im Vergleich zum 30-jährigen Untersuchungszeitraum (1995-2024, schwarz). Links: Sommerhalbjahr, rechts: Winterhalbjahr, *n*: absolute Anzahl der Starkwindtage im Sommer-/Winterhalbjahr bei der jeweiligen Wetterlage (1951-2024).

Besonders im Winterhalbjahr sind die Unterschiede zwischen den beiden Zeiträumen gering, was sich auch in einem hohen Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0,99 wider spiegelt. Die zuvor identifizierten Großwetterlagen mit den größten positiven Anomalien, *WZ*, *NZW* und *SWZ*, zeigen auch im längeren Vergleichszeitraum vergleichbar hohe Anomalien. Ein größerer Unterschied zeigt sich bei *NZ* (Nordlage, zyklonal) mit einer Anomalie von 0,000 im Untersuchungszeitraum und einem Wert von 0,007 im Vergleichszeitraum. Die Unterschiede sind bei lediglich 12 Starkwindtagen im Vergleichszeitraum aber wenig aussagekräftig. Die Wetterlage

WS zeigt zwischen den Zeiträumen geringe Unterschiede mit Vorzeichenwechsel, sie kann also für Gießen/Wettenberg im Winterhalbjahr nicht als überdurchschnittlich starkwindanfällig gelten. Dennoch wird diese Wetterlage im folgenden Abschnitt synoptisch diskutiert, weil andere Stationen deutlich größere Anomalien aufweisen (vgl. Abbildung 10).

Im Sommerhalbjahr ist die Übereinstimmung zwischen den beiden Zeiträumen geringer als im Winterhalbjahr, der Korrelationskoeffizient beträgt hier 0,83. Die meisten zuvor identifizierten Großwetterlagen mit positiven Anomalien im Sommerhalbjahr (*NWZ, SWA, SWZ, SZ, TB, TRW, WZ*) weisen auch im Vergleichszeitraum positive Häufigkeitsanomalien auf, auch wenn die Werte teils deutlich voneinander abweichen. Ein Grund hierfür ist mit Sicherheit die geringe Anzahl von Starkwindtagen, wie z. B. die Großwetterlage *SZ* zeigt. Bei *SZ* gab es in der gesamten Zeitreihe drei Starkwindtage, die alle in den kürzeren Untersuchungszeitraum fallen und damit die Abweichung der Anomalien verursachen. Als Wetterlage mit vergleichsweise großer positiver Anomalie fällt *SEZ* (Südostlage, zyklonal) auf, die bei den stationsübergreifenden Anomalien nur eine untergeordnete Rolle spielt (vgl. Abbildung 9). Hier ist eine eine Gewitter- und damit Starkwindanfälligkeit im Sommer meteorologisch durchaus plausibel. Da aber Gießen/Wettenberg im Untersuchungszeitraum im Vergleich zu den anderen Stationen bei *SEZ* einen deutlich höheren Wert aufweist (hier nicht gezeigt), ist diese Ergebnis als nicht repräsentativ für andere Stationen anzusehen.

Insgesamt zeigt sich also eine gute (Sommerhalbjahr) bis sehr gute (Winterhalbjahr) Übereinstimmung zwischen den Anomalien der Station Gießen/Wettenberg im kürzeren und längeren Zeitraum. Die zuvor identifizierten Großwetterlagen mit erhöhter Starkwindanfälligkeit konnten unter Verwendung der längeren Zeitreihe überwiegend bestätigt werden. Ein Grund für beobachteten Unterschiede ist, v. a. im Sommer, die geringe Anzahl der Starkwindtage bei seltenen Wetterlagen. Eine vollständige Übereinstimmung zwischen den beiden Zeitreihen ist aber aufgrund von meteorologischer Variabilität und etwaigen Trends in den Starkwindhäufigkeiten ohnehin nicht zu erwarten. Das verwendete Verfahren ist also trotz der größeren Unsicherheiten im Sommer grundsätzlich geeignet und hinreichend robust, um Aussagen über die Starkwindhäufigkeiten bei verschiedenen Wetterlagen zu machen.

4.3.4 Synoptische Diskussion einzelner Großwetterlagen

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Großwetterlagen detaillierter diskutiert, die für das Sommer- und/oder Winterhalbjahr positive Häufigkeitsanomalien für Starkwind zeigen. Dazu erfolgt jeweils zunächst eine grobe Beschreibung der Großwetterlage anhand von Wetterkarten, die auf Werner und Gerstengarbe (2010) basiert. Anschließend wird die geographische Verteilung der stationsbezogenen Häufigkeitsanomalien und die Anzahl der betroffenen Stationen pro Starkwindtag diskutiert und soweit möglich meteorologisch eingeordnet. Alle dazu nötigen Grafiken sind pro Wetterlage zusammengefasst und in den Abbildungen 12 bis 15 dargestellt.

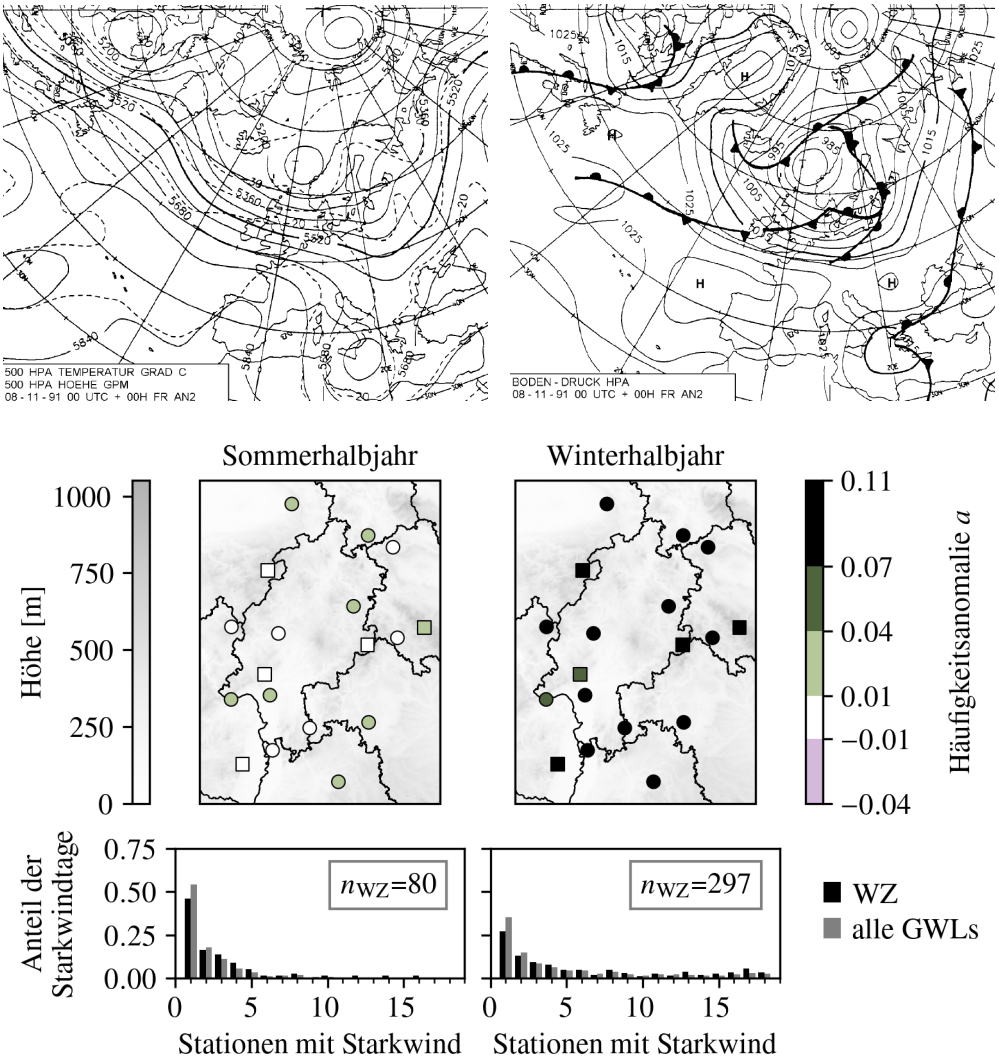


Abbildung 12: Großwetterlage *WZ* (Westlage, zyklonal). Oben: Beispielhafte Wetterkarten für Nordatlantik und Europa (Werner und Gerstengarbe 2010), oben links: Höhe des 500 hPa-Niveaus in geopotentiellen Metern (durchgezogene Linien) und 500 hPa Temperatur in Grad Celsius (gestrichelte Linien), oben rechts: Bodendruck in hPa. Mitte: Häufigkeitsanomalie für Starkwind an jeder Station (Quadrate: Bergstationen), Mitte links: Sommerhalbjahr, Mitte rechts: Winterhalbjahr, Hintergrund: Topographie (Quelle: Copernicus WorldDEM-30). Unten: Histogramme der betroffenen Stationen pro stationsübergreifendem Starkwindtag, unten links: Sommerhalbjahr, unten rechts: Winterhalbjahr, n_{GWL}: Anzahl der stationsübergreifenden Starkwindtage bei entsprechender Großwetterlage.

Mit 1433 Tagen ist die Großwetterlage ***WZ*** (Westlage, zyklonal; Abbildung 12) die häufigste Großwetterlage im Untersuchungszeitraum (13,1 %). Bei *WZ* ist das Wetter von Einzelstörungen geprägt, die sich entlang der Polarfront in normaler Lage von West nach Ost über die Nord- und Ostsee bewegen. Im Winterhalbjahr sind die Häufigkeitsanomalien für fast alle Stationen stark positiv (über 0,07). Die durchschnittliche Anzahl der betroffenen Stationen liegt mit 6,0

deutlich über der aller anderen hier besprochenen Großwetterlagen und über dem Durchschnitt aller Großwetterlagen mit 4,9 Tagen. Im Sommerhalbjahr sind die Häufigkeitsanomalien für alle Stationen positiv und für knapp die Hälfte der Stationen größer als 0,01, und damit deutlich kleiner als im Winter. Auch im Sommerhalbjahr sind überdurchschnittlich viele Stationen betroffen (2,8 im Vergleich zu durchschnittlich 2,4 betroffenen Stationen). Dies passt zu Annahme, dass bei *WZ* großskalige Prozesse wie Fronten oder auch Konvergenzlinien die Hauptursache für Starkwindtage sind. Kleinskalige Prozesse wie die thermische Gewitterbildung spielen dagegen kaum eine Rolle, weil die westliche Meeresluft im Sommer in der Regel zu mild für (organisierte) Konvektion ist. Die Häufigkeitsanomalien zeigen also, dass sommerliche Stürme bei *WZ* weniger stark sind und eine geringere Auswirkung in der Fläche haben als im Winter. Weder im Sommer- noch im Winterhalbjahr lässt sich ein räumlicher Gradient erkennen. Dass die Anomalien im Norden höher sind als im Süden, wäre zu erwarten, da die höchsten Böenspitzen üblicherweise in räumlicher Nähe zum Tiefkern, aber südlich davon anzutreffen sind. Wahrscheinlich ist hierzu aber die Entfernung der untersuchten Stationen zu gering, und der Effekt würde nur bei großräumigeren Betrachtung sichtbar.

Die Charakteristika der Wetterlagen ***NWZ*** (Nordwestlage, zyklonal) und ***SWZ*** (Südwestlage, zyklonal) ähneln denen von *WZ* (Westlage, zykonal) in vielerlei Hinsicht, weshalb sie hier nicht detailliert gezeigt werden. Auch bei *NWZ* und *SWZ* liegen an den meisten Stationen positive Anomalien vor und es lassen sich keine räumlichen Gradienten erkennen. Die winterlichen Anomalien erreichen aber nicht solch hohe Werte für die Anomalien und die Anzahl der betroffenen Stationen wie bei *WZ*, sodass bei diesen Lagen von schwächeren Tiefdruckgebieten ausgegangen werden kann. Nur bei *SWZ* sind die Anomalien im Sommerhalbjahr in etwa gleich groß wie im Winterhalbjahr, was sich durch die antransportierten warmen und feuchten Luftmassen erklären lässt. Diese unterstützen die Labilisierungsprozesse, die unter anderem in Zusammenhang mit Kaltfronten auftreten und damit weit verbreitete Gewitterbildung befördern.

Die Großwetterlage ***WS*** (Südliche Westlage; Abbildung 13) liegt an 206 Tagen im Untersuchungszeitraum vor und ist damit eine der selteneren Großwetterlagen (1,9 %). Sie ist mit *WZ* verwandt, unterscheidet sich von dieser aber durch eine weiter südlich verlaufende Polarfront. Die Einzelstörungen bewegen sich bei *WS* direkt über das mittlere Deutschland hinweg. Bei den Häufigkeitsanomalien im Winterhalbjahr fällt eine räumliches Muster auf: in der nördlichen Hälfte des Untersuchungsgebiets liegen überwiegend negative Anomalien vor, in der südlichen Hälfte eher positive Anomalien. Das ließe sich erklären mit den außergewöhnlich südlichen Zugbahnen der Tiefdruckgebiete, an deren Südseite die stärksten Böen zu erwarten sind. Auch die unterdurchschnittliche Anzahl von 3,5 betroffenen Stationen im Winterhalbjahr passt in dieses Bild. Im Sommerhalbjahr heben sich die beiden Stationen Meiningen (Thüringen) und Würzburg (Bayern) mit sehr hohen Anomalien deutlich von den restlichen Stationen ab und sind wie schon erwähnt für die hohe stationsübergreifende Anomalie (vgl. Abbildung 9)

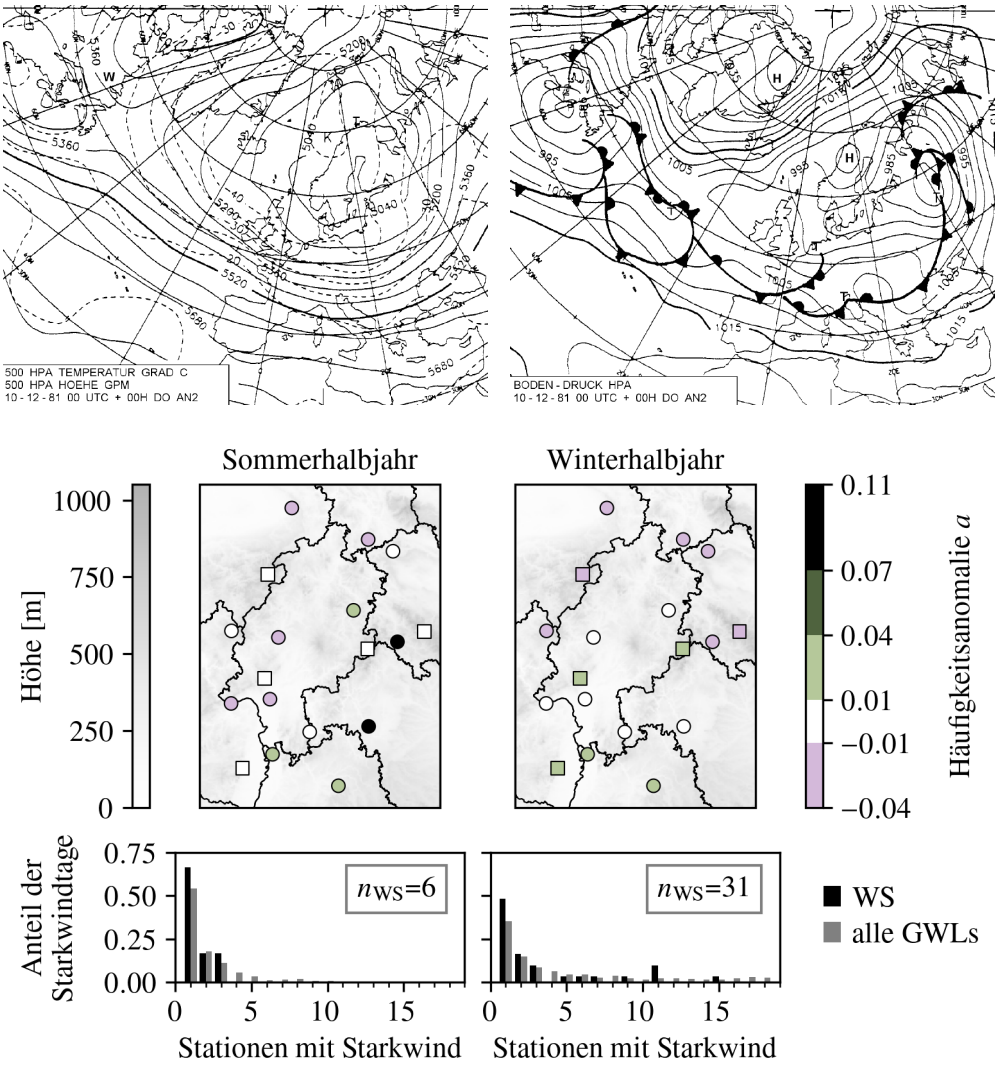


Abbildung 13: Wie Abbildung 12, aber für die Großwetterlage *WS* (Südliche Westlage).

verantwortlich. Wie schon in Abschnitt 4.3.1 erläutert, sind die Anomalien nicht signifikant bzw. konnten aufgrund der geringen Anzahl an Starkwindtagen nicht getestet werden. Für *WS* liegt also im Sommer- und Winterhalbjahr eine gewisse Starkwindanfälligkeit nahe, kann aber nicht zuverlässig quantifiziert werden.

SWA (Südwestlage, antizyklonal; Abbildung 14) gehört mit 388 Tagen zu den eher häufigeren Großwetterlagen (3,5 %). Mitteleuropa steht bei *SWA* unter antizyklonalem Einfluss einer südeuropäischen Hochdruckzone, sodass Tiefdruckgebiete keinen Einfluss auf das Untersuchungsgebiet haben. Das spiegelt sich in den überwiegend negativen Häufigkeitsanomalien im Winterhalbjahr wider. Im Sommerhalbjahr ergeben sich im Gegensatz dazu für einen Großteil der Stationen positive Anomalien mit überdurchschnittlicher Anzahl an betroffenen Stationen (2,7). Hierfür kommen nur konvektive Prozesse als Ursache in Frage, die in der sehr warmen und feuchten maritimen Luft auch bei antizykonalem Einfluss ausgelöst werden können.

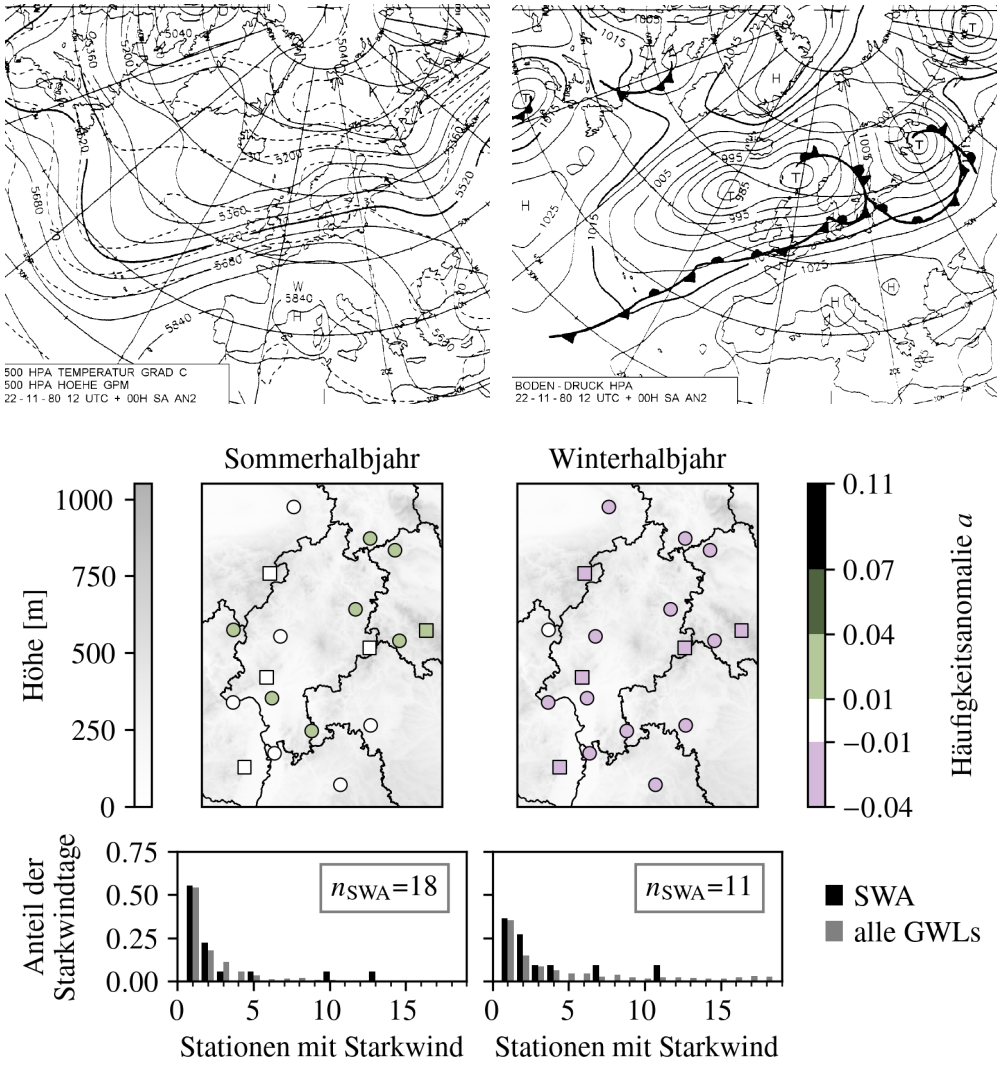


Abbildung 14: Wie Abbildung 12, aber für die Großwetterlage *SWA* (Südwestlage, antizyklonal).

Die Großwetterlage ***SZ*** (Südlage, zyklonal) weist genauso wie *SWA* negative Anomalien im Winter und positive Anomalien im Sommer auf. Die negativen Anomalien im Winter sind auch hier meteorologisch plausibel. Bei südlicher Strömung kann Mitteleuropa zwar von Einzelstörungen in nördliche Richtung überquert werden. Die Tiefdruckgebiete haben aber bereits einen längeren Weg über Land zurückgelegt und kommen schwächer in Deutschland an als Tiefdruckgebiete aus nordwestlichen bis westlichen Richtungen. Im Sommer können dagegen Starkwindereignisse auftreten, wenn warme und feuchte Luft beim Vordringen von Kaltfronten advehiert wird, wodurch starke linienförmige Konvektion ausgelöst werden kann. Im Gegensatz zu *SWA* sind die Anomalien bei *SZ* nicht signifikant und die Aussagen deshalb mit größeren Unsicherheiten verbunden. Bemerkenswert ist aber der 24.04.2019, an dem eine Böenlinie („squall line“) der Kaltfront vorauslief und Hessen von Südwesten nach Nordosten überquerte. Die hohen Böen hielten dabei im Rhein-Main-Gebiet ungewöhnlich lange bis zu 2 Stunden an (Kernn 2019). Sie resultierten in Starkwindtagen an 9 der Stationen in dieser Untersuchung.

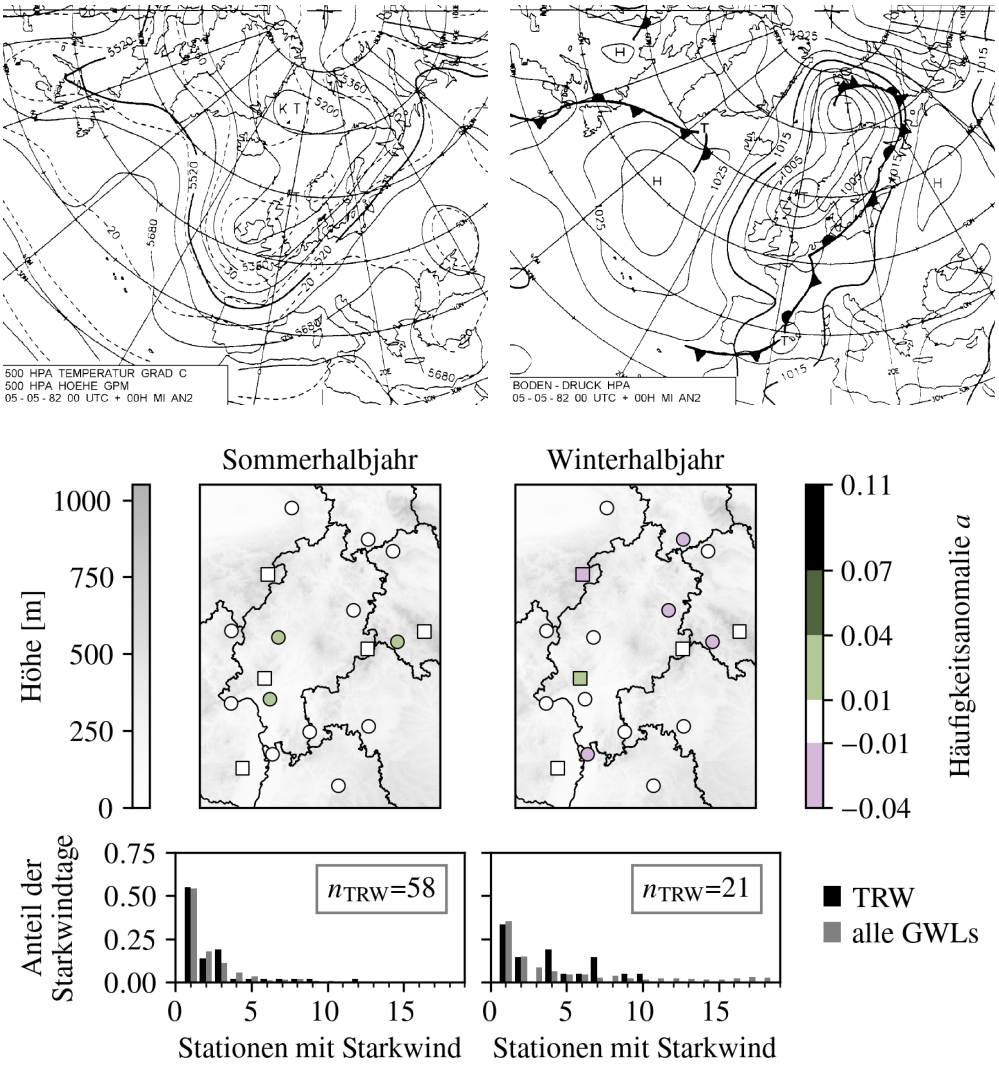


Abbildung 15: Wie Abbildung 12, aber für die Großwetterlage *TRW* (Trog Westeuropa).

Mit 670 Tagen (6,1 %) ist die Großwetterlage ***TRW*** (Trog Westeuropa; Abbildung 15) eine der häufigsten Großwetterlagen. Ein Höhentrog liegt über Westeuropa und führt Einzelstörungen aus südlicher Richtung über Mitteleuropa nach Norden. Im Winter sind die meisten Anomalien leicht negativ, allerdings ohne signifikante Unterschiede in der Häufigkeit von Starkwind. Die negativen Anomalien im Winterhalbjahr sind aufgrund der Zugbahnen der Tiefdruckgebiete dennoch meteorologisch plausibel. Die Häufigkeitsanomalien im Sommerhalbjahr sind für die meisten Stationen positiv, wenn auch nur leicht. Die beobachtete Häufigkeit von Starkwindtagen unterscheidet sich signifikant von der erwarteten Häufigkeit ohne Einfluss der Großwetterlage, sodass von einem positiven Einfluss von *TRW* auf die Starkwindhäufigkeit ausgegangen werden kann. Die durchschnittliche Anzahl an betroffenen Stationen ist im Sommer mit 2,3 etwas geringer als im Durchschnitt. Auch wenn in mehr als der Hälfte der Fälle nur eine Station von Starkwind betroffen ist, gab es am 06.08.2013 mit 12 betroffenen Stationen ein besonders großflächiges Ereignis. Auch hier handelte es sich um eine Böenfront, die zudem im Rhein-Main-Gebiet für

massive Behinderungen im Bahnverkehr sorgte (KIT, Institut für Meteorologie und Klimaforschung 2013). Der entwurzelte Baum aus Abbildung 1 fiel ebenfalls unter dem Einfluss von *TRW*.

Die Großwetterlage ***TB*** (Tief Britische Inseln) ähnelt in ihrer südlichen Strömung und den Häufigkeitsanomalien für Starkwind der eben diskutierten Großwetterlage *TRW* und wird deshalb nicht näher beleuchtet.

Zusammenfassen lässt sich sagen, dass sich die positiven Häufigkeitsanomalien für die diskutierten Großwetterlagen inklusive der Unterschiede zwischen Sommer- und Winterhalbjahr meteorologisch gut erklären lassen. Größere räumliche Muster, die über die statistische Streuung der einzelnen Stationen hinaus gehen, konnten dabei nicht festgestellt werden. Der Einfluss verschiedener Wetterlagen unterscheidet sich demnach nicht systematisch für die verschiedenen Gebiete in Hessen, sondern hängt mehr von der stochastischen Verteilung der einzelnen Ereignisse und der lokalen Windklimatologien ab. Lediglich für die Wetterlage *WS* konnte ein Nord-Süd-Gradient gefunden werden, wobei die Aussagekraft bei dieser Wetterlage aufgrund der geringen Auftrittshäufigkeit nur als erster Hinweis verstanden werden kann.

5 Diskussion

Die Zuordnung ganz Hessens zu einer gemeinsamen windklimatischen Zone innerhalb Deutschlands (Kasperski 2002) konnte in dieser Arbeit bestätigt werden. Mit Ausnahme der Bergstationen sind die Unterschiede zwischen den Perzentilen der verschiedenen Stationen gering und es liegen keine räumlichen Gradienten innerhalb Hessens vor. Im Gegensatz zu Mohr et al. (2017) heben sich die Perzentile der Bergstationen in dieser Arbeit klar von den anderen Stationen ab. Dies lässt sich gut erklären, da in jener Studie nur konvektive Ereignisse im Sommerhalbjahr berücksichtigt wurden. In der vorliegenden Arbeit ist also der hohe Anteil von nicht-konvektiven Ereignissen und die Betrachtung des ganzen Jahres für die hohen Perzentile der Bergstationen verantwortlich. Für Winterstürme fanden Hofherr und Kunz (2010) im Rhein-Main-Gebiet und im Oberrheingraben eine deutlich geringere Belastung als in den restlichen hessischen Gebieten. Die niedrigen Perzentil-Werte für Mannheim in dieser Arbeit passen zur den Ergebnissen von Hofherr und Kunz, die Werte für Frankfurt unterscheiden sich dagegen kaum von denen der restlichen Stationen. Ein möglicher Grund dafür ist der hohe Sommeranteil der Starkwindtage an der Station Frankfurt/Main, der auch ohne besonders starke winterliche Starkwindmessungen für einen hohen Perzentil-Wert verantwortlich sein könnte.

Sowohl die stationsbezogenen als auch die stationsübergreifenden Starkwindtage unterliegen einer deutliche Saisonalität mit höheren Häufigkeiten im Winterhalbjahr (Oktober bis März) als im Sommerhalbjahr (April bis September), mit einem Maximum im Januar und Februar. Auf diese Monate entfiel mit 26 der 50 Stürme auch bei Klawa und Ulbrich (2003) der größte

Anteil der schadensträchtigsten Stürme aus den Jahren 1970-1997. Die stationsübergreifenden Starkwindtage haben zudem ein zweites, kleineres Maximum im Juni und Juli, was mit den Ergebnissen von Gatzen (2013) und Mohr et al. (2017) übereinstimmt. Uneinigkeit besteht in der Frage, ob starke Böen im Sommer im Juni oder im Juli häufiger sind. Während bei Gatzen auch nicht-konvektive Böen berücksichtigt wurden und sich der Juni als Monat mit den meisten starken Böen ergab, ist es in dieser Arbeit der Juli, ebenso wie bei Mohr et al., die allerdings nur konvektive Ereignisse betrachteten. Die Differenz zu Gatzen könnte mit der abweichenden Definition von Starkwind (ab 26 m/s) oder dem größeren Untersuchungsgebiet (Deutschland) zusammenhängen.

Die gefundene Höhenabhängigkeit des Sommeranteils von Starkwindtagen steht in Einklang mit dem Zusammenhang von Starkwind und Höhenlage für Winterstürme (Hofherr und Kunz 2010), der für sommerliche konvektive Ereignisse allerdings nicht vorliegt (Mohr et al. 2017).

Im Winterhalbjahr haben die westlichen Großwetterlagen *WZ* (Westlage, zykonal), *NWZ* (Nordwestlage, zykonal) und *SWZ* (Südwestlage, zykonal) den größten signifikant positiven Einfluss auf die Starkwindhäufigkeit. Für diese Wetterlagen sind im Untersuchungsgebiet keine systematischen räumlichen Gradienten erkennbar. Nur *WS* (südliche Westlage) zeigt im Winterhalbjahr höhere Werte in der südlichen Hälfte Hessens, diese Ergebnisse sind aber statistisch nicht signifikant. Die großskaligen Gradienten in den Auswirkungen von Winterstürmen, wie sie z. B. Donat et al. (2010) beschrieben, spielen für Hessen also nur eine untergeordnete Rolle. Die erwähnten vier westlichen Großwetterlagen sind zusammen für rund 75 % der Starkwindtage im Winterhalbjahr verantwortlich, was nahe am Wert von 80 % für westliche Wetterlagen bei Winterstürmen von Donat et al. liegt.

Die von Kunz, Sander und Kottmeier (2009) gefundenen Großwetterlagen mit hohen sommerlichen Gewitterhäufigkeiten in Süddeutschland, *SWZ* und *SWA*, weisen auch in dieser Untersuchung hohe Starkwindhäufigkeiten im Sommerhalbjahr auf. *BM* (Brücke Mitteleuropa) ist laut den Autoren dieser Veröffentlichung zwar ebenfalls eine Wetterlage mit hoher Gewitterhäufigkeit, konnte hier aber nicht als starkwindanfällig bestätigt werden. Dies deckt sich mit der Diskussion von Wapler und James (2015), die bei *BM* eine Schwäche der Klassifikation von Hess und Brezowsky sehen.

Wapler und James (2015) selbst identifizierten mit der numerischen Wetterlagenklassifikation nach James *SZ*, *SEA*, *SWZ*, *TRW* und *TB* als Großwetterlagen mit hohen Gewitterhäufigkeiten im Sommerhalbjahr. Für diese Wetterlagen ergeben sich auch in dieser Arbeit überwiegend positive Starkwindanomalien im Sommerhalbjahr. Einzige Ausnahme ist *SEA* (Südostlage, antizyklonal), für die nur einige Stationen im Süden leicht positive Anomalien aufweisen, während die stationsübergreifende Starkwindhäufigkeit nicht signifikant verändert ist. Bei dieser Wetterlage

verhindert ein Bodenhoch über dem Nordosten Deutschlands Konvektion, gleichzeitig steht die Südwesthälfte des Landes bei südlicher bis südwestlicher Strömung unter zykonalem Einfluss. In der so entstehenden Konvektionszone kann dann laut Wapler und James in Zusammenspiel mit der feuchten Luft aus südlichen Richtungen großräumige Konvektion ausgelöst werden. Die Autoren dieser Studie fanden auch für große Teile Hessens positive Anomalien für Gewitter, aber die größten Anomalien liegen in Baden-Württemberg vor. Das kann die unterschiedlichen Ergebnisse vermutlich teilweise erklären, hinzu kommt die Seltenheit der Wetterlage *SEA* und auch ein Einfluss der unterschiedlichen Wetterlagenklassifikationen ist denkbar.

Auch die Wetterlagen, die Bissolli, Grieser et al. (2007) und Wapler, Beyer und James (2025) für Tornados hervorhoben, zeigen eine positive Häufigkeitsanomalie für Starkwind. Aufgrund der extrem kleinen räumlichen Ausdehnung und der kurzen Lebensdauer von Tornados ist es aber unwahrscheinlich, dass eine der 18 Stationen direkt von einem Tornado getroffen wurde. Die für die Tornadobildung notwendigen meteorologischen Bedingungen sind aber selbstverständlich auch für das Auftreten von Starkwind förderlich.

Trotz sorgfältiger Arbeit sind systematische Fehler in den Ergebnissen dieser Untersuchung zu erwarten. Denn wie bei allen Studien auf Basis von Stationsmessungen sind kleinskalige Prozesse aufgrund der geringen Stationsdichte systematisch unterrepräsentiert. So muss davon ausgegangen werden, dass (insbesondere im Sommerhalbjahr) die ermittelten Häufigkeiten für Starkwind eine Untergrenze für die tatsächliche Belastung darstellen. Auch die Wahl der Großwetterlagenklassifikation nach Hess und Brezowsky hat einige Schwächen. Neben der Subjektivität zählt dazu auch das seltene Auftreten von einzelnen Großwetterlagen, sodass über 30 Jahre noch keine statistisch zuverlässigen Aussagen möglich sind. Diese Schwächen könnten eliminiert werden, wenn die Untersuchung mit der Klassifikation nach James und längeren Zeitreihen wiederholt wird. Hier sind sicherlich keine grundlegend anderen Ergebnisse zu erwarten, es könnten aber ggf. zusätzliche Aussagen zu Wetterlagen gemacht werden, die bei Hess und Brezowsky selten vorkommen. Dass die Ergebnisse dieser Arbeit größtenteils mit der Fachliteratur übereinstimmen, unterstreicht aber, dass der gewählte Ansatz trotz dieser Schwächen grundsätzlich geeignet ist und für nicht zu seltene Großwetterlagen brauchbare Ergebnisse liefert.

Nichtsdestotrotz wird sich die Stationsdichte der Messstationen in den kommenden Jahren wohl kaum wesentlich erhöhen. Es ist folglich nicht damit zu rechnen, dass in naher Zukunft ein deutlich höherer Anteil der konvektiven Phänomene von Wetterstationen erfasst werden kann. Deshalb muss in diesem Zusammenhang auch über alternative methodische Zugänge nachgedacht werden. Eine höhere räumliche Auflösung bieten Radardaten, die für Deutschland seit über 10 Jahren mit den modernen Dual Ploarization Doppler Radaranlagen gewonnen werden. Sie liefern neben Informationen zu Niederschlagstypen und -arten auch die radiale Windgeschwindigkeit. Radardaten haben sich in klimatologischen Studien zu konvektiven Niederschlägen und zur

Untersuchung konvektiver Prozesse als sehr nützlich erwiesen, so stellt der Deutsche Wetterdienst etwa eine radarbasierte Niederschlagsklimatologie bereit (Kreklow et al. 2020). Auf Radardaten basierende Windklimatologien sind bisher aber nicht bekannt, hier steht also noch kein leicht verfügbar Datensatz zur Verfügung. Da aber auch für die Windenergiebranche Windmessungen mit Radargeräten weiterentwickelt werden (Valldecabres et al. 2018), könnten hier in den nächsten Jahren Fortschritte erzielt werden.

Ein alternativer Ansatz ist die großflächige Auswertung von Versicherungsdaten, die im Zusammenhang mit Windschäden auftreten und Aufschluss auf die wirtschaftlichen Auswirkungen von sommerlichen Starkwindereignissen geben können. Nicht zuletzt bietet auch Modellierung die Chance, die Verbreitung von Starkwind in der Fläche besser abbilden zu können. Die Verwendung von neuronalen Netzen könnte in den nächsten Jahren zu eine wesentlichen Verbesserung der Datengrundlage beitragen, wie neueste Ergebnisse nahe legen (Stanley et al. 2024).

6 Fazit und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurde Starkwind anhand von 30-jährigen Messungen (1995-2024) der täglichen Böenspitze an 18 Wetterstationen in Hessen und Umgebung untersucht. Starkwindtage wurden als Tage definiert, an denen die tägliche Böenspitze gleich oder größer als das jährliche 98 %-Perzentil ist. Die so erhaltenen Starkwindtage wurden in Hinblick auf die jahreszeitliche Verteilung und ihre Häufigkeit in Abhängigkeit von der Großwetterlage nach Hess und Brezowsky untersucht. Ein Schwerpunkt der Untersuchung lag auf den Unterschieden zwischen Sommerhalbjahr (April bis September) und Winterhalbjahr (Oktober bis März). Um den Einfluss der Großwetterlage auf die Starkwindhäufigkeit zu beurteilen, wurden Häufigkeitsanomalien für Starkwind nach Wapler und James (2015) berechnet.

Im Gegensatz zu vielen anderen Veröffentlichungen wurde in dieser Arbeit alle Starkwindereignisse unabhängig von ihrem meteorologischen Entstehungshintergrund und ihren jahreszeitlichen Schwerpunkten betrachtet. So konnte untersucht werden, wie sich sommerliche und winterliche Starkwindtage in Hessen in ihren Eigenschaften und ihren Häufigkeiten unterscheiden. Eine zentrale Erkenntnis dieser Arbeit ist die Höhenabhängigkeit des Anteils an Starkwindtagen, die ins Sommerhalbjahr fallen. Die gefundenen höheren Sommeranteile für niedrigere Lagen sind meteorologisch plausibel, aber mit bis zu 37,9 % für Frankfurt/Main unerwartet stark ausgeprägt. In den dicht besiedelten, tiefliegenden Gebieten Hessens ist der Sommeranteil der Starkwindtage am größten und stellt mit ungefähr einem Viertel bis einem Drittel der Tage pro Station einen wesentlichen Anteil der Starkwindbelastung dar. Hinzu kommt, dass kleinskalige Starkwindereignisse aufgrund der geringen Stationsdichte in den verwendeten Daten unterrepräsentiert sind. Diese Ergebnisse sind also als untere Grenze der sommerlichen

Starkwindbelastung zu verstehen. Trotz der geringeren räumlichen Ausdehung und der kürzeren Dauer sind sommerlichen Starkwindereignisse für die gesamte Starkwindbelastung in Hessen also nicht zu vernachlässigen.

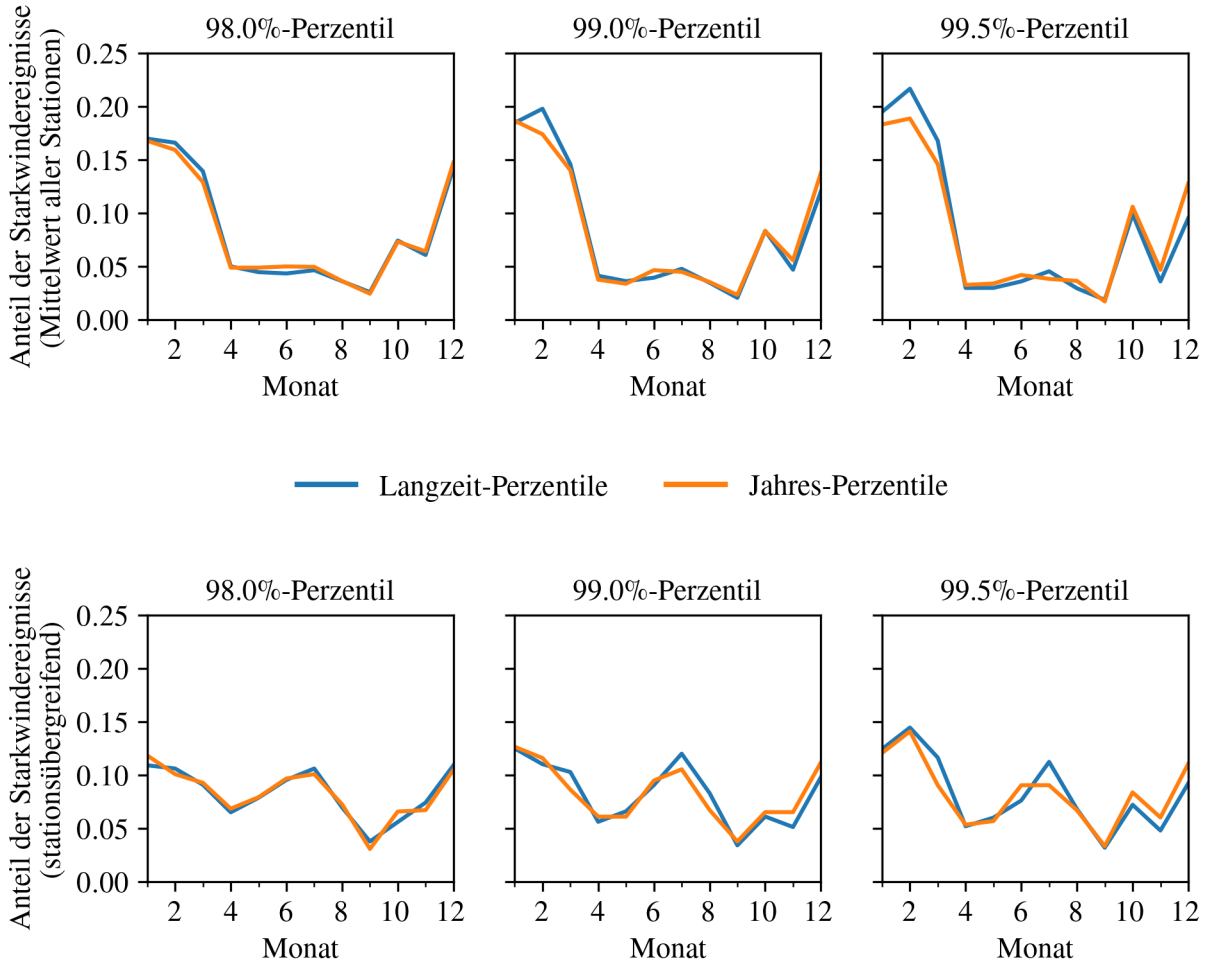
Es konnten sowohl für das Sommerhalbjahr, als auch für das Winterhalbjahr Großwetterlagen identifiziert werden, die besonders anfällig für Starkwind sind. Im Winter- und Sommerhalbjahr zeigen die drei westlichen Wetterlagen *WZ* (Westlage, zykonal), *NWZ* (Nordwestlage, zykonal) und *SWZ* (Südwestlage, zykonal) einen großen, signifikant positiven Einfluss auf die Starkwindhäufigkeit. Im Sommerhalbjahr weisen zudem die südwestlichen bis südlichen Lagen *SWA* (Südwestlage, antizyklonal), *TB* (Tief Britische Inseln) und *TRW* (Trog Westeuropa) positive Häufigkeitsanomalien auf. Dabei zeigen sich kaum räumliche Gradienten, sondern vielmehr statistische Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen. Für weitere Großwetterlagen wurden Indizien für eine erhöhte Starkwindanfälligkeit gefunden, die aber aufgrund der kleinen Datenbasis keine zuverlässigen Aussagen ermöglichen. Die Untersuchungsergebnisse konnten weitestgehend meteorologisch eingeordnet und plausibilisiert werden. Ein Vergleich der Ergebnisse mit einer längeren Zeitreihe (Gießen/Wettenberg, 1951-2024) bestätigte, dass die verwendete Methode robuste Ergebnisse liefert, für seltene Großwetterlagen aber insbesondere im Sommerhalbjahr nur begrenzte Aussagekraft besitzt.

Zur Beurteilung der jahreszeitlichen Gefährdung durch Starkwind muss neben der Häufigkeit von Starkwind auch die Anfälligkeit der Vegetation und Infrastruktur für Schäden berücksichtigt werden. Hier gilt es beispielsweise zu beachten, dass Bäume im Sommer aufgrund der Belaubung anfälliger für Schäden durch Wind sind (Jackson et al. 2019). Zudem werden Bautätigkeiten und große Open-Air Veranstaltungen gerne in die Sommermonate verlegt, sodass hier eine höhere Gefährdung der Bevölkerung und Infrastruktur durch Starkwind gegeben scheint.

Bei gemeinsamer Betrachtung der meteorologischen Ergebnisse dieser Arbeit, der im Sommer potentiell höheren gesellschaftlichen Vulnerabilität und der vermutlich höheren konvektiven Gefährdung in Zukunft scheint es dringend angeraten, sommerliche Starkwindereignisse stärker als bisher zu erforschen. Dazu ist einerseits eine bessere Erfassung und Analyse kleinskaliger Windereignisse im gegenwärtigen Klima nötig, wie sie z. B. Radardaten, Versicherungsdaten oder weiterentwickelte Modelle ermöglichen könnten. Andererseits sollte die sommerliche Starkwindbelastung trotz der damit verbundenen Herausforderungen auch bei der Modellierung des zukünftigen Klimas stärker als bisher berücksichtigt werden. Nur so können die noch bestehenden erheblichen Wissenslücken zur zukünftigen Starkwindhäufigkeit im Sommer geschlossen werden und zielgerichtete Klimaanpassungsmaßnahmen umgesetzt werden.

Anhang

Anhang 1: Monatliche Verteilung der Starkwindereignisse für die Perzentil-Varianten



Anhang 2: Sommeranteil der Starkwindereignisse für die Perzentil-Varianten

	98,0%	**99,0%**	**99,5%**
stationsbezogen, Langzeit-Perzentile	24,7	22,0	19,0
stationsbezogen, Jahres-Perzentile	25,9	22,3	20,2
stationsübergreifend, Langzeit-Perzentile	45,4	45,1	40,1
stationsübergreifend, Jahres-Perzentile	45,0	42,8	39,2

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d. h.	das heißt
DWD	Deutscher Wetterdienst
et al.	et alii / und andere
FZK	Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
ggf.	gegebenenfalls
GWL	Großwetterlage
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Hrsg.	Herausgeber
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
S.	Seite
u. a.	unter anderem
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Literatur und Hilfsmittel

Literatur

Bissolli, P. und E. Dittmann (2001). „The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 10.4, S. 253–260. DOI: 10.1127/0941-2948/2001/0010-0253.

Bissolli, P., J. Grieser, N. Dotzek und M. Welsch (2007). „Tornadoes in Germany 1950–2003 and their relation to particular weather conditions“. In: *Global and Planetary Change* 57.1, S. 124–138. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.007.

Deutscher Wetterdienst (2024). *Tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland*. v24.3. URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl.

Deutscher Wetterdienst (2025a). *Bö*. URL: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100310&lv3=100488 (besucht am 25. 11. 2025).

Deutscher Wetterdienst (2025b). *Warnkriterien*. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html (besucht am 25. 11. 2025).

Deutscher Wetterdienst (2025c). *Wind*. URL: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102936&lv3=103196 (besucht am 25. 11. 2025).

Deutscher Wetterdienst (2025d). *Großwetterlage*. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/grosswetterlage.html (besucht am 11. 12. 2025).

Donat, M. G., G. C. Leckebusch, J. G. Pinto und U. Ulbrich (2010). „Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases“. In: *International Journal of Climatology* 30.9, S. 1289–1300. DOI: 10.1002/joc.1982.

Gardiner, B., R. Lorenz, M. Hanewinkel, B. Schmitz, F. Bott, S. Szymczak, A. Frick und U. Ulbrich (2024). „Predicting the risk of tree fall onto railway lines“. In: *Forest Ecology and Management* 553, S. 121614. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121614.

Gatzen, C. (2013). „Warm-season severe wind events in Germany“. In: *Atmospheric Research* 123, S. 197–205. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.07.017.

Gatzen, C., A. H. Fink, D. M. Schultz und J. G. Pinto (2020). „An 18-year climatology of derechos in Germany“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20.5, S. 1335–1351. DOI: 10.5194/nhess-20-1335-2020.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (2022). *Naturgefahrenreport 2022*. Berlin.

Gliksman, D., P. Averbeck, N. Becker, B. Gardiner, V. Goldberg, J. Grieger, D. Handorf, K. Haustein, A. Karwat, F. Knutzen, H. S. Lentink, R. Lorenz, D. Niermann, J. G. Pinto, R. Queck, A. Ziemann und C. L. E. Franzke (2023). „Review article: A European perspective on wind and storm damage – from the meteorological background to index-based approaches

to assess impacts“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23.6, S. 2171–2201. DOI: 10.5194/nhess-23-2171-2023.

Gulev, S., P. Thorne, J. Ahn, F. Dentener, C. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D. Kaufmann, H. Nnamchi, J. Quaas, J. Riverar, S. Sathyendranath, S. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann und R. Vose (2021). „Changing State of the Climate System“. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, und B. Zhou (Hrsg.)]*, S. 287–422. DOI: 10.1017/9781009157896.004.

Hofherr, T. und M. Kunz (2010). „Extreme wind climatology of winter storms in Germany“. In: *Climate Research* 41, S. 105–123. DOI: 10.3354/cr00844.

Huth, R., C. Beck, A. Philipp, M. Demuzere, Z. Ustrnul, M. Cahynová, J. Kyselý und O. E. Tveito (2008). „Classifications of Atmospheric Circulation Patterns: Recent Advances and Applications“. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1146.1, S. 105–152. DOI: 10.1196/annals.1446.019.

Jackson, T., A. Shenkin, B. Kalyan, J. Zionts, K. Calders, N. Origo, M. Disney, A. Burt, P. Raumonen und Y. Malhi (2019). „A New Architectural Perspective on Wind Damage in a Natural Forest“. In: *Frontiers in Forests and Global Change* 1, S. 13. DOI: 10.3389/ffgc.2018.00013.

James, P. (2007). „An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe“. In: *Theoretical and Applied Climatology* 88.1, S. 17–42. DOI: 10.1007/s00704-006-0239-3.

KAnG (2024). *Bundes-Klimaanpassungsgesetz*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2023 Teil I Nr. 393.

Kasperski, M. (2002). „A new wind zone map of Germany“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90.11, S. 1271–1287. DOI: 10.1016/S0167-6105(02)00257-X.

Kernn, J. (2019). *Gewitternachlese*. Thema des Tages. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/4/25.html (besucht am 18. 01. 2026).

KIT, Institut für Meteorologie und Klimaforschung (2013). *Heftige Gewitter, Hitze*. Wettergefahren Frühwarnung. URL: https://www.wettergefahren-fruehwarnung.de/Ereignis/20130625_e.html (besucht am 21. 01. 2026).

Klawa, M. und U. Ulbrich (2003). „A model for the estimation of storm losses and the identification of severe winter storms in Germany“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3.6, S. 725–732. DOI: 10.5194/nhess-3-725-2003.

Kreklow, J., B. Tetzlaff, B. Burkhard und G. Kuhnt (2020). „Radar-Based Precipitation Climatology in Germany—Developments, Uncertainties and Potentials“. In: *Atmosphere* 11.2, S. 217. DOI: 10.3390/atmos11020217.

Kunz, M., J. Sander und C. Kottmeier (2009). „Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany“. In: *International Journal of Climatology* 29.15, S. 2283–2297. DOI: 10.1002/joc.1865.

Mohr, S., M. Kunz, A. Richter und B. Ruck (2017). „Statistical characteristics of convective wind gusts in Germany“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17.6, S. 957–969. DOI: 10.5194/nhess-17-957-2017.

Púčik, T., P. Groenemeijer, A. T. Rädler, L. Tijssen, G. Nikulin, A. F. Prein, E. Van Meijgaard, R. Fealy, D. Jacob und C. Teichmann (2017). „Future Changes in European Severe Convection Environments in a Regional Climate Model Ensemble“. In: *Journal of Climate* 30.17, S. 6771–6794. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0777.1.

Purr, C., E. Brisson und B. Ahrens (2018). *Konvektive Gefährdung über Hessen und Rheinland-Pfalz*. Abschlussbericht. Institut für Atmosphäre und Umwelt, Goethe-Universität Frankfurt am Main.

Ranasinghe, R., A. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F. Cruz, S. Dessai, A. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang und R. Zaaboul (2021). „Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment“. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, und B. Zhou (Hrsg.)]*, S. 1767–1926. DOI: 10.1017/9781009157896.014.

Seneviratne, S., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S. Vicente-Serrano, M. Wehner und B. Zhou (2021). „Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate“. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, und B. Zhou (Hrsg.)]*, S. 1513–1766. DOI: 10.1017/9781009157896.013.

Stanley, K., C. Primo, S. Brune, C. Dalelane, B. Mannig und B. Früh (2024). *Erstellung einer Windböenklimatologie für Deutschland unter Verwendung eines neuronalen Netzes*. Forschungsergebnisse kompakt. BMDV-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“.

Ulbrich, U. und T. Kunz (2025). *Anthropogene Änderungen des Sturmklimas über Zentraleuropa und mögliche Folgen für die Region Hessen (Sturmklima Hessen)*. Zwischenbericht. Freie Universität Berlin.

Valldecabres, L., N. G. Nygaard, L. Vera-Tudela, L. Von Bremen und M. Kühn (2018). „On the Use of Dual-Doppler Radar Measurements for Very Short-Term Wind Power Forecasts“. In: *Remote Sensing* 10.11, S. 1701. DOI: 10.3390/rs10111701.

Wapler, K., M. Beyer und P. James (2025). „Tornado occurrence and characteristics in Central Europe under different synoptic conditions“. In: 12th European Conference on Severe Storms, Utrecht, The Netherlands, 17–21 Nov 2025. DOI: 10.5194/ecss2025-72.

Wapler, K. und P. James (2015). „Thunderstorm occurrence and characteristics in Central Europe under different synoptic conditions“. In: *Atmospheric Research* 158-159, S. 231–244. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.07.011.

Werner, P. C. und F.-W. Gerstengarbe (2010). *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky - 7.,verbesserte und ergänzte Auflage*. PIK Report 119. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung.

World Meteorological Organization (WMO) (2024). *Guide to instruments and methods of observation*. WMO-No. 8. Volume I. Genf.

Hilfsmittel

- ChatGPT, OpenAi: www.chatgpt.com
  - Unterstützung bei der Erstellung von Code-Abschnitten zur Datenauswertung
  - Formulierungshilfe: „Jahres-Perzentile“ und „Langzeit-Perzentile“ anstatt „jährlich“ und „insgesamt“; „stationsbezogen“ anstatt „stationsweise“
- ChatGPT version o4, OpenAi, Zugriff über LobeChat der Goethe-Universität: https://lobechat.s.studiumdigitale.uni-frankfurt.de/chat
  - Unterstützung bei der Erstellung von Code-Abschnitten zur Datenauswertung

Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle PD Dr. Heike Hübener für die Möglichkeit, mit dieser Bachelorarbeit spannende Einblicke in die Arbeit am FZK und den Alltag einer Behörde zu erhalten. Vielen Dank für die unzähligen, immer hilfreichen Anmerkungen zur Interpretation und Darstellung der Ergebnisse, für alle kritischen Fragen und das Korrekturlesen der gesamten Bachelorarbeit. Ich möchte mich außerdem bei Prof. Dr. Bodo Ahrens für die angenehme Betreuung, die Anregungen zur Datenauswertung und die schnelle Beantwortung meiner Fragen bedanken. Dr. Bianca Bertulat und Bertram Bühner danke ich für ihre ansteckende Begeisterung für die Wissenschaft und die kompetente Studienberatung. Auch bei meinen Kommilitonen möchte ich mich bedanken, unter anderem für die vielen interessanten Diskussionen in der Mittagspause. Nicht zuletzt geht mein Dank an meine Freunde und meine Familie, die mich während des gesamten Studiums begleitet und unterstützt haben.