

C. HARTWIG, Y. WIECZORREK, S. BIRKENSTOCK, M. LANGEN, S. GINZEL, M. KOSSMANN

Lokale und regionale Windsysteme in der Kölner Bucht sowie der kanalisierende Effekt des Rheintals

Analyse eines bodennahen Bergwindes entlang des Rheintals anhand meteorologischer Messdaten



Christian Hartwig,
Diplom Geograph,
Abteilungsleiter im
Umwelt und Verbrau-
cherschutzamt der
Stadt Köln



Yvonne Wieczorrek,
Diplom Biologin,
Umwelt- und Ver-
braucherschutzamt
der Stadt Köln,
Anpassung an den
Klimawandel



Silvia Birkenstock,
Chemieingenieurin,
Umwelt- und Verbrau-
cherschutzamt der
Stadt Köln, Stadt-
klima und Immissi-
onsschutz

In Kommunen nimmt der Bedarf an stadt- und regional-klimatischen Erkenntnissen im Zuge des Klimawandels zu. Daher werden in kommunalen Planungsprozessen für stadtklimatische Fragestellungen immer häufiger numerische Modelle eingesetzt. Vor allem bei besonders hitzebelasteten Strahlungswetterlagen mit hoher Sonneneinstrahlung und geringem Luftaustausch sind Kenntnisse zur Kaltluftbildung und zum Kaltluftabfluss von Bedeutung.

Die fortlaufende Schaffung von Wohnraum wirft vor allem in den begehrten Randlagen von Ballungszentren die Frage nach der Bedeutung des Belüftungseffekts von Freiflächen und dem Einfluss der Orographie auf. Für größere Bauprojekte im Kölner Stadtgebiet werden daher großräumige Klimauntersuchungen erstellt, um Aussagen zur Belüftungssituation bei autochthonen Wetterlagen zu treffen und auf Projektebene Minderungsmaßnahmen abzuleiten. Der Beitrag soll zum Verständnis beitragen, welchen Einfluss die Ausläufer des Siebengebirges und der Eifel im Laufe der Nacht auf das Kölner Stadtklima an austauscharmen Wetterlagen haben.

Erste Klimauntersuchungen haben in den 1990er Jahren stattgefunden und bereits auf den Einfluss des Rheintalwinds hingewiesen, der sich über das gesamte Kölner Stadtgebiet erstreckt. Mit der aktuellen Datenanalyse wird in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst eine Referenz für zukünftige Stadtklimauntersuchungen geschaffen. Die Ergebnisse zeigen, dass während autochthoner Wetterlagen eine Kanalisierung der Kaltluft an den Messstationen entlang des Rheintals feststellbar ist, die sich vor allem in der zweiten Nachthälfte ausbildet. Diese Grundlagendaten sind insbesondere vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels, mit zunehmenden lang anhaltenden Hitzeperioden und den daraus resultierenden gesundheitlichen Belastungen für die Bewohner*innen der Stadt von hoher Bedeutung. Ein Schwerpunkt liegt auf der Richtungsanalyse aktueller Messdaten.

1 Einleitung

In Kommunen nimmt der Bedarf an stadt- und regional-klimatischen Erkenntnissen im Zuge des Klimawandels zu. Daher werden in kommunalen Planungsprozessen für stadtklimatische Fragestellungen immer häufiger numerische Modelle eingesetzt. Vor allem bei besonders hitzebelasteten

den Strahlungswetterlagen mit hoher Sonneneinstrahlung und geringem Luftaustausch sind Kenntnisse zur nächtlichen Kaltluftbildung und zum Kaltluftabfluss von Bedeutung. In der Regel wird auf der Basis mesoskaliger Klimamodelle die geländebedingte Kaltluftströmung dargestellt.

Dabei unterscheiden sich die einzelnen Modelle in der Abbildung der Kaltluftdynamik von breiten Tälern mit wenig komplexer Topografie, wie sie beispielsweise im Rheintal im Bereich der Kölner Bucht vorhanden ist. Werden diese Modellergebnisse unreflektiert und ohne Validierung anhand von Messdaten verwendet, kann das zu Unplausibilitäten oder gar zu falschen Aussagen führen.

Aus der Literatur [3] [9] ist die Bedeutung der Leitwirkung des Rheintals für bodennahe Windsysteme bei bestimmten Wetterlagen bekannt. Für das Kölner Stadtgebiet wurde dieses Phänomen zwischen 1995 und 1999 in verschiedenen Stadtklimauntersuchungen analysiert und durch Klimauntersuchungen begleitet.

Bislang wurde der Rheintalwind mit einer Zeitreihenanalyse aus den Erkenntnissen von 16 meteorologischen Messstationen [9], sowie durch lokale experimentelle Messungen [2] [5] [15] beschrieben.

Der vorliegende Beitrag greift die bestehenden Untersuchungen für eine einheitliche Bewertung der übergeordneten Windsysteme auf. In einer Zeitreihenanalyse wird für den Zeitraum von 2010 bis 2019 für die Kölner Bucht die Windrichtungsverteilung langjähriger Messreihen von geeigneten meteorologischen Stationen in Strahlungsnächten ausgewertet. Die Stundenauswertungen wurden einheitlich auf MEZ bezogen.

Die dichte Datenlage durch Auswertung von Winddaten im Kölner Raum ermöglicht eine qualifiziertere Aussage über die Windverhältnisse in der Kölner Bucht. Insbesondere mit der Auflösung einiger Stationsdaten in einzelne Nachtstunden nach Sonnenuntergang kann gezeigt werden, wann lokale von regionalen Effekten abgelöst bzw. überlagert werden. Die Ergebnisse werden als Referenz für stadtklimatische Gutachten verstanden und ihre Berücksichtigung ist Voraussetzung für klimaoptimierte Planungen im Untersuchungsgebiet.

In der Fachliteratur wird konzeptionell zwischen verschiedenen Mechanismen unterschieden, die zum Auftreten talparalleler Strömungen führen können [6] [16] [17]. Abbildung 1 zeigt für die mittlere Orientierung der Rheintalachse in der Kölner Bucht schematisch die Windrichtung

im Tal, die sich entsprechend dieser Mechanismen jeweils als Funktion der regionalen Anströmungsrichtung ergibt. Bei windstarken Strahlungswetterlagen dominiert die thermische Kanalisierung durch eine Berg-/Talwindzirkulation. Diese entsteht im Tagesgang durch die auftretenden Temperaturunterschiede längs des Rheintals (Abbildung 1b).

Bei Wetterlagen mit moderater oder starker regionaler Anströmung wird die Strömung durch die Talberandung dynamisch kanalisiert, d. h. in eine Richtung parallel zur Talachse umgelenkt. Nach *Whiteman* und *Doran* [16] wird hierbei zwischen der erzwungenen Kanalisierung (c) und der druckgetriebenen Kanalisierung (d) [16] unterschieden. Untersuchungen von *Bendix* [3] zeigen für den südlichen Bereich der Kölner Bucht das Auftreten von druckgetriebener Kanalisierung. Dabei strömt, entsprechend des großräumigen Luftdruckgradienten in Tallängsrichtung, die Luft im Tal von hohem zu niedrigem Luftdruck. Im Gegensatz hierzu wird bei der erzwungenen Kanalisierung die Luft entsprechend der Tallängskomponente der regionalen Anströmung die Strömung in eine Richtung entlang der Talachse umgelenkt. Untersuchungen zum Einfluss der atmosphärischen Schichtung auf die dynamische Strömungskanalisierung zeigten, dass die druckgetriebene Kanalisierung vor allem bei stabiler Schichtung auftritt [8]. Dies beinhaltet sommerliche Schönwetterlagen, insbesondere in der zweiten Nachthälfte. Die Ermittlung des dominierenden Mechanismus dynamischer Strömungskanalisierung erfordert die Betrachtung der in Abbildung 1c und Abbildung 1d grau markierten Anströmungsrichtungsbereiche, für die erzwungene und druckgetriebene Kanalisierung zu unterschiedlichen Windrichtungen im Rheintal führen.

2 Gebietsbeschreibung

Die Kölner Bucht ist der südlichste Ausläufer des Niederrheinischen Tieflandes und zählt klimatisch zu den Gunsträumen der mittleren Breiten Europas. Das Klima der Kölner Bucht wird, wie im ganzen Westen Deutschlands, stark von der geografischen Nähe zur Nordsee und zum Atlantik und somit vom Golfstrom beeinflusst. Diese Lage sorgt für ein maritim beeinflusstes Klima mit milden Wintern und bis in der jüngeren Vergangenheit gemäßigten Sommern. Im Bereich der Westwinddrift überwiegen regelmäßige Tiefausläufer, die vom Atlantik kommend Deutschland mit entsprechenden Niederschlägen überqueren. Bei weniger häufigen Hochdruckwetterlagen nehmen die Tiefdruckgebiete nördliche oder südliche Zugbahnen, so dass sich dann länger anhaltende, trockene Perioden einstellen können.

Das digitale Höhenmodell beschreibt das Relief des großräumigen Untersuchungsraums. Die Eifel, das Siebengebirge und das Bergische Land zeigen die höchsten Erhebungen von mehr als 680 m ü.N.N. Im Mittel stellt das DGM für die Kölner Bucht eine Höhe von ca. 40 m ü.N.N dar. Linksrheinisch erstreckt sich der Höhenzug der Ville mit einer Höhe von maximal 205 m ü.N.N entlang des Rheintals, welcher in Richtung Norden ausläuft.

3 Methodik

Um die bodennahen Windverhältnisse in der Kölner Bucht abzubilden, wurden Daten aus verschiedenen Quellen und Messkampagnen ausgewertet. Dabei wurden die Stationen anhand ihrer Lage entlang des Rheintals, des Messzeitraums und der Datenverfügbarkeit ausgewählt.



Mario Langen,
Diplom Physiker,
Diplom Umweltwissenschaften,
Umwelt- und Verbraucherschutzamt der Stadt Köln



Stefan Ginzel,
M. Sc. Georesourcenmanagement,
Umwelt- und Verbraucherschutzamt der Stadt Köln,
Luftreinhaltung und Schadstoffmodellierungen



Dr. Meinolf Koßmann,
Diplom-Meteorologe,
Deutscher Wetterdienst in Offenbach am Main, Berater zu Fragen der Stadt- und Geländeklimatologie

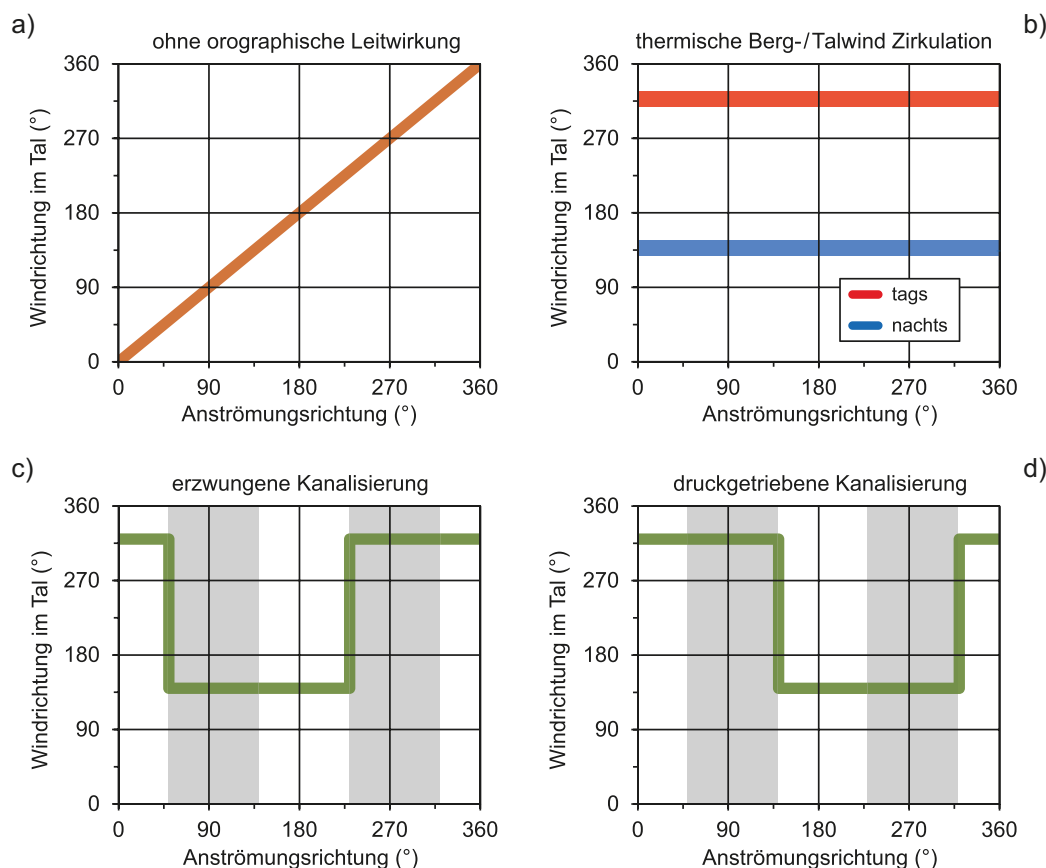


Abb. 1: Schematische Darstellung der Windrichtung im Tal als Funktion der Windrichtung der regionalen Anströmung für ein von Südost (140°) nach Nordwest (320°) orientiertes Tal. a) ohne Kanalisierung, b) bei Dominanz eines thermisch angetriebenen Berg-/Talwindsystems, c) bei erzwungener Kanalisierung, und d) bei druckgetriebener Kanalisierung. Die grau hinterlegten Bereiche in c) und d) markieren die Anströmungsrichtungen für die erzwungene und druckgetriebene Kanalisierung zu unterschiedlichen Windrichtungen im Rheintal führen.

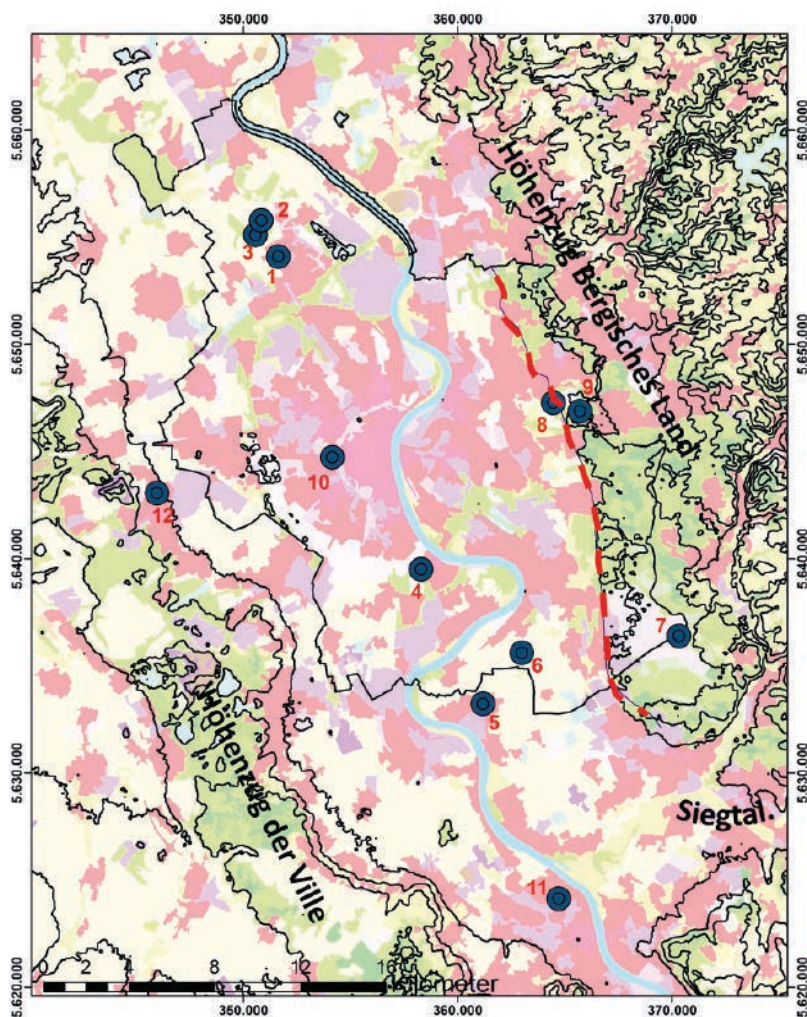


Abb. 2: Lage der untersuchten Messstationen im Kontext der Landnutzung. Die Stationen werden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, dem Deutschen Wetterdienst und der RheinEnergie AG betrieben. Im rechtsrheinischen ist der Mauspfad eingetragen (rote gestrichelte Linie). Dieser beschreibt geomorphologisch den Übergang der Niederterrasse zur Mittelterrasse des Rheins, Kartengrundlage ist Corine Land Cover 2018

3.1 Herkunft der Daten

Die Daten der Stationen des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD) werden öffentlich auf den Internetseiten der Einrichtungen zur Verfügung gestellt [4] [11]. Die Messstationen des LANUV sind Teil des Luftqualitätsüberwachungssystems (LUQS) und dienen in erster Linie der Aufzeichnung von Luftschadstoffen und der Bestimmung von Luftimmissionen. Zusätzlich konnten auf Anfrage Daten durch die RheinEnergie AG und das FZ Jülich bereitgestellt werden [7] [13]. Darüber hinaus wurde auf Daten aus dem Projekt „Klimawandelgerechte Metropole Köln – LANUV-Fachbericht 50“ (Köln21) zurückgegriffen [10]. Das Projekt wurde in Kooperation zwischen dem Umwelt- und Verbraucherschutzamt Köln, dem DWD und LANUV durchgeführt und beinhaltete eine zeitlich begrenzte Messkampagne zum Stadtklima auf Kölner Stadtgebiet, welche zwischen 2010 und 2014 durchgeführt wurde.

In Abbildung 2 ist die Lage der betrachteten Stationen vor dem Hintergrund der Landnutzung dargestellt. Die Stationen Düsseldorf (13), Essen-Bredeney (14) und Jülich (15) liegen außerhalb des Kartenausschnitts. Die Stationen befinden sich vorwiegend im unbebauten Außenbereich. Nur die Station Innerer Grüngürtel (10) wurde zentrumsnah im Rahmen des Projektes Köln_21 vom DWD betrieben.

3.2 Beschreibung der Stationen

Die Stationen unterscheiden sich im Hinblick auf die betrachtete Messdauer, die Messintervalle, ihre Geländehöhe über N.N., die Anemometerhöhe in der die Windrichtung gemessen wird und den lokalen Gegebenheiten vor Ort, die durch Topographie, Baumbestand, Bebauung sowie Nutzung der umliegenden Flächen bestimmt werden. Einen Überblick über die Stationseigenschaften gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Übersicht über die ausgewerteten Messstationen, geordnet nach der Gesamthöhe, die sich aus der Höhe über Normalnull und der Windmesshöhe zusammensetzt. Die Daten liegen in Messintervallen zwischen 10 Minuten und 12 Stunden vor. Die Messstationen in Jülich (Wetterturm) und Essen-Bredeney (Radio-sonde) beschreiben das übergeordnete Windsystem

Nr.	Name	Betreiber	Messintervall	Zeitraum	Höhe über NN [m]	Windmesshöhe [m]	Gesamthöhe [m]
1	Köln-Chorweiler	LANUV	1 Stunde	01/2010-12/2019	46	19	65
2	Kreuzfeld	DWD (Köln 21)	10 Minuten	01/2010-01/2012	46	10	56
3	Weiler	RheinEnergie AG	1 Stunde	01/2010-12/2019	50	40	90
4	Köln-Rodenkirchen	LANUV	1 Stunde	01/2010-12/2019	50	19	69
5	Niederkassel	LANUV	1 Stunde	12/1986-12/1996	49	18	67
6	Zündorf	RheinEnergie AG	1 Stunde	01/2009-12/2020	54	10	64
7	Köln/Bonn Flughafen	DWD	1 Stunde	01/2010-12/2019	92	10	102
8	Dellbrück	DWD (Köln 21)	10 Minuten	04/2010-12/2014	52	10	62
9	Refrath	RheinEnergie AG	1 Stunde	01/2011-12/2020	66	25	91
10	Innerer Grüngürtel	DWD (Köln 21)	10 Minuten	04/2010-12/2014	49	10	59
11	Bonn-Auerberg	LANUV	1 Stunde	07/2016-12/2019	60	21	81
12	Frechen	LANUV	1 Stunde	12/1986-12/1996	68	18	86
13	Düsseldorf	DWD	1 Stunde	01/2010-12/2020	36	10	46
14	Essen-Bredeney	DWD	12 Stunden	01/2010-12/2019	150	1500	1650
15	Jülich	FZ Jülich	1 Stunde	01/2010-12/2019	91	120	211

Teilweise handelt es sich um Stationen die schon seit Jahrzehnten Daten aufzeichnen und deren Messungen bis heute kontinuierlich fortgesetzt wurden. In diesen Fällen wurden die Messdaten von mindestens zehn abgeschlossenen Messjahren aus dem vergangenen Jahrzehnt ausgewertet. Für die Stationen Frechen und Niederkassel liegen lediglich historische Daten vor, da die Stationen nicht mehr betrieben werden. Die Station Frechen lag ebenfalls in der Kölner Bucht am Rand zur Ville. Die Station Niederkassel befand sich westlich der Ortslage Ranzel auf landwirtschaftlich genutzter Fläche.

Die Daten des Wasserturms des Forschungszentrums Jülich und der Radiosonde des Deutschen Wetterdienstes aus Essen wurden genutzt, um das überlagernde Windsystem in größeren Höhen darzustellen und diese mit den bodennahen Daten zu vergleichen.

Die Wetterstation Essen liegt im Stadtteil Bredeney auf einer Höhe von 150 Metern ü.N.N. und liefert Daten für die Radiosondierung durch Vertikalsondierung bis in 1500 Metern. Die Wetterstation in Jülich steht auf einer Lichtung im Stettener Forst und erfasst meteorologische Daten in verschiedenen Höhen. In der Analyse wurden die Daten in einer Messhöhe von 120 Metern als gemittelte Stundenwerte verwendet.

Die Station Köln-Bonn Flughafen ist eine vom Deutschen Wetterdienst langjährig betriebene Messstation. Sie befindet sich im östlichen Bereich des Flughafens Köln/Bonn. In östlicher Richtung grenzt die Wahner Heide mit vereinzeltem Baumbestand an.

3.3 Vorgehensweise

Zunächst wurden ganzjährige Windrichtungshäufigkeitsverteilungen erstellt, welche einen ungefilterten Gesamteindruck der vorherrschenden Windrichtungen geben.

Da lokale und bodennahe Windsysteme eine besondere wichtige stadtklimatische Funktion bei austauscharmen Wetterlagen haben, wurden die Daten nach den Kriterien des DWD für Strahlungswetterlagen gefiltert. Die Kriterien des DWD für austauscharme Strahlungswetterlagen sind erfüllt, wenn der Sonnenelevationswinkel 5 Grad unter dem Horizont liegt, die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund kleiner 2,5 m/s beträgt und der Bedeckungsgrad nicht größer als $\frac{4}{8}$ ist. Die Wetterstation des DWD Köln-Bonn am Flughafen (Köln/Bonn Flughafen) wurde als Referenzstation zur Bestimmung der Strahlungswetterlagen in der Kölner Bucht durch den DWD ausgewählt. Die Daten der Tage, an denen Strahlungswetterlagen vorlagen wurden für die weiteren Auswertungen an den anderen Stationen durch den DWD übermittelt.

Bei der Auswertung der Daten wurde die Veränderung der Windrichtung während der Nacht betrachtet, da sich erst nach Sonnenuntergang bodennahe Kaltluftströme mit einer wichtigen stadtklimatischen Kühlfunktion ausbilden. Ein besonderes Augenmerk wurde hier auf die Windrichtungen um 04:00 Uhr MEZ gelegt, da sich die Abkühlung um diese Uhrzeit ihrem Maximum annähert und die Kaltluftströme um 04:00 Uhr MEZ als aussagekräftiger Indikator bei stadtklimatischen Modellierungen genutzt werden. Dabei wurden stündliche Zeitreihen angelegt.

An den Stationen Köln-Chorweiler, Köln-Rodenkirchen, Niederkassel und Köln/Bonn Flughafen wurden die Winddaten während einer Strahlungsnacht zudem stündlich ausgewertet. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, wann im Laufe der Nachtstunden bodennah das Auftreten des Rheintalwindes mit einer südöstlichen Windrichtung erkennbar ist.

Zudem wurde zur Klärung der Fragestellung, ob die an den Messstationen angetroffenen bodennahen gravitati-



Abb. 3: Die Lage der Station Chorweiler (1) befindet sich im städtischen Vorort auf einem Schulgrundstück und ist umgeben von aufgelockerter Bebauung. Von der Klassifizierung ist die Station als städtische Hintergrundstation eingestuft. (Stadt Köln)



Abb. 4: Standort der Station Innerer Grüngürtel (10); die Station befindet sich auf dem Mittelstreifen einer sechsspurigen Innerortstraße. (DWD)

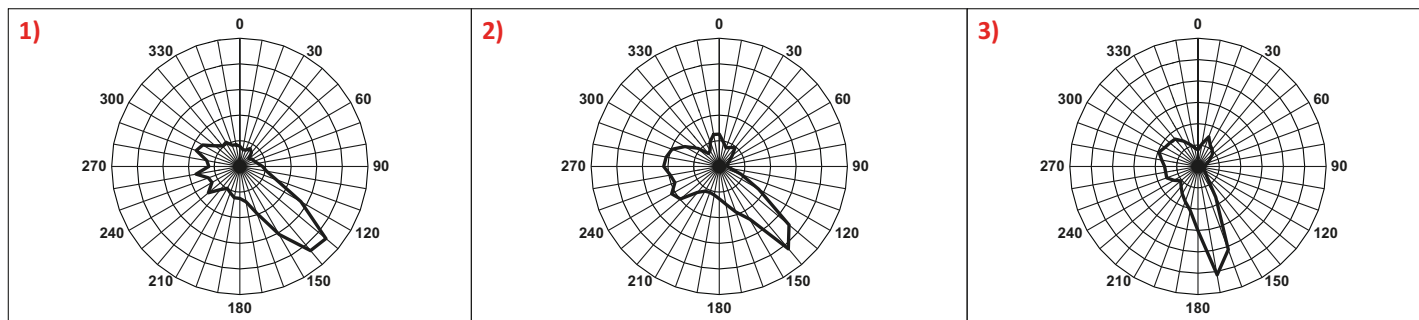


Abb. 5: Messzeitraum 2010–2019; dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, Chorweiler (1) $n = 104.244$, Kreuzfeld (2) $n = 131.156$, Weiler (3) $n = 82.218$ Datensätze.

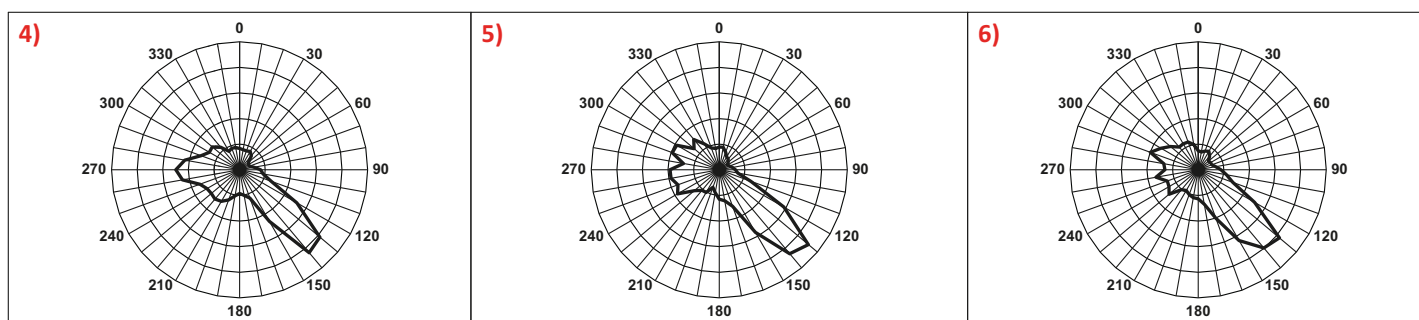


Abb. 6: Dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, Rodenkirchen (4) $n = 86.591$, Niederkassel (5) $n = 73.799$, Zündorf (6) $n = 101.690$ Datensätze

ven, thermischen lokalen Windsysteme durch druckbetriebene überregionale Höhenwindssysteme beeinflusst werden, ein Vergleich der jeweiligen Verteilungsdichten der Windrichtungen in verschiedenen Höhen über Grund vorgenommen.

Dieser Vergleich der Verteilungsdichten wurde zwischen den bodennahen Wetterstationen Köln-Rodenkirchen, Zündorf, Köln/Bonn Flughafen, Köln-Chorweiler und der durch den Höhenwind bestimmten Wetterstation Essen-Bredeney für die Strahlungsnächte um 04:00 Uhr MEZ durchgeführt.

Die statistischen Methoden der Kerndichte-Schätzung und der Streudiagramme wurden für die Bestimmung der Verteilungsdichten angewendet.

Für die Zeitreihenanalysen und Kerndichte-Schätzungen wurde die Software QGIS, MS Excel und R verwendet.

4 Ergebnisse

4.1 Windrichtungsverteilung im Gesamtzeitraum

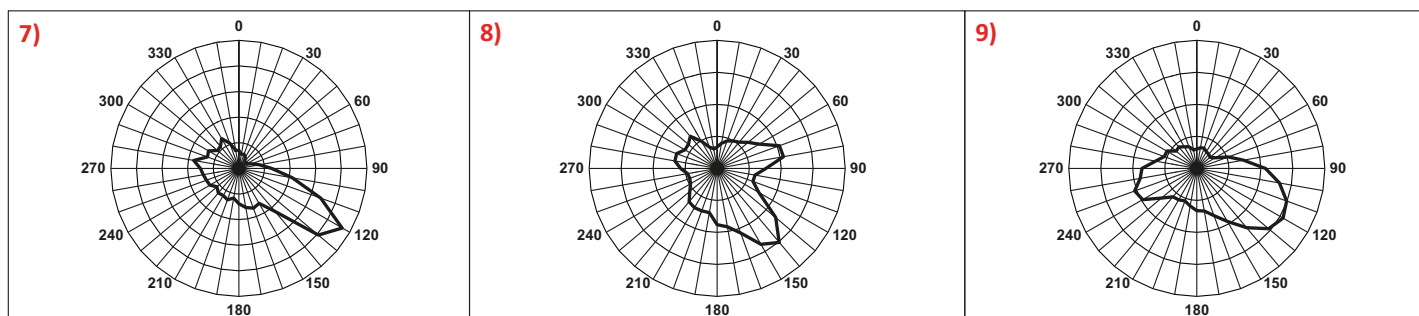
Im Folgenden sind die Daten der Windrichtung für den gesamten ausgewerteten Messzeitraum an den jeweiligen Stationen ausgewertet und als Windrosen dargestellt.

Die Messstationen Chorweiler (1), Kreuzfeld (2) und Weiler (3) liegen im Norden des Untersuchungsgebietes. Die Windrosen sind für den Zeitraum 2010–2019 ausgewertet.

Für die Stationen im Kölner Norden (Chorweiler, Kreuzfeld und Weiler) stellt sich für den jeweiligen Gesamtzeitraum eine Hauptwindrichtung aus Ost- bzw. Südost ein (Abbildung 5). Die Maxima liegen zwischen 130–170 Grad. Vor allem an der Station Chorweiler ist eine weniger ausgeprägte westliche Windrichtung als weitere Hauptwindrichtung erkennbar. Die Winddaten an der Station Weiler werden im Unterschied zu den Stationen Chorweiler und Kreuzfeld in einer Höhe von 40 Metern aufgenommen. Dadurch erklärt sich die geringfügige Abweichung der Windrichtung.

Im Süden des Untersuchungsgebiets liegen die Messstationen Rodenkirchen (4), Niederkassel (5) und Zündorf (6). Für die Stationen liegen Daten zu unterschiedlichen Messzeiträumen vor: für die Station Rodenkirchen liegen Daten in den Messzeitraum 2010–2019 vor, für die Station Niederkassel in dem Messzeitraum 1986–1996 und für die Station Zündorf wird der Messzeitraum 2010–2020 ausgewertet (Abbildung 6).

Abb. 7: dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, Köln-Bonn Flughafen (7) $n = 87.648$, Dellbrück (8) $n = 231.214$, Refrath (9) $n = 84.994$ Datensätze



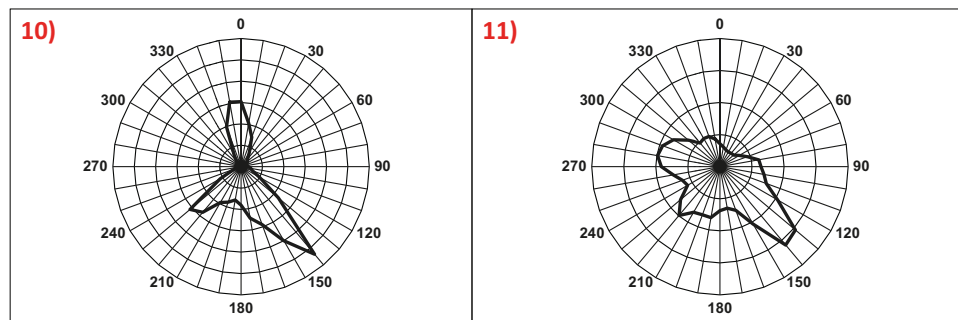


Abb. 8: Dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, Innerer Grüngürtel (10) n=239.870, Bonn-Auerberg (11) n=81.729 Datensätze

Abb. 9: Dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, Frechen (12) n=81060, Düsseldorf (13) n=87.648 Datensätze

Im Kölner Süden, an den Stationen Rodenkirchen und Zündorf auf Kölner Stadtgebiet und der Station Niederkassel, ist das Maximum aus südöstlicher Richtung bei 130–140 Grad mit einer Häufigkeit von 16,5 % ebenfalls sehr ausgeprägt. Die westliche Richtung kommt mit 5 % der Gesamtjahresstunden am deutlichsten an der Station Rodenkirchen vor.

An der naturräumlichen Grenze des Mauspfades im Osten des Untersuchungsgebiets liegen die Stationen Köln/Bonn Flughafen (7), Dellbrück (8) und Refrath (9). Die Daten werden für die folgenden Messzeiträume ausgewertet: an der Station Köln/Bonn Flughafen wird der Messzeitraum 2010–2019 betrachtet, in Dellbrück der Messzeitraum 2010–2014 und in Refrath der Messzeitraum 2011–2020 (Abbildung 7).

Die rechtsrheinischen Messstationen Köln/Bonn Flughafen, Dellbrück und Refrath liegen östlich des Mauspfades. Die Stationen Dellbrück und Refrath zeichnen sich in den Gesamtjahresstunden durch ein breiteres Maximum aus östlicher bzw. südöstlicher Windrichtung aus. Die Häufigkeiten weisen maximal Größenordnungen von 6 % auf. Am deutlichsten ausgeprägt ist die südöstliche Windrichtung an der DWD-Station Köln/Bonn Flughafen mit einer Häufigkeit von 9 % bei 120 Grad und 8 % bei 130 Grad. Die westliche Windrichtung erreicht im Gesamtzeitraum an der Station Köln/Bonn Flughafen eine Häufigkeit von 3,5 % bei 280 Grad und an der Station Refrath 4 % bei 280 Grad.

Die innerstädtische Station Innerer Grüngürtel (10) stand während des Messzeitraums 2010 bis 2014 auf einem breiten Grünstreifen einer sechsspurigen Straße in Höhe des Aacher Weiher. Diese hat in der Auswertung der Gesamtjahresstunden drei Maxima: 10,7 % bei 140 Grad, 6 % bei 230 Grad und 12 % bei Nordwind (350 bis 0 Grad). Die Station Bonn-Auerberg (11) hat im Messzeitraum 2010–2019 ein Hauptmaximum in südöstliche Richtung. Bei Windrichtungen von 130 bis 140 Grad sind 12 % der Windrichtungshäufigkeiten erfasst. Ein weiteres Maximum liegt bei 220 Grad mit einer Häufigkeit von 4 %. Ein breiteres Maximum ist bei West-nordwest-Richtung erkennbar (Abbildung 8).

Die Station Frechen (12) liegt am westlichen Rand der Kölner Bucht. Die Daten des gesamten Messzeitraums zeigen deutlich den Einfluss der Ville in westlicher Richtung und eine zweite, weniger ausgeprägte Hauptwindrichtung aus südöstlicher Richtung (Abbildung 9).

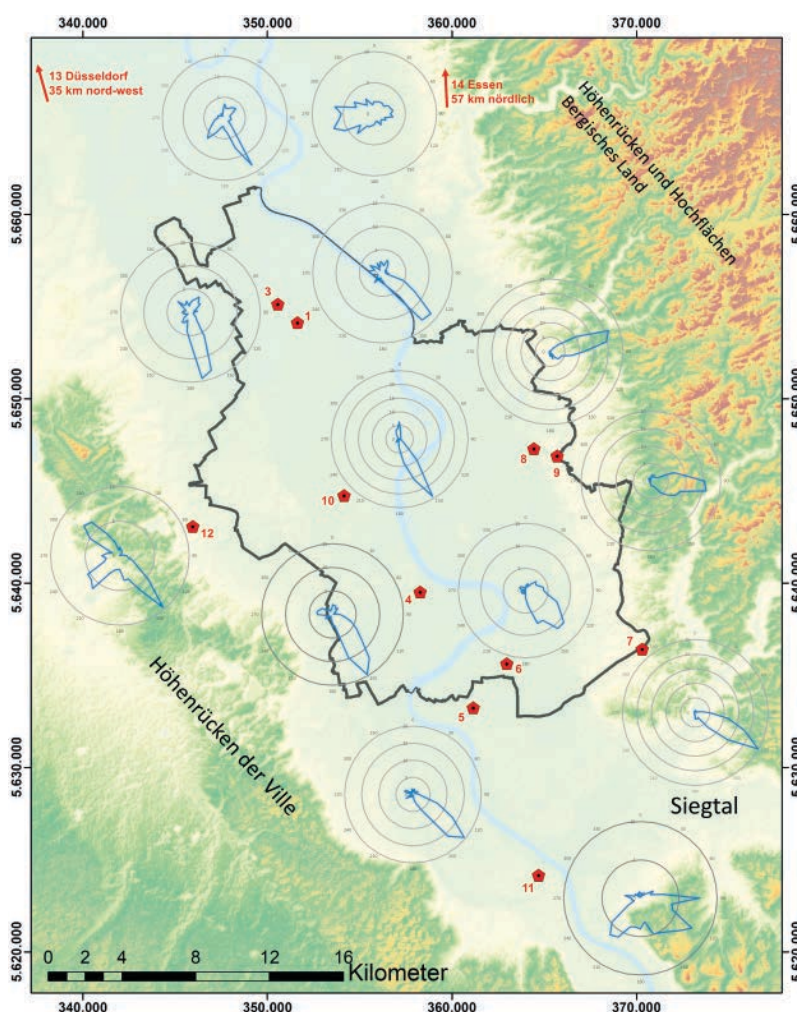
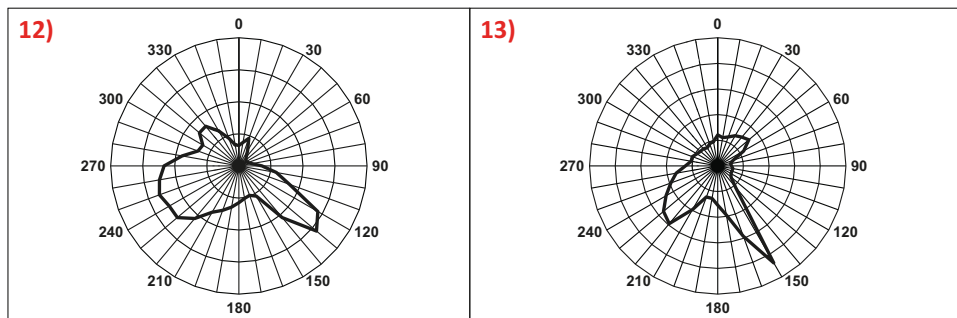


Abb. 10: Die Windrosen 1 sowie 3 bis 14 zeigen die Windrichtungsverteilungen um 04:00 Uhr MEZ an Tagen mit Strahlungswetterlagen. Die Windrichtung wird in unterschiedlichen Höhen gemessen. Der ausgewertete Messzeitraum, das Messintervall und die Größe des Datensatzes (n) sind in Tabelle 2 angegeben. Die DWD Station in Essen-Bredeney (14) liegt etwa 50 km nord-westlich von Köln außerhalb der Köln-Bonner Bucht und zeigt die Windrichtung um 01:00 Uhr MEZ in einer Höhe von 1.500 Metern.

An der Station in Düsseldorf (13) ist im Messzeitraum 2010–2020 die Hauptwindrichtung bei 150 bis 160 Grad in 11 % der Gesamtjahresstunden. Ein weiteres Maximum ist in südwestlicher Richtung erkennbar. In nordöstlicher Richtung zeigt sich eine schwach ausgeprägte Windrichtungshäufigkeit (Abbildung 9).

4.2 Windrichtungsverteilung in Strahlungsnächten

Die Windrichtungsverteilung in den Strahlungsnächten an den relevanten Stationen ist in Abbildung 10 dargestellt. Auf die Darstellung der Windrose der Station Kreuzfeld (2) wurde wegen des kurzen Messzeitraums und der räumlichen Nähe zu den Stationen Chorweiler und Weiler verzichtet.

Alle Stationen haben ein deutliches Maximum in südlicher bzw. südöstlicher Windrichtung. An den Stationen Chorweiler und Kreuzfeld liegt das Maximum bei 130 und 140 Grad. Die Station Weiler hat ein Maximum bei 160 bis 170 Grad. Die Häufigkeiten liegen zwischen 18 und 27 %.

Die Stationen im Süden Rodenkirchen und Niederkassel weisen bei Strahlungsnächten ein deutliches Maximum in südöstlicher Richtung bei 120 bis 160 Grad auf. An der Station Niederkassel liegen die Häufigkeiten der Windrichtungsklassen zwischen 13 und 20 %, und sind ausgeprägter als an der Station Rodenkirchen. Diese weist Häufigkeiten von 12 bis 15 % bei den Windrichtungen 140 und 150 Grad auf. Das Maximum an der Station Zündorf liegt bei den Windrichtungsklassen 130 und 140 Grad jeweils bei 11 %.

An den Stationen am Rand des Bergischen Höhenrands stellt sich während der Strahlungsnächte ein östliches Windrichtungsmaximum ein. Die Station Köln/Bonn Flughafen hat an Tagen mit Strahlungswetterlagen ein Maximum zwischen 110 bis 130 Grad, wobei die Windrichtungen

insgesamt 57 % der gesamten Anteile ausmacht. An der Station Dellbrück liegen die Häufigkeiten der Windrichtungsklassen zwischen 70 bis 80 Grad bei 41 % der gesamten Windrichtungen.

An der innerstädtischen Station Innerer Grüngürtel ist ein ausgeprägtes Maximum bei Windrichtungen von 150 bis 160 Grad erkennbar (Abbildung 11). Der Häufigkeitsanteil liegt bei 40 % der Gesamtanteile. In Nordrichtung ist mit 10 % eine kleinere Windrichtungshäufigkeit erkennbar.

Die Station Bonn-Auerberg (11) zeigt bei Strahlungswetterlagen drei Hauptwindrichtungen, die in östliche, südöstliche und südwestliche Richtung weisen. Diese sind je Windrichtung mit maximal 8 % nicht deutlich ausgeprägt.

An der nördlichsten Station in Düsseldorf (13) ist an Tagen mit Strahlungswetterlagen bodennah eine Häufigkeit von 11 % der Windrichtung von 150 Grad zuzuschreiben. Eine weitere Dominanz bildet sich in nordöstliche (27 %) und östliche (9 %) Windrichtung aus.

Aufgrund der Lage im innerstädtischen, bebauten Bereich findet eine Kanalisierung entlang der Hauptstraße statt. Die eindeutige südöstliche Anströmung entspricht der Ausrichtung der Inneren Kanalstraße

4.3 Zeitanalyse an ausgewählten Stationen in der Kölner Bucht

An ausgewählten Stationen in der Kölner Bucht wurde während der Strahlungswetterlagen die stündliche Windrichtungsverteilung ausgewertet (Abb. 12).

Während in den ersten Nachtstunden noch ein ungerichtetes Windfeld erkennbar ist, bildet sich an allen Stationen im nächtlichen Verlauf eine südöstliche Komponente aus. Ab 01:00 Uhr nimmt die Windrichtungshäufigkeit aus den Windrichtungsklassen 110 bis 150 Grad erkennbar zu. An der Station Köln/Bonn Flughafen ist zu Beginn der Nacht um 22:00 Uhr bereits eine südöstliche Windrichtungshäufigkeit vorhanden. Diese verstärkt sich im Laufe der Nacht und erreicht um 04:00 Uhr ein Maximum. An den Stationen Chorweiler, Rodenkirchen und Niederkassel ist um 06:00 Uhr die maximale Ausprägung der südöstlichen Anströmung erreicht.

Tab. 2: Stationen aus Abbildung 10, Angaben zum Messzeitraum, Messintervall und Größe des Datensatzes (n)

Nr.	Name	Stationsdaten
1	Chorweiler	2010 bis 2019 (10 m; 1 h; n = 621)
3	Weiler	2010 bis 2019 (40 m; 1 h; n = 507)
4	Rodenkirchen	2010 bis 2019 (19 m; 1 h; n = 621)
5	Niederkassel	1986 bis 1996 (18 m; 1 h; n = 526)
6	Zündorf	2009 bis 2020 (10 m; 1 h; n = 614)
7	Köln/Bonn Flughafen	2010 bis 2019 (10 m; 1 h; n = 634)
8	Dellbrück	2010 bis 2014 (10 m; 1 h; n = 301)
9	Refrath	2011 bis 2020 (25 m; 1 h; n = 548)
10	Innerer Grüngürtel	2010 bis 2014 (10 m; 10 Min.; n = 2.095)
11	Bonn-Auerberg	2010 bis 2019 (21 m; 1 h; n = 581)
12	Frechen	1986 bis 1996 (19 m; 1 h; n = 506)
13	Düsseldorf	2010 bis 2019 (10 m; 1 h; n = 634)
14	Essen-Bredeney	2010 bis 2019 (1500 m; 850 hPa; 12 h; n = 621)

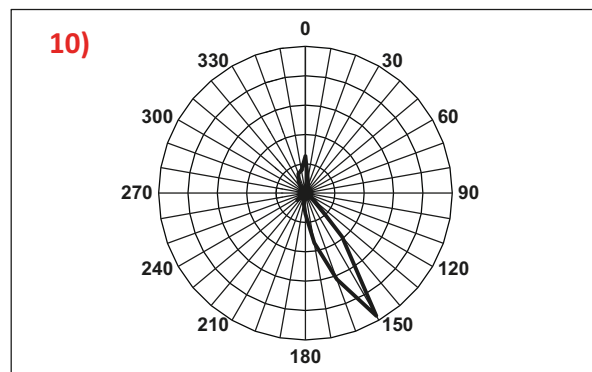


Abb. 11: Station Innerer Grüngürtel (10); Auswertung von Tagen mit Strahlungswetterlagen; dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, n = 2.095 Datensätze

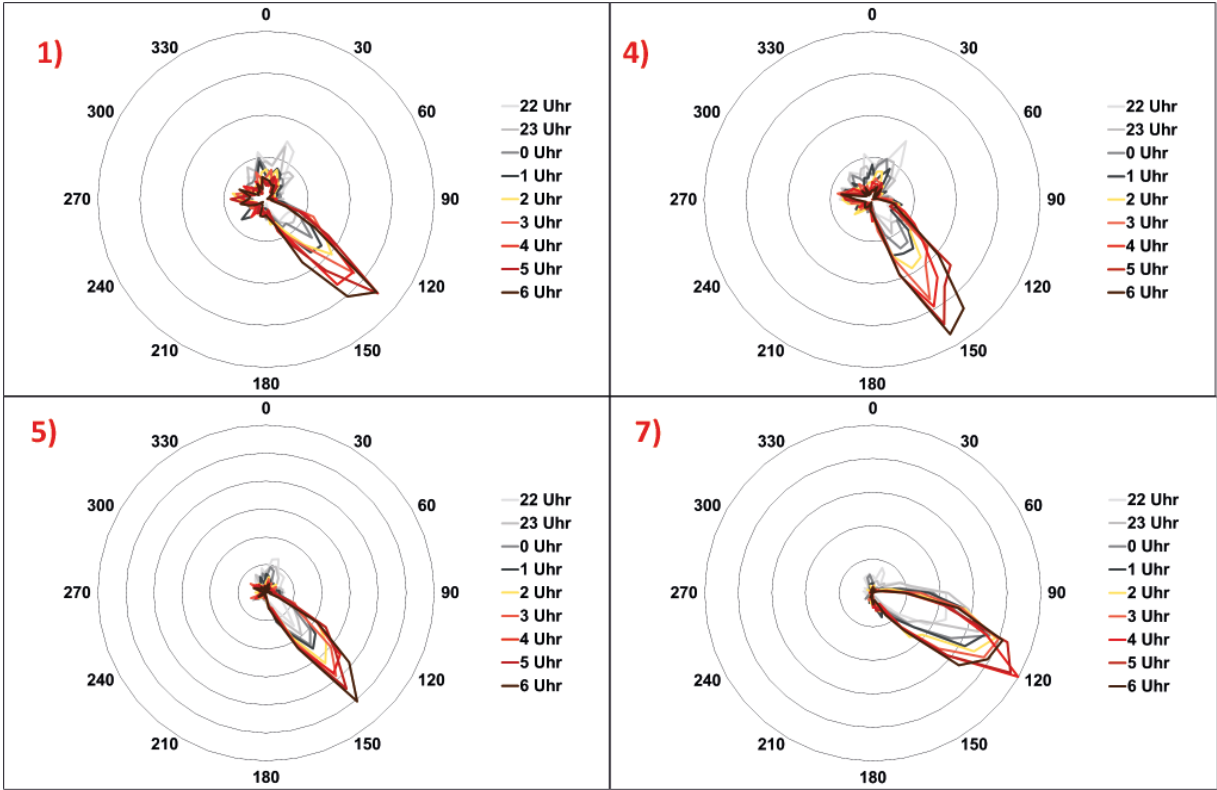


Abb. 12: Häufigkeit der Windrichtungsverteilung in stündlicher Auflösung an den Stationen Chorweiler (1), Rodenkirchen (4), Niederkassel (5) und Köln/Bonn Flughafen (7); dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen, Angabe der stündlichen Häufigkeitsverteilung von 22 bis 6 Uhr MEZ

4.4 Winddaten an Höhenstationen

Für einen Vergleich mit den Winddaten von Höhenwindstationen liegen für den Zeitraum 2010 bis 2019 die Winddaten der vom Deutschen Wetterdienst betriebenen Radiosonde in Essen-Bredeney (14) und des vom Forschungszentrum Jülich (15) betriebenen Wetterturms vor (Abb. 13).

Die Windrosen der Höhenstationen zeigen in der Auswertung der Gesamtjahresstunden eine ausgeprägte West-/Südwestwindrichtung. Auf die Windrichtungen im Sektor zwischen 230 bis 260 Grad entfallen an der Radiosonde Essen-Bredeney Häufigkeiten von 29 %. Der Wetterturm Jülich weist in dem Zeitraum zwei Hauptströmungen auf. Eine südwestliche Anströmung (230 bis 260 Grad) tritt in 26 % der Jahresstunden auf, während auf die südöstliche Anströmung bei 110 bis 120 Grad 9 % der Windrichtungsanteile kommen.

An Strahlungsnächten sind an der Radiosonde Essen-Bredeney Westwinde aus den Sektoren 250 bis 280 Grad mit einem

Anteil von 24 % erkennbar (Abb. 14). Die übrigen Windrichtungsanteile verteilen sich gleichmäßig auf alle Windrichtungen.

Am Wetterturm in Jülich sind mehrere Spitzen erkennbar (Abb. 14). Die südöstliche Windrichtung in den Sektoren 100 bis 130 Grad tritt mit einer Häufigkeit von 22,5 % auf, die südwestliche Anströmung (230 bis 260 Grad) tritt an 18 % der Jahresstunden auf. In nordwestlicher Richtung (280 bis 310 Grad) ist eine weitere Häufigkeit von 11 % vorhanden. Dies zeigt, dass die Messungen in Jülich in einer Höhe erfolgen, die von der regionalen und lokalen Topographie beeinflusst wird, und nicht für die Charakterisierung der übergeordneten Anströmung geeignet sind.

4.5 Korrelation der bodennahen Winddaten mit den Höhendaten

Zur Klärung der Frage, ob eine Beeinflussung der lokalen bodennahen Windsysteme durch die überregionalen Höhenwindssysteme vorliegt, wurden vier lokale Wetterstationen mit der Radiosondenstation Essen-Bredeney vergli-

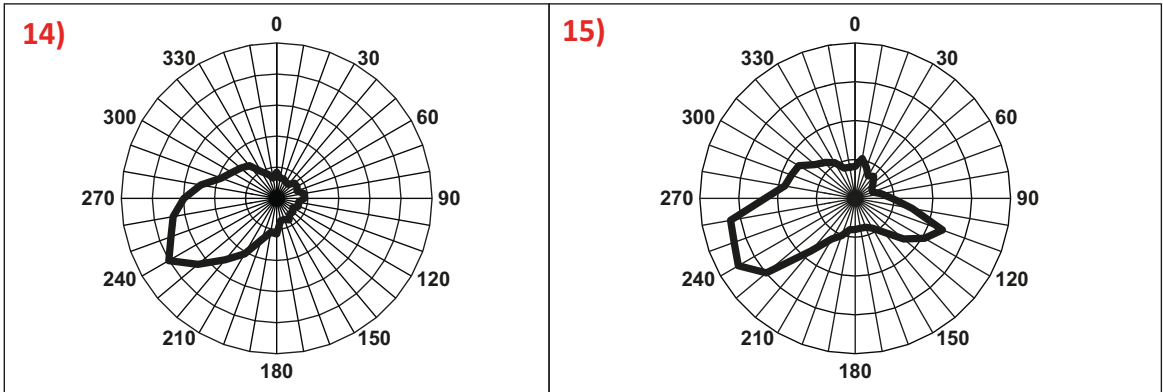
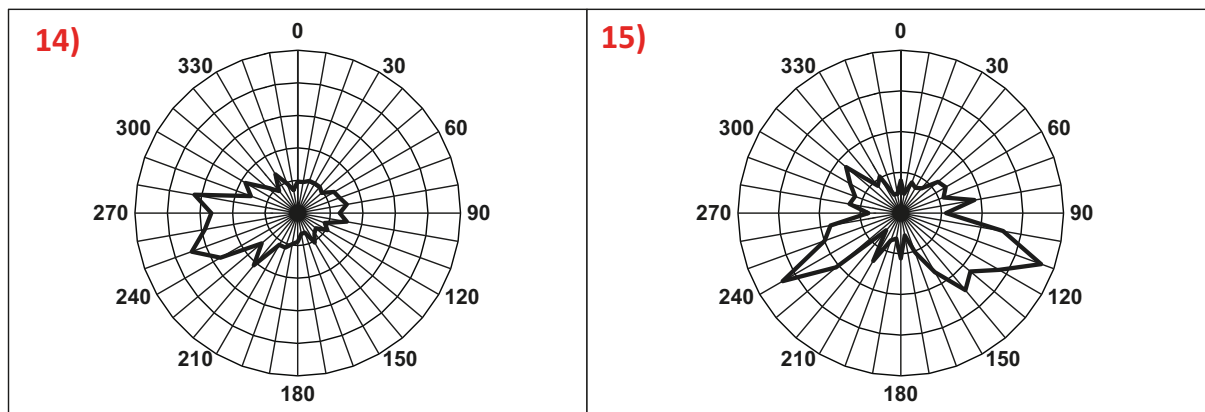


Abb. 13: links Station Essen-Bredeney (14), Messzeitraum 2010–2019 für 7.338 Messwerte, 850 hPa (~ 1.500 Meter über Grund); rechts Station Jülich (15), Messzeitraum 2010–2019, Höhe 120 Meter über Grund; 87.063 Messwerte; dargestellt ist die Windrichtung in 10°-Sektoren und die prozentuale Häufigkeit in 2%-Intervallen

Abb. 14: links Station Essen-Bredene-
ney (14) während Strahlungswetterla-
gen, Messzeitraum 2010–2019 für 621
Messwerte, 850 hPa
(~ 1.500 Meter
über Grund); rechts
Station Jülich (15)
während Strah-
lungswetterlagen;
Messzeitraum
2010–2019, Höhe
120 Meter über
Grund; 627 Daten-
sätze; dargestellt
ist die Windrichtung
in 10°-Sektoren
und die prozentu-
ale Häufigkeit in
2 %-Intervallen



chen. Die Windmessung der operationellen DWD Radiosonden-
aufstiege in Essen-Bredene-ney erfasst in 1500 m über N.N.
(Druckniveau 850 hPa) die großräumige Anströmung der
Kölner Bucht und eignet sich daher für den Vergleich mit den
Bodenwindmessungen. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, ob
in windschwachen Strahlungsnächten der thermisch ange-
triebene Bergwind durch eine dynamische Umlenkung der
großräumigen Anströmung verstärkt wird. Die Essener Ra-
diosondenstation wurde bereits in anderen Veröffentlichun-
gen zur Strömungskanalisation im Raum Bonn heran-
gezogen [3].

In den Abbildungen 15, 16 und 17 sind die Verteilungs-
dichten der Windrichtungskorrelationen für Strahlung-
snächte dargestellt. Hierbei sind bei jeder Abbildung auf der
x-Achse die Höhenwindrichtungen der Wetterstation Essen-
Bredene-ney (14) aus den 01:00 MEZ Radiosondierungen und
auf der y-Achse die 04:00 MEZ Windrichtungen der jeweili-

gen lokalen Wetterstation aufgetragen. An der Station Chor-
weiler (Abb. 15 b) wurde zusätzlich schematisch die druck-
getriebene Kanalisierung aus Abbildung 1d eingetragen
(rote Linie). Die Verteilung der nächtlichen Windrichtungs-
häufigkeiten an der Station Chorweiler in Abhängigkeit der
Höhenwindrichtung lassen bei austauscharmen Wetterla-
gen ein Häufigkeitsmaximum im Bereich der druckgetriebe-
nen Kanalisierung erkennen.

Die in den Abbildungen 15 a) und b) betrachteten Wetter-
stationen befinden sich im linksrheinischen Stadtgebiet. Es
ist in beiden Abbildungen deutlich ein Verteilungsdichte-
maximum außerhalb der Raumdiagonalen zu erkennen. Für
die bodennahen Windrichtungen (y-Achse) der lokalen Wet-
terstationen liegt das Verteilungsdichtemaximum zwischen
120 bis 150 Grad aus südöstlicher Richtung. Die Höhenwin-
drichtung der Wetterstation Essen-Bredene-ney (x-Achse) hin-

Abb. 15: Darstellung der Verteilungs-
dichten der Stationen a) Rodenkirchen (4) und b) Chorweiler
(1) als bodennahe Station mit der
Station Essen-Bredene-ney (14) in
850 hPa Höhengniveau; Windrich-
tungsverteilung für den Zeitraum
04:00 Uhr während Strahlung-
wetterlagen im Messzeitraum
2010–2020; der rote Verlauf in b)
bildet schematisch die druckge-
triebene Kanalisierung im Rheintal
ab (vgl. Abb. 1)

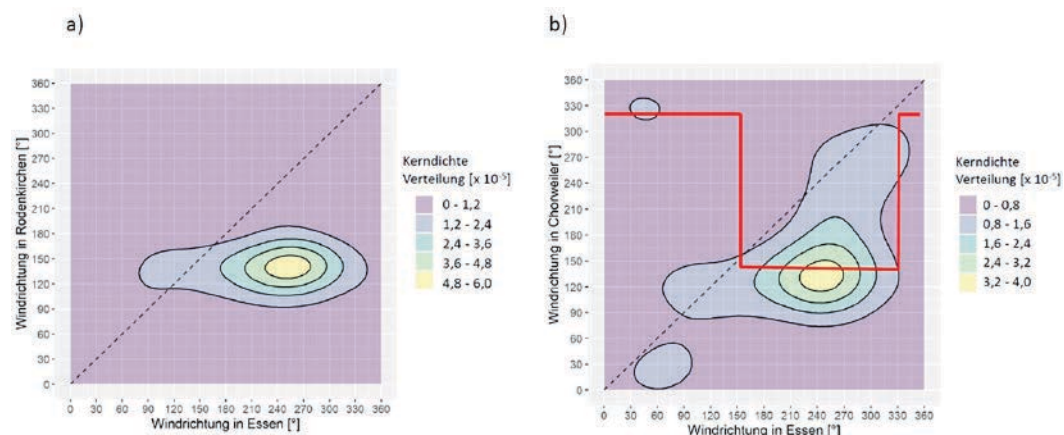
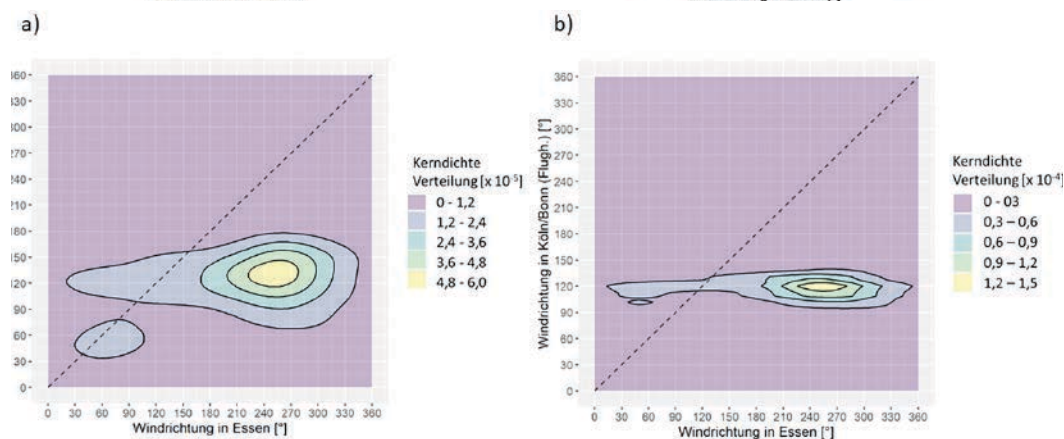


Abb. 16: Darstellung der Verteilungs-
dichten der Stationen a) Zündorf (6) und b) Köln/Bonn
Flughafen (7) als bodennahe Stati-
on mit der Station Essen-Bredene-
ney (14) in 850 hPa Höhengniveau;
Windrichtungsverteilung für den
Zeitraum 04:00 Uhr während
Strahlungswetterlagen im Mess-
zeitraum 2010–2020



gegen hat ein Verteilungsdichtemaximum zwischen 230 bis 270 Grad aus südwestlicher bis westlicher Richtung.

Anhand der dargestellten Isolinien ist für die Wetterstation Rodenkirchen der Einfluss des Rheintals erkennbar. Für die Wetterstation Chorweiler wird der nachlassende Einfluss des Rheintals deutlich, da zusätzlich ein Nebenmaximum für Verteilungsdichten zwischen 210 bis 270 Grad erstmals auftritt (vgl. Abbildung 5).

Die in den Abbildungen 16 a) und b) betrachteten Wetterstationen befinden sich im rechtsrheinischen Köln. Wie in den Abbildungen 15 ist auch in den Abbildungen 16 deutlich ein Verteilungsdichtemaximum außerhalb der Raumdiagonalen zu erkennen. Für die bodennahen Windrichtungen (y-Achse) der lokalen Wetterstation Zündorf liegt das Verteilungsdichtemaximum zwischen 120 bis 150 Grad aus südöstlicher Richtung. An der Station Köln/Bonn Flughafen zeigt sich nur eine geringe Variabilität der Windrichtungen, die alle nahe bei 120 Grad liegen und somit einen starken Einfluss des Bergischen Höhenrandes belegen.

Für die Höhenwindrichtungen der windschwachen Strahlungsnächte an der Station Essen aus dem Sektor 230 bis 320 Grad würde die erzwungene Kanalisierung in der Kölner Bucht nordwestliche (Rheintal aufwärts gerichtete) Bodenwinde erwarten lassen (Abbildung 1c), die jedoch in den Bodenwindmessungen kaum auftreten. Die druckgetriebene Kanalisierung würde für Anströmungsrichtungen aus dem Sektor 230 bis 320 Grad südöstliche (Rheintal abwärts gerichtete) Bodenwinde erwarten lassen (Abbildung 1b), die einerseits in den Stationsmessungen häufig auftreten, sich andererseits aber nur schwer von den thermischen Bergwinden aus dieser Richtung unterscheiden lassen (Abbildung 1d).

Da während der ausgewerteten windschwachen Strahlungsnächte hauptsächlich Anströmungen aus südwestlichen bis nordwestlichen Richtungen vorherrschten, und nicht alle Höhenwindrichtungen hinreichend häufig aufgetreten sind, kann die Überlagerung des thermischen Bergwindes durch dynamische Kanalisierung der Anströmung nicht abschließend bewertet werden. Für die aufgetretenen Höhenwinde aus dem südwestlichen bis nordwestlichen Sektor zeigen die Ergebnisse jedoch, dass eine Unterstützung des südöstlichen Rheintalwinds durch die druckgetriebene Kanalisierung angenommen werden kann.

Eine Auswertung der Häufigkeiten der Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Tagesgangs an Tagen mit Strahlungswetterlage soll Aussagen zu dem zeitlichen Verzug und der Intensität des talabwärts gerichteten Windes ermöglichen. Diese Auswertung wurde exemplarisch für die Stationen Rodenkirchen und Chorweiler durchgeführt. Beide Stationen liegen entlang der Rheinachse und sind nicht stark durch lokale Verhältnisse geprägt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt. Für den Tageszeitraum von 20:00 Uhr des Vortages bis 06:00 Uhr morgens ist ein Häufigkeitsmaximum von schwachen Winden erkennbar. Diese schwachen Winde haben eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ca. 1 m/s. Für den Tageszeitraum von 06:00 bis 20:00 Uhr erhöht sich die Windgeschwindigkeit auf maximal 4 bis 5 m/s. Die häufigsten Wind-

geschwindigkeiten für den Zeitraum von 06:00 bis 20:00 Uhr liegen bei durchschnittlich 2 m/s.

Die geringen, an den Stationen in Bodennähe gemessenen Windgeschwindigkeiten, belegen, dass in diesem Höhenbereich Kaltluft aus den Tälern im südlichen Bereich der Kölner Bucht die Innenstadt von Köln erst in der zweiten Nachthälfte erreichen kann (Transportzeit von mindestens 4 Stunden). Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Rheintalwind in größeren Höhen über Grund höhere Windgeschwindigkeiten aufweist und sich die Transportzeiten von Kaltluft aus dem Süden der Kölner Bucht entsprechend verkürzen. Vorliegende Messdaten aus Vertikalsondierungen im Stadtgebiet bestätigen diesen Effekt [15]. Da die Belüftungswirkung von Kaltluft aus dem südöstlichen Bereich der Kölner Bucht durch die vergleichsweise lange Transportzeit und der im Sommer nur kurzen Nacht zeitlich begrenzt ist, sind aus planerischer Sicht die stadtnahen Kaltluftbildungsflächen von besonderer Wichtigkeit, da ihre Belüftungswirkung die Stadt früher erreicht und somit länger anhält. Die Auswertungen zeigen, dass der etwa ab Mitternacht einsetzende Rheintalwind gegenüber zuvor auftretenden Flurwinden dominiert und daher die rheinaufwärts in Stadtnähe gelegenen Kaltluftbildungsflächen für Köln besonders bedeutsam sind. Von der Kühlwirkung der Kaltluftbildungsgebiete in den nördlichen Stadtteilen Kölns profitieren im Sommer hingegen auch die rheinabwärts gelegenen Kommunen und sind somit ebenfalls schützenswert.

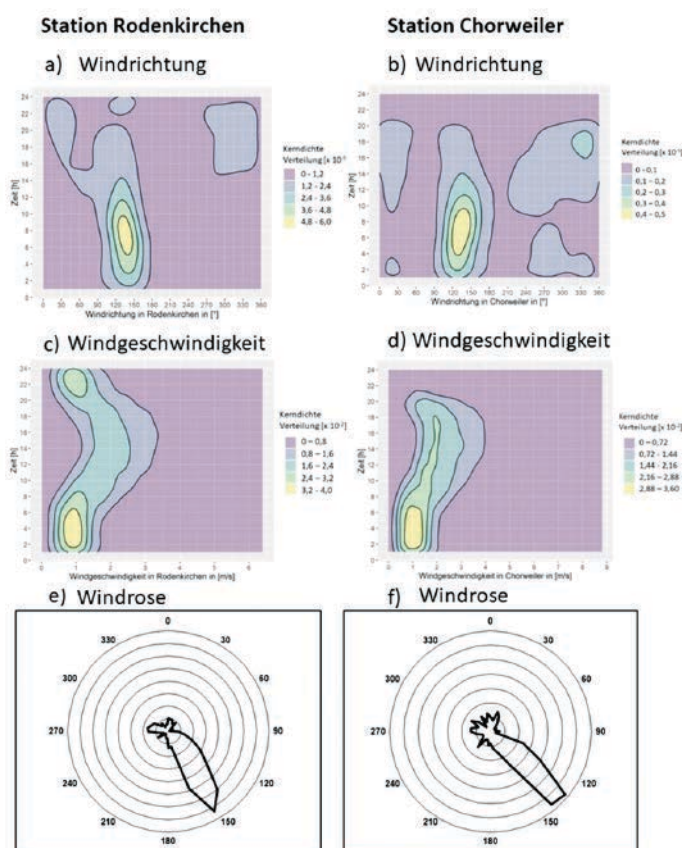


Abb. 17: Häufigkeitsverteilungen an den Stationen Rodenkirchen (links: a, c, e) und Chorweiler (rechts: b, d, f) an Strahlungswetterlagen; a) und b) zeigen die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung [°] in Abhängigkeit des Tagesgangs [h in MEZ]; c) und d) zeigen die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit [m/s] in Abhängigkeit des Tagesgangs [h in MEZ]; e) und f) zeigen die Häufigkeitsverteilung [%] der Windrichtung um 04:00 Uhr als Windrose.

5 Diskussion

Mit diesem Beitrag wurde der Fragestellung nachgegangen, ob der Rheintalwind an ausgesuchten Wetterstationen quantifizierbar ist, und wenn ja, wann sich dieser Kaltluftabfluss bei Strahlungswetterlagen im Kölner Stadtgebiet ausbildet. Weiterhin wurde der Frage nachgegangen, ob die Strömungsrichtungen entlang des Rheintals im Jahresmittel auch durch Kanalisierungseffekte beeinflusst werden.

An Tagen mit autochthonen Wetterlagen bilden sich in breiten Tälern Strömungseffekte aus, die abgekoppelt vom Höhenwind einer thermischen Kanalisierung folgen und talabwärts strömen. In der Veröffentlichung von Klaus et al. (1997) wurde diese Kanalisierung anhand von 15 Messstationen entlang der Niederrheinischen Bucht für das Jahr 1991 untersucht [9]. Für die Abbildung der regionalen Anströmung (im 850 hPa Höhenniveau) wurde die Station der Radiosondenstation des DWD in Essen-Bredeney herangezogen. Die Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der südöstlichen, durch das Rheintal beeinflussten Strömung mit zunehmender Ausweitung des Rheintals in Richtung Norden abnimmt.

5.1 Die Windrichtungsverteilung bei Strahlungswetterlagen

Während in den ersten Stunden nach Sonnenuntergang eine zunächst ungerichtete bodennahe Strömung zu beobachten ist, die auf lokale Mechanismen wie thermische Flurwinde oder lokale Hangabwinde deuten, stellt sich in der zweiten Nachthälfte eine deutliche Ausrichtung der Strömung ein.

Insbesondere bei sommerlichen (autochthonen) Strahlungswetterlagen zeigen alle ausgewerteten Stationen, dass im Verlaufe der Nacht der aus der südlichen Kölner Bucht kommende „Rheintalwind“ die lokalen Kaltluftflüsse überlagert. Nach Mitternacht schwenkt an allen Messstationen der Wind auf eine Richtung ein, die je nach Lage der Stationen parallel zum Rhein verläuft¹, das heißt auf Ost-südost bis Südsüdost.

Eine Ausnahme bilden die Stationen östlich des Mausepades auf die weiter unten eingegangen wird.

5.2 Die Windrichtungsverteilung bei Strahlungswetterlagen aufgelöst in nächtliche Einzelstunden

Zum Nachweis, ob sich die Dominanz des regionalen Bergwindes lediglich auf die frühen Morgenstunden bis zum Sonnenaufgang beschränkt, oder ob dies bereits früher einsetzt, wurden die Stationsdaten bei windschwachen Strahlungswetterlagen für die Zeit nach Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang stündlich aufgelöst (Abbildung 11).

Von 22:00 bis 00:00 Uhr zeigt sich an den Stationen eine Anströmung aus allen Richtungen ohne erkennbares Maximum. Bereits ab 00:00 Uhr deutet sich ein Maximum der Richtungen Ost-südost bis Südsüdost an, welches um 01:00 Uhr dominiert und anschließend bis 08:00 Uhr sich immer stärker ausprägt.

5.3 Die Windrichtungsverteilung an den Stationen östlich des Mausepades

Der Mausepad bildet nicht nur eine naturräumliche Trennlinie, sondern auch eine stadtklimatische Grenze. Die Stationen jenseits des Mausepades (Dellbrück (8), Refrath (9) und Köln/Bonn Flughafen (7)) zeigen eine östliche bis ost-süd-östliche Anströmung. Die stündliche Auflösung in Köln/Bonn Flughafen zeigt diese Richtung bereits unmittelbar nach Sonnenuntergang, die sich dann im Laufe der Nacht nicht mehr ändert. Hier bildet sich der Einfluss der lokalen Hangabwinde und Kaltluftabflüsse der Rheinneben-täler (Aggertal, Wahnbachthal) ab. Der Einfluss der Rheinneben-täler ist ebenfalls an der Station Bonn-Auerberg durch das Siegtal erkennbar.

Anhand dieses deutlichen Einflusses durch den Bergischen Höhenrand wird deutlich, dass die amtliche Station Köln/Bonn Flughafen des Deutschen Wetterdienstes nicht repräsentativ für das gesamte Kölner Stadtgebiet ist (vgl. Abbildung 12).

5.4 Die Windrichtungsverteilung im Jahresmittel

Bei den Auswertungen der gesamten Jahresstunden zeigt sich, dass nicht nur für austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen, sondern auch im Winterhalbjahr das Auftreten des Rheintalwindes durch eine Konzentrierung der Windrichtung auf Südsüdost in der zweiten Nachthälfte nachgewiesen werden kann. Die Richtungsdominanz fällt jedoch nicht so deutlich aus. Wegen der starken Ausprägung des regionalen Systems gewährleistet der „Rheintalwind“ auch in winterlichen Strahlungsnächten eine Belüftung der Stadt.

5.5 Die Windgeschwindigkeiten an Strahlungswetterlagen

Anhand der Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in Abhängigkeit der Jahresstunden für die Stationen Rodenkirchen (4) und Chorweiler (1) (Abbildung 16 a) und b)) ist erkennbar, dass in den Tageszeiten zwischen 21:00 Uhr und 23:00 Uhr bei Strahlungsnächten unterschiedliche Windrichtungshäufigkeiten in Rodenkirchen mit zwei minimalen Nebenmaxima aus NO und WNW sowie in Chorweiler mit einer diffusen Windrichtungslage auftreten. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass das System des Rheintalwindes in Chorweiler später einsetzt als in Rodenkirchen. Eine Bestätigung erhält dieses Indiz in den Auswertungen Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Jahresstunden (Abbildung 17 c und d). In Rodenkirchen liegt in den Zeiten zwischen 21:00 Uhr und 23:00 Uhr (erste Nachthälfte) das Maximum der Windgeschwindigkeiten bei 1 m/s analog zu dem Maximum zwischen 00:00 und 06:00 Uhr (zweite Nachthälfte). Diese Verteilung der Maxima der Windgeschwindigkeiten ist in Chorweiler nicht zu beobachten. Hier ist in den Tageszeiten zwischen 21:00 und 23:00 Uhr (erste Nachthälfte) ein so deutliches Maximum nicht vorhanden.

5.6 Überströmung der Innenstadt und Abflachen des Rheintalwindes

Die Stationen Innerer Grüngürtel (10), Weiler (3) und Chorweiler (1) zeigen wie oben beschrieben in Strahlungsnächten das Einschwenken der Windrichtung nach Mitternacht.

¹ Das Phänomen des „Rheintalwindes“ konnte bereits von Klaus et al. (1997) [9] bestätigt werden.

Dies legt nahe, dass die Innenstadt komplett überströmt wird und der Rheintalwind auch noch die nördlichen Stadtteile mit nächtlicher Kaltluft versorgt. Da das Anemometer am Wasserwerk Weiler im Kölner Norden in einer Höhe von 40 Metern über Geländeoberkante angebracht ist, kann von einem mindestens ebenso mächtigen Kaltluftstrom selbst im Kölner Norden ausgegangen werden.

An den Ergebnissen der Station in Düsseldorf ist im Jahresmittel sowie während Strahlungswetterlagen erkennbar, dass die starke Dominanz der südöstlichen Windrichtung abnimmt, und an Tagen mit Strahlungswetterlagen eine weitere nördliche Windrichtung auftritt. Spätestens in Höhe des Niederrheins nimmt die Intensität der Rheintalrichtung ab, wie in Klaus (1997) beschrieben wurde [9].

5.7 Die Windrichtungsverteilung im Kontext der Höhenwindmessungen der Radiosonde Essen-Bredeney

Die Stationsdaten der Tage mit den oben genannten Ausprägungen der nächtlichen Windrichtungen wurden mit den Richtungen der Höhenwindmessungen der Radiosonde Essen korreliert.

Während das bodennahe Windfeld an den Kölner Stationen ab Mitternacht durch das Auftreten des Rheintalwinds bestimmt wird, ist in Essen-Bredeney für den gleichen Zeitraum ein Maximum der Windrichtungshäufigkeit aus Südwest erkennbar. Die Windrichtungsverteilung am Wetterturm des Forschungszentrums Jülich zeigt in 120 Metern Höhe ebenfalls ein deutliches Maximum im Südwesten.

Dies lässt den Schluss zu, dass das Bodenwindfeld in der südlichen Kölner Bucht insbesondere bei sommerlichen (autochthonen) Strahlungswetterlagen vom übergeordneten Höhenwind abgekoppelt ist. Hier ist ein thermisch und gravitativ angetriebener Bergwind zu konstatieren, der auch durch numerische Simulationen abgebildet wurde [12].

Da aber auch in der Summe der Jahresstunden an den Kölner Stationen ein Maximum der Windrichtungshäufigkeit aus Südost erkennbar ist, welches von der westlichen Richtungsdominanz in Essen abweicht, existiert offensichtlich auch ein orographisch bedingter Kanalisierungseffekt, der die übergeordneten Windfelder bodennah umlenkt und in eine etwa rheinparallele Richtung zwingt (s.o.).

6 Fazit

Die regional bedeutsame Kaltluftströmung im Rheintal wird insbesondere von kräftigen Kaltluftzuflüssen aus den Rheinebentälern (linksrheinisch: Eifeltäler, Ahrtal /rechtsrheinisch: Siegtal, Sülztal, Wahnachtal, Aggertal, etc.) gespeist. Im südlichen Bereich der Kölner Bucht bildet sich hierdurch eine Kaltluftströmung mit hoher Intensität aus. Die auf geeigneten Flächen des Kölner Stadtgebietes lokal gebildete Kaltluft wird zunächst durch lokale Flurwinde und Hangabwinde in bebaute Gebiete verfrachtet und speist den sich ab Mitternacht ausbildenden Rheintalwind. Diesen lokalen Kaltluftentstehungsgebieten kommt somit ebenfalls eine stadtklimatologische Bedeutung zu. Die Stadtbereiche östlich des Mauspfades werden dabei durch lokale Hangabwinde und Kaltluftabflüsse der rechtsrheinischen Rheinebentäler dominiert. Die Kernstadt wird durch den Rheintalwind überströmt und der regionale Kaltluftabfluss ist auch

im Kölner Norden noch mit mindestens 40 Metern Mächtigkeit nachweisbar. In Düsseldorf ist der Einfluss des Rheintalwinds noch erkennbar, im weiteren Verlauf in Richtung Niederrhein nimmt die Bedeutung des regionalen Bergwinds weiter ab.

Im Jahresverlauf sind dynamisch bedingte Kanalisierungseffekte zu konstatieren, die in windschwachen Strahlungsnächten den lokalen Kaltluftabflüssen überlagert sind. Die Korrelation der bodennah gemessenen Windrichtungen mit den Windrichtungen der Anströmung aus den Radiosondenmessungen in Essen zeigt, dass in den analysierten Nächten meist westliche Anströmung vorherrscht und dadurch der Prozess der erzwungenen Kanalisierung die Ausbildung des talabwärts gerichteten Rheintalwinds wesentlich begünstigt. Wie in Abbildung 18 schematisch dargestellt, bewirkt bei großräumiger Anströmung aus westlichen Richtungen der großräumige Druckgradient längs des Rheintals eine dynamische, talabwärts gerichtete Strömungskanalisierung (weiße Pfeile mit roter Umrandung), die den ebenfalls talabwärts gerichteten gravitativen Kaltluftabflüssen (schwarze Pfeile) gleichgesinnt überlagert ist. Zu beachten ist hierbei, dass die Kaltluftabflüsse, je nach Entfernung des Kaltlufteinzugsgebiets, eine bis mehrere Stunden benötigen um das Stadtgebiet von Köln zu erreichen. Die druckgetriebene Kanalisierung der übergeordneten Anströmung ist hingegen ein regionaler Prozess, der ohne Zeitverzögerung (instantan) in der gesamten Kölner Bucht zur Ausbildung des Rheintalwinds beiträgt. Da sich die Rheintalatmosphäre im Verlauf der Nacht, durch die sich verstärkenden Temperaturinversionen, zunehmend von der

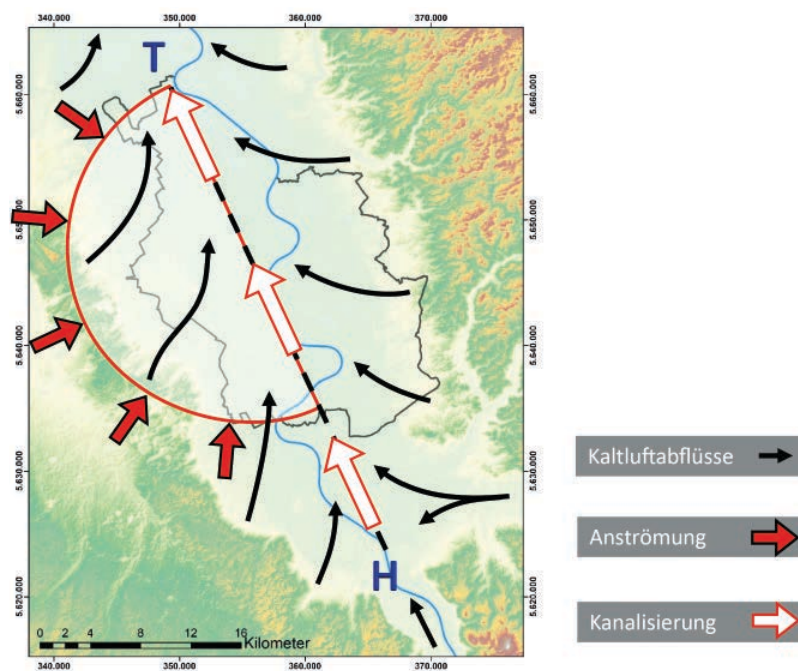


Abb. 18: Schematische Darstellung des nächtlichen, bodennahen Windfelds in der Kölner Bucht während sommerlichen Strahlungswetterlagen. Dünne schwarze Pfeile zeigen die thermisch angetriebenen Kaltluftabflüsse, dicke rote Pfeile repräsentieren verschiedene großräumige Anströmrichtungen aus dem linksrheinischen Richtungshalbraum (rot umrandeter Halbkreis) und dicke weiße Pfeile illustrieren die durch linksrheinische Anströmung entstehende Strömungskanalisierung aufgrund druckgetriebener Kanalisierung. H (für hohen Luftdruck) und T (für tiefen Luftdruck) zeigen die Unterschiede des großräumigen Luftdrucks längs des Rheintals bei westlicher Anströmung.

Höhenströmung entkoppelt, begünstigt die druckgetriebene Kanalisierung insbesondere in der zweiten Nachthälfte die Ausbildung des Rheintalwinds.

Die präsentierten Analysen von Messdaten zeigen, dass Windsimulationen zur Luftqualität oder für die klimaangepasste Stadtplanung in Köln, den regelmäßig in der zweiten Nachthälfte auftretenden Rheintalwind adäquat wiedergeben müssen um dessen Wirkung auf die nächtliche Belüftung und Abkühlung abzubilden.

7 Ausblick

Die Studie „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ [10] hat gezeigt, dass die Stadt Köln sich auf länger anhaltende Hitzewellen mit Spitzentemperaturen von mehr als 40 °C einstellen muss.

Für die Stadt Köln bedeutet dies, dass längere Hitzeperioden mit Temperaturen über 25 °C (Sommertage) und über 30 °C (heiße Tage) vermehrt auftreten. Im Vergleich mit dem Referenzzeitraum (1971 bis 2000) zeigen die Klimaprojektionen für das gesamte Stadtgebiet mindestens eine Zunahme von 50 Prozent bis 2050 an Sommertagen bzw. heißen Tagen. Neben der Überwärmung der dicht bebauten Stadtteile aufgrund des zusätzlichen Wärmeinseleffekts, ist die Durchlüftung der Stadt und insbesondere der Wohngebiete von zentraler Bedeutung für ein gesundes Stadtklima. Gleichzeitig ist die Stadt Köln eine wachsende Stadt. Die Einwohnerzahl nimmt zu, aber auch die Anzahl an vulnerablen Personengruppen, die durch die sommerliche Hitzebelastung kombiniert mit einer Verminderung der Durchlüftung gesundheitliche Einschränkungen erleiden.

Tabelle 3 zeigt die Anzahl belasteter Einwohner*innen in der Stadt Köln durch Hitze.

Die Auswertung der heute schon vorhandenen Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze zeigt, dass insgesamt 43,3 % alle Kölner Einwohner*innen (Bezug Einwohnerdaten 2017) hitzebelastet sind. In absoluten Zahlen entspricht das 469.705 Einwohner*innen. Die Belastung ist in den Stadtbezirken am höchsten, in denen ein hoher Versiege-

lungsgrad die Wohngebiete prägt. In diesen Bereichen ist es besonders nachteilig, wenn durch zusätzliche Nachverdichtung, bzw. eine Entwicklung von Bauprojekten auf der „grünen Wiese“ nicht nur die Erwärmung insgesamt zunimmt, sondern auch die Durchlüftung zusätzlich eingeschränkt wird.

Damit zeigt sich, dass die auf den ersten Blick eher akademisch erscheinenden Auswertungen zum Rheintalwind in der Planungspraxis der Stadt Köln im Zuge der Anpassung an den Klimawandel und der damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen für die Einwohner*innen zukünftig eine noch stärkere Bedeutung bekommen werden.

Mit der differenzierten Auswertung der Winddaten der südlichen Kölner Bucht liegt eine sichere Datenlage vor, die zukünftig in Bezug auf Planverfahren im Kölner Raum angewandt werden wird. Je nach räumlicher Lage der Planverfahren wird die differenzierbare Erkenntnis der vorherrschenden Windrichtung an Tagen mit autochthonen Wetterlagen eingebracht, um die Anströmrichtung in mikroskaligen Modelluntersuchungen zu definieren und in Optimierungstools für eine dem Klimawandel angepasste Bauweise einzusetzen. Diese Möglichkeit, belastbare Eingangsparameter einzusetzen, führt zu einer größeren Rechtssicherheit in Planverfahren und ist wesentlich mit Blick auf den fortschreitenden Klimawandel.

Zur weiteren Untersuchung der Antriebsmechanismen des nächtlichen Rheintalwinds könnte in zukünftigen Studien auch der Luftdruckgradient längs des Rheintals anhand Stationsmessungen analysiert werden. Durch bodengebundene Fernerkundungsverfahren wie Wind-Lidar und Mikrowellenradiometer kann zudem die Vertikalstruktur des Rheintalwinds erfasst werden, um dessen Schichtdicke und Entkopplung von der Höhenströmung zu untersuchen. Da Re-Analysen mit Wettervorhersagemodellen immer feinere Gitterweiten erreichen und zeitlich mehrere Dekaden umfassen, bieten diese gute Möglichkeiten die Klimatologie des Rheintalwinds flächendeckend in der gesamten Kölner Bucht zu untersuchen. ■

Tab. 3: Hitzebelastete Bevölkerung nach Stadtbezirken 2017 (Datengrundlage Stadt Köln, Amt für Statistik und Einwohnerwesen). Hohe/sehr hohe belastete Siedlungsflächen der Planungshinweiskarte Hitze aus der Studie Klimawandelgerechte Metropole Köln [10]

	Hitze		
	Wohnadresse in (sehr) hoch belasteten Siedlungsflächen		
	Absolute Anzahl	Absolute Anzahl	Prozentuale Anzahl
1 / Innenstadt	129.108	103.062	79,8%
2 / Rodenkirchen	109.751	37.959	34,6%
3 / Lindenthal	152.117	80.012	52,6%
4 / Ehrenfeld	108.256	76.580	70,7%
5 / Nippes	117.921	64.254	54,5%
6 / Chorweiler	83.036	9.678	11,7%
7 / Porz	113.670	15.984	14,1%
8 / Kalk	121.372	50.811	41,9%
9 / Mülheim	149.564	31.365	21,0%
Stadt Köln insgesamt	1.084.795	469.705	43,3%

Literaturverzeichnis

- [1] Bangert, H. (1995). *Klimauntersuchung für das Heizkraftwerk Köln-Merheim*. Paderborn.
- [2] Bangert, H. & Heider, R. (1996). *Klimatologische Stellungnahme für den Untersuchungsraum Köln-Süd*. Paderborn: Büro für Umweltmeteorologie.
- [3] Bendix, J. (2004). *Geländeklimatologie*. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung Berlin.
- [4] Deutscher Wetterdienst. (2021). *Climate Data Center (CDC), Stündliche Stationsmessungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, Version v19.3, abgerufen am 11.05.2021*. Offenbach.
- [5] Düttemeyer, D. (1999). *Urban-orographische Windsysteme in der städtischen Peripherie Köln*. Essener Ökologische Schriften, Bd. 12, 2000, 171 S., Westarp-Wissenschaften, ISBN 3 89432 091 5.
- [6] Fiedler, F. (1983). *Einige Charakteristika der Strömung im Oberrheingraben*. Wissenschaftliche Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Karlsruhe, Band 4, S. 113–123.
- [7] Forschungszentrum Jülich GmbH (2021). *Meteorologische Station, Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und Windrichtung, E-Mail vom 16.03.2021*. Jülich.
- [8] Kalthoff, N. & Vogel, B. (1992). *Counter-current and channeling effect under stable stratification in the area of Karlsruhe*. Theoretical and Applied Climatology, Band 45, S. 113–126.
- [9] Klaus, D., Fett, M., Poth, A., Rechmann, M. & Voss, M. (1997). Beziehungen zwischen synoptischer und lokaler Windzirkulation und

- der Schadstoffbelastung in der südlichen Niederrheinischen Tieflandsbucht. *Bericht Geographie Landeskunde*, Bd. 71, H.2, S. 255–284.
- [10] LANUV NRW (2013). *Fachbericht 50: Klimawandelgerechte Metropole Köln*. Recklinghausen.
- [11] LANUV NRW (2021). *Luftqualitätsüberwachungssystem LUQS*. Recklinghausen.
- [12] Lohmeyer GmbH (2000). *Entwicklung eines neuen Stadtteils Köln-Kreuzfeld – Klimagutachten*. Dorsten.
- [13] RheinEnergie AG (2021). *Wetterdaten (Wind, Temperatur), E-Mail vom 29.03.2021*. Köln.
- [14] Stadt Köln (2003). *UVP Bewertungshandbuch*.
- [15] W. Kuttler, D. Dütemeyer, A.-B. Barlag (1997). *Klimatologische Untersuchungen in einem potentiellen Belüftungsareal innerhalb des Stadtgebietes von Köln*. Essen: Universität GH Essen.
- [16] Whiteman, C., & Doran, J. (1993). The relationship between overlying synoptic Air flow over and in broad valleys: Channeling and counter-current. *Contr. Atmos. Phys.*, 57, 92–105.
- [17] Wippermann, F. (1984). Air flow over and in broad valleys: Channeling and counter-current. *Contr. Atmos. Phys.*, 57, 92–105.

Kontakt

Stadt Köln – Umwelt- und Verbraucherschutzamt
Umweltplanung und -vorsorge
Willy-Brandt-Platz 2
50679 Köln

E-Mail: christian.hartwig@stadt-koeln.de

BERLINER SCHRIFTEN ZUM ENERGIERECHT

Wärmstens zu empfehlen!



Rechtsfragen saisonaler Aquifer-Wärmespeicher

Hemmnisse und Lösungsmöglichkeiten aus Sicht des Berg- und Umweltrechts

Von Philipp Neidig

2022, 455 Seiten, € 89,—. ISBN 978-3-503-20698-8

eBook: € 81,40. ISBN 978-3-503-20699-5

Berliner Schriften zum Energierecht, Band 5

Erstmalig werden in diesem Buch sämtliche Rechtsfragen zu Aquifer-Wärmespeichern erläutert. Bei Vorhabenträgern räumen die sehr übersichtlichen, umfassenden Erläuterungen von **Philipp Neidig** gezielt Rechtsunsicherheiten aus, die der flächendeckenden Verbreitung dieser Technologie zur Speicherung von Wärme/Energie im tiefen Grundwasser zurzeit noch im Weg stehen. Allen Genehmigungsbehörden sind sie eine solide Grundlage für konkrete Einzelentscheidungen.

Online informieren und bestellen:

 www.ESV.info/20698

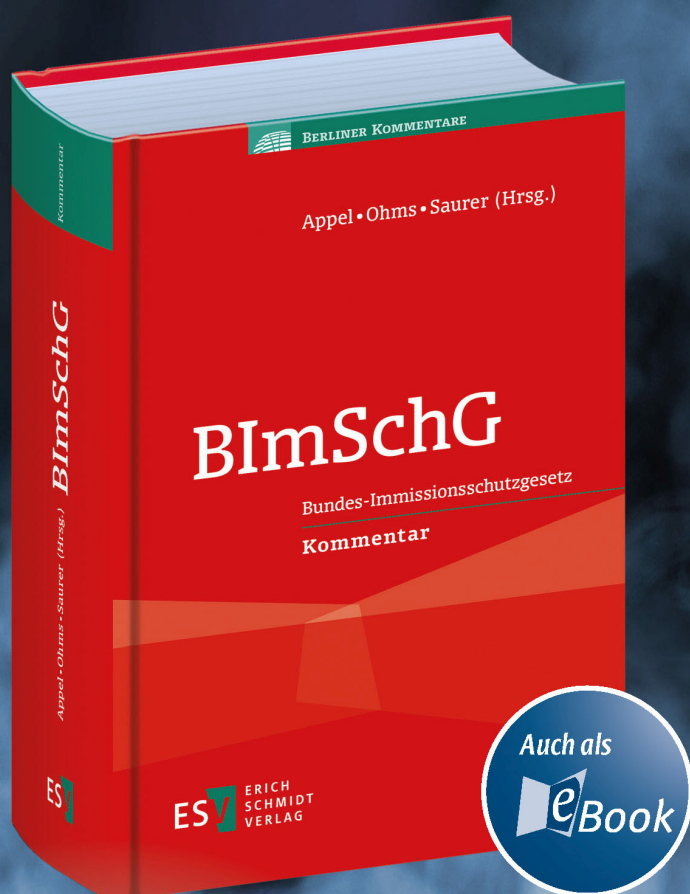


ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Auf Wissen vertrauen

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG
Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin
Tel. (030) 25 00 85-265
Fax (030) 25 00 85-275
ESV@ESVmedien.de · www.ESV.info

Wir lichten den Nebel



BImSchG

Bundes-Immissionsschutzgesetz

Kommentar

Herausgegeben von Rechtsanwalt und Fachanwalt für Verwaltungsrecht **Dr. Markus Appel, LL.M.**, Linklaters LLP, Berlin, Rechtsanwalt und Fachanwalt für Verwaltungsrecht **Dr. Martin J. Ohms**, Ohms Rechtsanwälte, Berlin, und **Prof. Dr. Johannes Saurer, LL.M. (Yale)**, Juristische Fakultät Universität Tübingen

2021, XXVIII, 1.826 Seiten, mit **Erläuterungen zum untergesetzl. Regelwerk** sowie **Online-Zugang zu immissionsschutzrechtl. Vorschriftendatenbank**, fester Einband, € 184,–
ISBN 978-3-503-14183-8

eBook: € 167,40. ISBN 978-3-503-18891-8

Der **brandneue Kommentar** zum BImSchG erfasst eines der praxisrelevantesten Gebiete des Umweltrechts in seiner ganzen Dimension: **sämtliche Vorschriften des BImSchG** und die wichtigsten Vorschriften aus dem ausufernden untergesetzlichen Regelwerk.

Alles komfortabel versammelt in einem handlichen Werk mit präzisen, **klar verständlichen Erläuterungen auf dem aktuellen Stand** der Rechtsprechung – verschaffen Sie sich jetzt den Überblick!

Inklusive Zugriff auf eine umfangreiche, ständig aktualisierte **Vorschriftendatenbank** mit wichtigen immissionsschutzrechtlichen Vorschriften der EU, des Bundes und der Länder.

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Auf Wissen vertrauen

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG
Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin
Tel. (030) 25 00 85-265 · Fax (030) 25 00 85-275
ESV@ESVmedien.de · www.ESV.info



Online informieren und bestellen:
www.ESV.info/14183