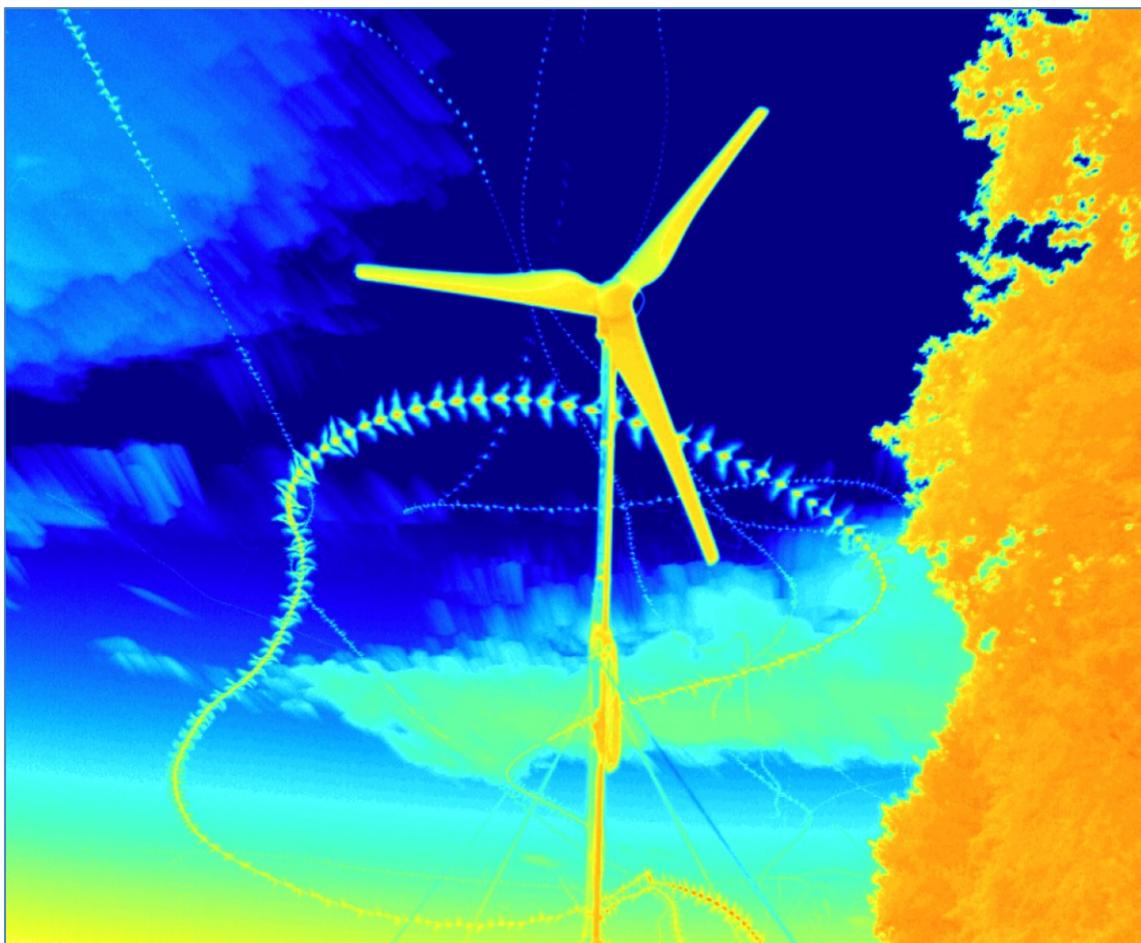


**Stefanie Hartmann, Sören Greule, Felix Günther,  
Bruntje Lüdtkje, Klaus Hochradel,  
Horst Schauer-Weisshahn und Robert Brinkmann**

# **Berücksichtigung von Fledermäusen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen – Ein Experiment in Süddeutschland**



# **Berücksichtigung von Fledermäusen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen – Ein Experiment in Süddeutschland**

**Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben  
(FKZ: 3517 86 0600)**

**Stefanie Hartmann  
Sören Greule  
Felix Günther  
Bruntje Lüdtko  
Klaus Hochradel  
Horst Schauer-Weisshahn  
Robert Brinkmann**

**Titelbild:** Fledermausflugbahn an einer Kleinwindenergieanlage (K. Hochradel)

**Adressen der Autorinnen und der Autoren:**

Dr. Stefanie Hartmann                      Freiburger Institut für Angewandte Tierökologie  
Sören Greule                                      Dunantstraße 9, 79119 Freiburg  
Felix Günther                                      E-Mail: hartmann@frinat.de

Bruntje Lüdtké  
Horst Schauer-Weisshahn  
Dr. Robert Brinkmann

Dr. Klaus Hochradel                      Institut für Mess- und Sensortechnik an der privaten Universität für  
Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik  
Eduard-Wallhöfer-Zentrum 1, 6060 Hall in Tirol, Österreich  
E-Mail: klaus.hochradel@umit.at

**Fachbetreuung im BfN:**

Asja Weber                                      Fachgebiet II 4.3 „Naturschutz und erneuerbare Energien“

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (FKZ: 3517 86 0600).

Zitiervorschlag: Hartman, S., Günther, F., Lüdtké, B., Hochradel, K., Schauer-Weisshahn, H., Brinkmann, R. (2021): Berücksichtigung von Fledermäusen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen – Ein Experiment in Süddeutschland. BfN-Skripten 604: 69 Seiten

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank „DNL-online“ ([www.dnl-online.de](http://www.dnl-online.de)).

BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter [http:// www.bfn.de/skripten.html](http://www.bfn.de/skripten.html) heruntergeladen werden.

Institutioneller Herausgeber:      Bundesamt für Naturschutz  
Konstantinstr. 110  
53179 Bonn  
URL: [www.bfn.de](http://www.bfn.de)

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.



Diese Schriftenreihe wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY - ND 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de>).

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

Gedruckt auf 100% Altpapier

ISBN 978-3-89624-365-2

DOI 10.19217/skr604

Bonn - Bad Godesberg 2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>9</b>
1.1. Bedeutung von Kleinwindenergieanlagen und ihre Genehmigungspraxis in Deutschland .....	9
1.2. Kollisionsrisiko von Fledermäusen an Kleinwindenergieanlagen und rechtliche Konsequenzen .....	10
1.3. Aktuelle Forschung und verbleibende Wissensdefizite .....	11
1.4. Projektziele und Forschungsfragen .....	12
<b>2. Material und Methoden .....</b>	<b>14</b>
2.1. Projektorganisation .....	14
2.2. Untersuchungsstandorte .....	14
2.3. Vermeidung der Beeinträchtigungen von Fledermäusen im Experiment .....	16
2.4. Experimentelle Untersuchung des Verhaltens und Kollisionsrisikos von Fledermäusen an KWEA .....	17
2.4.1. Versuchsdesign und -aufbau .....	17
2.4.2. Meteorologische Daten .....	18
2.4.3. Stereo-Infrarot-Kamera .....	19
2.4.4. Akustische Erfassung .....	23
2.5. Aufbereitung der Felddaten für die statistischen Analysen .....	24
2.5.1. Umwandlung der Motorleistungen in Rotorgeschwindigkeitsklassen .....	24
2.5.2. Flugbahnvisualisierung .....	27
2.5.3. Zuordnung von Wind-, Temperatur- und akustischen Erfassungen zu den jeweiligen Flugbahnen .....	28
2.5.4. Bestimmung der Minimaldistanz der Flugbahnen zum Rotor und potenzieller Rotordurchflüge .....	28
2.6. Statistische Analysen zur Minimaldistanz .....	29
<b>3. Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
3.1. Anzahl aufgenommener Flugbahnen und Artenspektrum .....	30
3.2. Verhalten von Fledermäusen an KWEA .....	32
3.2.1. Minimaldistanz zum Rotorbereich, Anzahl Rotordurchflüge und Kollisionen .....	32
3.2.2. Einfluss des Standortes auf das räumliche Verhalten der Fledermäuse am Rotor ..	35
3.2.3. Einflüsse der Arten(gruppen) auf die Minimaldistanz zum Rotor .....	36
3.2.4. Richtungsänderungen der Fledermäuse am Rotor .....	37
<b>4. Diskussion .....</b>	<b>40</b>
4.1. Die Fledermausaktivität an KWEA im Überblick .....	40
4.2. Anzahl der Flugbahnen und Artenspektrum der lokalen Fledermausfauna an KWEA .....	41
4.3. Verhalten von Fledermäusen an KWEA .....	41

4.3.1.	Erkundungs- und Ausweichverhalten .....	41
4.3.2.	Meideverhalten .....	43
4.4.	Kollisionsrisiko für Fledermäuse an KWEA .....	44
4.5.	Methodenkritik .....	45
<b>5.</b>	<b>Erkenntnisse aus dem Expertenworkshop .....</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>Empfehlungen für die Planung sowie für den Betrieb von KWEA .....</b>	<b>48</b>
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>52</b>
<b>9.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>57</b>
9.1.	Überblick über die Laufzeiten der verschiedenen Betriebsmodi an den unterschiedlichen Standorten .....	57
9.2.	Verteilung der Wind- und Temperaturdaten über den Experimentzeitraum .....	58
9.3.	Räumliche Verteilung der Aktivitätsschwerpunkte bei den verschiedenen Betriebsmodi für alle Standorte .....	59
9.4.	Visualisierung von Richtungsänderungen bei verschiedenen Betriebsmodi an den unterschiedlichen Standorten .....	64
9.5.	Verteilung der Richtungsänderungen über die unterschiedlichen Betriebsmodi .....	69

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lage der sechs Untersuchungsstandorte im südwestdeutschen Naturraum um Freiburg. ....	15
Abb. 2:	Versuchsaufbau an den sechs Untersuchungsstandorten .....	16
Abb. 3:	Aufbau des Experiments.....	18
Abb. 4:	Schematische Darstellung des Aufbaus der Stereo-Infrarot-Kamera mit den wichtigsten Komponenten.....	20
Abb. 5:	Schematische Darstellung der Aufnahmesituation an den KWEA. ....	21
Abb. 6:	Schematische Darstellung des geometrischen Aufbaus an der KWEA.....	22
Abb. 7:	Programmablauf des Stereo-Kamera-Systems. ....	23
Abb. 8:	Häufigkeit der verschiedenen Rotordrehzahlen, die bei halber und voller Motorleistung erreicht wurden .....	25
Abb. 9:	Abstrahierte Darstellung des Rotors der KWEA zur Veranschaulichung der Berechnung der Distanz eines Flugpunktes (P) zum Rotor.....	28
Abb. 10:	Anzahl der aufgezeichneten Flugbahnen pro Standort und Tag. ....	30
Abb. 11:	Artenspektrum und Anzahl der Rufsequenzen aus der akustischen Artbestimmung im 40-Sekunden-Bereich um die optisch aufgezeichneten Flugbahnen an den sechs Standorten.....	31
Abb. 12:	Darstellung des kürzesten Abstands aller Flugbahnen zum Rotor pro Betriebsmodus und Standort .....	32
Abb. 13:	Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz zum Rotor in Abhängigkeit der Betriebsmodi und der Globalstrahlung (feste Effekte) sowie den Standorten (zufälliger Effekt).....	33
Abb. 14:	Visualisierung der Kerndichteschätzung am Beispiel der Teleskopstange am Standort Gundelfingen.....	35
Abb. 15:	Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Gundelfingen bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. ....	36
Abb. 16:	Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz zum Rotor in Abhängigkeit der Artengruppe (feste Effekte) unter Korrektur für den Standort (zufälliger Effekt). ....	37
Abb. 17:	Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Gundelfingen.....	39
Abb. 18:	Exemplarische Darstellung der Richtungswechsel innerhalb der Flugbahnen bei langsam drehendem Rotor am Standort Gundelfingen.. ....	40
Abb. 19:	Überblick über die gemessenen Windgeschwindigkeiten (links) und Temperaturen (rechts) während des Experiments. ....	58
Abb. 20:	Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Breisach bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. ....	59
Abb. 21:	Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Burkheim bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage .....	60
Abb. 22:	Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Gündlingen bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage .....	61

Abb. 23:	Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Römerbad bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage .....	62
Abb. 24:	Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Wasenweiler bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage .....	63
Abb. 25:	Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Breisach .....	64
Abb. 26:	Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Burkheim. ....	65
Abb. 27:	Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Gündlingen. ....	66
Abb. 28:	Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Römerbad .....	67
Abb. 29:	Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Wasenweiler. ....	68
Abb. 30:	Häufigkeit der detektierten Richtungsänderungen. ....	69

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bestimmungskategorien für die Zuordnung der Aufnahmen der akustischen Erfassungen. ....	24
Tab. 2:	Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz (mD) zum Rotor in Abhängigkeit der Betriebsmodi und der Globalstrahlung (feste Effekte) sowie den Standorten (zufälliger Effekt). ....	34
Tab. 3:	Durchflüge durch den Rotorbereich pro Standort und Betriebsmodus .....	34
Tab. 4:	Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz (mD) zum Rotor in Abhängigkeit der Artengruppe (feste Effekte) sowie den Standorten (zufälliger Effekt). ....	37
Tab. 5:	Auflistung des Datums, des Standortes und des Betriebszeitraums mit der Zuordnung des jeweils gewählten Betriebsmodus. ....	57

## Abkürzungsverzeichnis

°	Bogengrad
°C	Grad Celsius
/	pro
3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm <sup>2</sup>	Quadratcentimeter
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CUDA	Compute Unified Device Architecture
d. h.	das heißt
DLT	Direct Linear Transformation
Dr.	Doktor
et al.	und andere
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FFH	Flora-Fauna-Habitat
FKZ	Forschungskennzahl
FrlNaT	Freiburger Institut für angewandte Tierökologie
GB	Gigabyte
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Global Positioning System
h	Stunde
kHz	Kilohertz
kW	Kilowatt
KWEA	Kleinwindenergieanlage
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt

Imer	linear mixed-effects model
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
min	Minute
mm	Millimeter
MUGV	Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
n	Anzahl
NM	Nanometer
Nr.	Nummer
NTP	Network Time Protocol
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
s	Sekunde
SBC	Single Board Computer
Tab.	Tabelle
Teleskopst.	Teleskopstange
TM	Trademark
U	Umdrehungen
UMIT	Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik
USA	Unites States of America
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolett
V	Volt
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
vs.	versus
W	Watt
WEA	Windenergieanlage
z. B.	zum Beispiel
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

# 1. Einleitung

## 1.1. Bedeutung von Kleinwindenergieanlagen und ihre Genehmigungspraxis in Deutschland

Das globale Klima unserer Erde verändert sich seit 1950 zunehmend. Die veränderten Umweltbedingungen bergen sowohl für Menschen als auch für die Natur und Biodiversität verschiedene Risiken. Das Gefahrenpotenzial hinter dem Klimawandel ist seit Langem erkannt und mögliche Minderungsversuche werden nun in Angriff genommen. Hierbei legt die Bundesregierung einen Schwerpunkt auf den Ausbau und die Förderung erneuerbarer Energien (BMU 2016). Zum jetzigen Zeitpunkt entfällt der Großteil der erzeugten regenerativen Energie auf die Windkraft an Land (ZSW 2017). Um die Klimaschutzziele zu erreichen, ist ein weiterer Ausbau der Windenergie in Deutschland unausweichlich (Walter et al. 2018). Dies könnte auch für die Kleinwindenergieanlagen (KWEA) gelten.

KWEA haben aufgrund ihres relativ geringen Beitrags (max. 100kW pro Anlage) bislang in Deutschland nur eine geringe Relevanz. Ihr Potential besteht jedoch darin, dass sie aufgrund der niedrigen Höhe und Schallimmissionen viel näher an Siedlungen gebaut werden können als große Windenergieanlagen (WEA), und somit auch für eine dezentrale Energienutzung von großer Bedeutung sein können. Nach einem Szenario von Walter et al. 2018 zum Ausbaupotenzial der erneuerbaren Energien in Deutschland könnten so zusätzliche große Flächen zur Energiegewinnung genutzt werden, um die ambitionierten Ziele einer naturverträglichen Energieversorgung zu erreichen (Walter et al. 2018). Die Form der Energiegewinnung über KWEA ist bislang vor allem im kleingewerblichen und privaten Sektor attraktiv. Die KWEA werden zur Stromgewinnung an oder auf landwirtschaftlichen Betrieben, Gewerbebauten oder Häusern installiert. Neben dem Aspekt des Klima- und Umweltschutzes stehen hier Gründe wie steigende Strompreise und Autarkie im Vordergrund (Jüttemann 2017).

Eine einheitliche Definition von KWEA existiert bisher nicht. Zur Abgrenzung von großen WEA werden häufig Eckdaten wie eine Gesamthöhe unter 50 m, eine Leistung bis zu maximal 100 kW und eine Windangriffsfläche von bis zu 200 m<sup>2</sup>, was einem Rotordurchmesser von ca. 16 m entspricht, herangezogen (Jüttemann 2017). Der Bundesverband Windenergie (BWE) teilt KWEA in drei Leistungsklassen auf:

- Mikro-Windanlagen            0 bis 5 kW
- Mini-Windanlagen            5 bis 30 kW
- Mittel-Windanlagen           30 bis 100 kW

Im Gegensatz zu WEA gibt es bei KWEA zahlreiche verschiedene Bauformen. Neben KWEA mit horizontalen Rotorachsen in verschiedenen Varianten, z. B. mit unterschiedlicher Anzahl an Rotorblättern, gibt es auch vertikal rotierende KWEA. Obwohl Deutschland aufgrund des ungünstigen Einspeisetarifs kein Kernmarkt für KWEA ist, lohnt sich in vielen Fällen die Nutzung zum Eigenverbrauch, besonders in Kombination mit Photovoltaikanlagen (Jüttemann 2017). Ende 2015 wurde die Anzahl an KWEA in Deutschland mit 17.000 angegeben (Pitteloud & Gsänger 2017), wobei aufgrund der unsystematischen Registrierung von einer zusätzlichen Dunkelziffer auszugehen ist. Die größten Märkte für Kleinwindenergie befinden sich derzeit in China, den USA und Großbritannien (Pitteloud & Gsänger 2017).

In einigen Bundesländern hat der Ausbau der erneuerbaren Energien zur Ausarbeitung und Verabschiedung von Windenergieerlassen geführt, die beteiligten Fachstellen, Behörden, Kommunen, Bürgern und Investoren praxisorientierte Leitlinien für das Verfahren mit Windenergieanlagen bieten sollen (UM et al. 2012). Das Thema KWEA wird in diesen Dokumenten

allerdings wenig (Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen) bis gar nicht (Brandenburg, Rheinland-Pfalz und Thüringen) diskutiert. In den meisten Bundesländern hat sich eine Verfahrensfreistellung von KWEA bis zu einer Höhe von zehn Metern, ausgenommen sind Berlin, Bremen und Niedersachsen, durchgesetzt (Jüttemann 2017). Gesondert thematisiert werden KWEA im aktualisierten Leitfaden zum Thema Windenergie und Fledermäuse von EUROBATS (Rodrigues et al. 2015). Hier wird auf das Vorgehen und auf Untersuchungsmethoden hingewiesen, die bei der Planung und beim Bau von KWEA berücksichtigt werden sollten.

Derartige Voruntersuchungen sind im Verhältnis zum Investitions- und Energiegewinnungsvolumen teuer. Ferner herrscht noch Unklarheit darüber, wie solche Voruntersuchungen in entsprechende Maßnahmen münden. Die Tatsache, dass eine große Bandbreite an KWEA existiert, was Bauformen (vertikal/ horizontal), die Höhe, die Rotorblattzahl usw. angeht, erschwert es dem noch sehr jungen Markt zusätzlich, zu einer einheitlichen Genehmigungspraxis zu gelangen (Jüttemann 2017). Dass dies nicht nur ein bundesweites Problem ist, zeigen Park et al. (2013) auch für Großbritannien.

## **1.2. Kollisionsrisiko von Fledermäusen an Kleinwindenergieanlagen und rechtliche Konsequenzen**

Für Tierarten, die den offenen Luftraum nutzen, können sich drehende Rotoren im Allgemeinen eine erhebliche Gefahr darstellen. Diese Erkenntnis entwickelte sich bereits in den 1970er Jahren in den USA und Australien an großen Windenergieanlagen (WEA) (Hall & Richards 1972; Rogers et al. 1976). Die steigende Zahl an Berichten über Totfunde von Fledermäusen an WEA (Orloff & Flannery 1992; Howell 1997; Keeley et al. 2001) forcierte gezielte wissenschaftliche Untersuchungen (zusammengefasst in Wang & Wang (2015); Arnett et al. (2016)). Zum heutigen Zeitpunkt ist bekannt, dass eine der häufigsten beobachteten Todesursachen für Fledermäuse weltweit ihre Interaktionen mit WEA darstellen (Barclay et al. 2007; Piorowski & O'Connell 2010; Rydell et al. 2010; Baerwald et al. 2014; O'Shea et al. 2016). Dabei führen sowohl die direkte Kollision mit den Rotoren, als auch indirekte Einwirkungen der WEA auf die Fledermaus zum Tod oder zu letalen Verletzungen (Brinkmann et al. 2006; Baerwald et al. 2008).

Inwiefern das an WEA dokumentierte Kollisionsrisiko auf KWEA übertragbar ist, ist unklar, da die entsprechende Datenlage hierzu gering ist und innerhalb der KWEA eine so hohe Variabilität besteht, dass zwischen unterschiedlich hohen oder bauverschiedenen Typen keine Übertragbarkeit gegeben ist. Verschiedene Studien aus Großbritannien belegen aber, dass Fledermäuse auch an KWEA kollidieren können (Minderman et al. 2012; Minderman et al. 2015; Tatchley 2015; Moyle 2016; Minderman et al. 2017). In den genannten Studien war die Zahl an Totfunden zwar gering, es ist allerdings zu beachten, dass die Anzahl der Totfunde nicht der tatsächlichen Schlagopferzahl entsprechen muss. Faktoren wie Sucheffizienz und Abtrageraten durch Prädatoren beeinflussen die Anzahl an gefundenen Schlagopfern. Eine visuelle Überprüfung von Schlagereignissen an KWEA – die verlässlichste Methode, um Kollisionen nachzuweisen – wurde bisher nur in einem Einzelfall durchgeführt (Alder 2017). Die Gründe, warum und unter welchen Bedingungen Fledermäuse mit KWEA kollidieren und wie sich die Tiere im Nahbereich der KWEA verhalten, konnten bisher aber nicht hinreichend geklärt werden. Es ist einerseits denkbar, dass KWEA von größerer Gefahr für die Fledermäuse sind als WEA, da sich der vom Rotor überstrichene Raum mit dem Aktionsraum von mehr Fledermausarten und -individuen überschneidet als bei großen Anlagen. Andererseits wäre aber auch denkbar, dass der kleinere und damit schneller drehende Rotor von den Tieren besser wahrgenommen werden kann und damit ein Ausweichen besser möglich ist als an WEA. In diesem

Fälle wären kleine Anlagen weniger gefährlich für die Fledermäuse als große WEA. Bislang liegen keine Daten vor, die die eine oder andere Hypothese stützen würden.

Zurzeit bestehen große Unsicherheiten, ob und ggf. wie der Artenschutz für Fledermäuse bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb von KWEA zu berücksichtigen ist, da aussagekräftige wissenschaftliche Studien bislang weitgehend fehlen. Alle europäischen Fledermausarten sind im Anhang IV der ‚Richtlinie 92/43/EWG zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen‘, kurz FFH-Richtlinie, erfasst. Damit haben europäische Fledermäuse auch außerhalb von Schutzgebieten einen besonderen Schutzstatus. Sie unterliegen dem Tötungsverbot gemäß § 44 Abs. 1 Nr. 1 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG). Werden beim Bau oder dem Betrieb von WEA Fledermäuse verletzt oder getötet werden, so wird gegen die artenschutzrechtlichen Verbotstatbestände verstoßen. Eine erhöhte Mortalität ist für Fledermäuse aufgrund ihrer Biologie und des speziellen Lebenszyklus besonders gravierend. Im Vergleich zu ähnlich großen Wirbeltieren, wie etwa Singvögeln, weisen Fledermäuse eine sehr lange Lebenserwartung und eine niedrige Reproduktionsrate auf (Kunz & Fenton 2003; Bernotat & Dierschke 2016; Dietz et al. 2016). Dadurch kann sich der Tod von Einzeltieren bereits stark auf den Erhalt einer Population auswirken, da ihr Reproduktionsvermögen sinkt. Generell wird daher empfohlen, Fledermauskollisionen an WEA so weit wie möglich zu vermeiden (HMUELV & HMWVL 2012; Richarz et al. 2013; LUBW 2014; MUGV 2014).

Um diese Verstöße zu vermeiden, werden bei der WEA-Planung verschiedene Maßnahmen ergriffen. Der Tötung von Fledermäusen durch betriebsbedingte Kollisionen kann durch spezifische Abschaltvorgaben wirkungsvoll begegnet werden. In der Windkraft-Planung hat sich je nach Bundesland ein Schwellenwert von ein (MUGV 2014; ITN 2015) bis zwei (Land Bayern 2011; HMUELV & HMWVL 2012; Richarz et al. 2012; UM et al. 2012; Behr & Rudolph 2013; LUBW 2014) toten Fledermäusen pro WEA und Jahr als signifikant erhöhtes Tötungsrisiko etabliert (Zusammenfassung siehe Bulling et al. (2015)). Ob gegenüber KWEA derselbe Schwellenwert angewandt werden sollte, bleibt fraglich, da diese ja deutlich weniger Energie pro Anlage bereitstellen als eine WEA. Sinnvoller wäre es, das Tötungsrisiko immer in Relation zur erbrachten Leistung einer Anlage zu betrachten.

### **1.3. Aktuelle Forschung und verbleibende Wissensdefizite**

Bisher befasste sich in Deutschland nur eine einzige Studie mit dem potenziellen Kollisionsrisiko von Fledermäusen an KWEA (Thomsen et al. 2020). Im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Berücksichtigung von Artenschutzbelangen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen“ (FKZ 3515830200) des Bundesamtes für Naturschutz wurden von März 2015 bis Mai 2018 erstmals in größerem Umfang Grundlagendaten zu den Auswirkungen von KWEA auf Vögel und Fledermäuse erhoben und beurteilt. An 14 Miniwindanlagen in Schleswig-Holstein wurden im Falle der Fledermäuse mit akustischen Dauererfassungen und mithilfe eines Abschaltexperiments Daten zur Beurteilung der Gefährdungssituation gesammelt.

Ferner wurde mit der oben genannten Vorgängerstudie erstmals das methodische Defizit bezüglich fehlender indirekter Rückschlüsse beseitigt, indem die akustische Erfassung durch Bildaufnahmen in Echtzeit ergänzt wurde. Eine im Forschungsvorhaben Renebat III von Dr. Klaus Hochradel konzipierte Stereo-Infrarot-Kamera wurde von Dr. Hendrik Reers auf die speziellen Anforderungen der Studie hin umgerüstet. Insgesamt wurden zehn Apparate in Eigenregie nach diesem Vorbild zusammengebaut. Dies ermöglichte, dass bis zu zehn KWEA gleichzeitig beprobt werden konnten. Zusätzlich zu dem Vorteil, dass nun die Fledermäuse und ihr Verhalten direkt beobachtet werden konnten, war es möglich die einzelnen Flugbahnen

raumscharf dreidimensional zu verorten und den genauen Abstand jedes einzelnen Flugpunktes zum Rotor zu errechnen.

In dem vom 30.07. bis 22.08.2016 durchgeführten Abschaltexperiment konnte weder anhand der akustischen Rufaufnahmen noch mittels der dreidimensional ausgewerteten Fledermausflugbahnen ein betriebsbedingtes Meideverhalten von Fledermäusen an KWEA festgestellt werden, ebenso wenig wurden Kollisionen aufgezeichnet. Bei den über zwei Jahre wöchentlich durchgeführten Schlagopfernachsuchen wurden keine Kollisionsopfer gefunden.

Die Ergebnisse aus Norddeutschland lassen sich aus folgenden Gründen jedoch nicht auf alle Standorte und Planungen von KWEA übertragen:

- Die untersuchten KWEA waren bereits mehrere Jahre in Betrieb. Es ist anzunehmen, dass die Kollisionsgefahr bei erstmaliger Inbetriebnahme einer Anlage am höchsten ist, da den Fledermäusen das neue Objekt in ihren Jagd- oder Transfergebieten noch unbekannt ist.
- An den norddeutschen Standorten wurde nur eine relativ geringe Fledermausaktivität verzeichnet– ggf. steigt die Gefahr von Kollisionen an Standorten mit höherer Fledermausaktivität, z. B. in Mittel- und Süddeutschland.
- Das Artenspektrum in Schleswig-Holstein ist im Vergleich zu Mittel- und Süddeutschland weniger divers, die häufigste an den KWEA beobachtete Art war die bodennah jagende Breitflügelfledermaus– es ist anzunehmen, dass bei einem breiteren Artenspektrum andere Verhaltensweisen auftreten und das Kollisionsrisiko ggf. steigt.

Über die potenzielle Gefährdungssituation an neu zu errichtenden KWEA lässt sich mithilfe der bislang gesammelten Daten wenig aussagen. Mit diesem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FKZ 3517 86 0600) hat man sich dem Aspekt des Erstschadens in einem Raum mit hoher Fledermausaktivität gewidmet.

#### **1.4. Projektziele und Forschungsfragen**

Ziel der hier vorliegenden Studie ist es, ergänzende Kenntnisse zu den Auswirkungen von KWEA auf Fledermäuse zu erhalten. Mit dem Vorhaben sollten zum einen die im vorhergehenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FKZ 3515830200) „Berücksichtigung von Artenschutzbelangen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen (KWEA)“ gewonnenen Erkenntnisse erweitert und zum anderen das Risikopotenzial neu errichteter KWEA ermittelt werden. Das Projektkonzept basiert auf einem experimentellen Forschungsansatz. Eine handelsübliche und eigens für die simulierten Szenarios umgerüstete Mikrowindanlage wurde an sechs Standorten mit hoher Fledermausaktivität aufgestellt. Aus der Vielzahl der verfügbaren KWEA-Typen wurde ein Bautyp ausgewählt, der sich mobil an verschiedenen Orten in wenigen Stunden auf- und wieder abbauen ließ und zugleich durch eine relativ niedrige Höhe gewährleistet, dass sich der Rotor im Hauptaufenthaltsbereich der meisten Fledermausarten befand. Gleichzeitig sind KWEA mit Horizontalachse und drei Rotorblättern in der Praxis der häufigste eingesetzte Bautyp. Die Interaktion zwischen KWEA und Fledermäusen wurde mittels einer eigens für das Projekt angepassten Stereo-Infrarot-Kamera sowie einer Wärmebildkamera dokumentiert. Parallel wurden akustische Fledermaus-Erfassungsgeräte eingesetzt, um die optisch aufgezeichneten Fledermäuse art- bzw. artgruppenspezifisch bestimmen zu können. Mit der Kombination aus optischen und akustischen Verfahren können präzisere Aussagen zu Verhaltensmustern von Fledermäusen an KWEA und zum Kollisionsrisiko abgeleitet werden als das in anderen Studien bisher möglich war. Durch die Standortwahl im süddeutschen Raum wurden zudem ein größeres Artenspektrum als in der oben genannten norddeutschen Vorgängerstudie und ein weiterer Naturraum abgedeckt.

Die detaillierten Verhaltensbeobachtungen von Fledermäusen an KWEA sollten dazu genutzt werden, den bisher in der Fachliteratur und Genehmigungspraxis unbeantworteten Fragen bezüglich des Risikopotenzials von niedrigen KWEA für Fledermäuse näher zu kommen.

Konkret sollten folgende Forschungsfragen untersucht werden:

1. Kollidieren Fledermäuse an KWEA und falls ja, in welchem Ausmaß? Wie effektiv ist ihr Ausweichverhalten im Rotorbereich?
2. Zeigen Fledermäuse eine unterschiedliche Reaktion auf verschiedene Rotorgeschwindigkeiten oder Rotorstillstand? Welche Faktoren beeinflussen den Abstand zum Rotor?

Bestandteil des Forschungsvorhabens war ein Expertenworkshop in der Außenstelle des BfN am 28.03.2019, bei dem insbesondere die Implikationen der Ergebnisse für die Genehmigungspraxis diskutiert wurden. Nach einer Vorstellung der Freilanduntersuchungen und deren Auswertung wurde in Kleingruppen erörtert, wie hoch das Kollisionsrisiko an KWEA einzuschätzen sei. Dazu wurden drei definierte Gruppen aus Gutachtern, Behördenvertretern und Fledermausschützern eingerichtet. Die Antworten und Diskussionsbeiträge aus diesem Expertenworkshop lieferten wichtige Aspekte, die sich in diesem Bericht (Kapitel 5) wiederfinden.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Projektorganisation**

Als Auftragnehmer hat das Freiburger Institut für angewandte Tierökologie (FrlnaT) unter der Projektleitung von Dr. Robert Brinkmann das BfN-Forschungsvorhaben übernommen. FrlnaT arbeitet in enger Kooperation mit Dr. Klaus Hochradel, der über einen Unterauftrag in das Projekt eingebunden wurde.

Im Freiburger Institut für angewandte Tierökologie (FrlnaT) waren folgende Mitarbeiter/innen am Projekt beteiligt:

- Dr. Stefanie Hartmann, Methodenentwicklung, Organisation und Koordination des Forschungsprojekts sowie Berichterstellung,
- Sören Greule, Durchführung der Experimente im Feld, Datenverarbeitung, statistische Auswertung der Daten sowie Berichterstellung,
- Felix Günther, Datenverarbeitung, statistische Auswertung der Daten sowie Berichterstellung,
- Bruntje Lüdtko, Projektkoordination, Durchführung der Experimente im Feld sowie Berichterstellung,
- Horst Schauer-Weisshahn, Methodenentwicklung, Entwicklung des experimentellen Equipments sowie Auswertung der Fledermausrufsequenzen,
- Dr. Robert Brinkmann, Organisation und Koordination des Forschungsprojekts sowie Berichterstellung.

An der privaten Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik UMIT waren folgende Mitarbeiter/innen am Projekt beteiligt:

- Dr. Klaus Hochradel, Methodenentwicklung und Datenverarbeitung des Stereo-Infrarot-Kamerasystems sowie Berichterstellung.

Ferner haben Herr Dr. Hendrik Reers (OekoFor GbR) die Kameraentwicklung, Herr Markus Wallschlag den Umbau der KWEA und Herr Christian Kernade (Deutsche Wildtierstiftung) das Experiment vor Ort dankenswerterweise unterstützt.

### **2.2. Untersuchungsstandorte**

Die Auswahl der Untersuchungsstandorte erfolgte im Wesentlichen unter zwei Kriterien: Zum einen sollten sie ein hohes Fledermausaufkommen aufweisen, um die Kontaktwahrscheinlichkeit zwischen KWEA und Fledermaus zu erhöhen, zum anderen mussten sie logistischen Anforderungen entsprechen. Die Untersuchungsstandorte benötigten einen geeigneten Untergrund zum Aufbau der mobilen KWEA sowie eine gute Anfahrmöglichkeit für das Equipment. Nicht zuletzt war eine kurze Erreichbarkeit von Freiburg vom Vorteil, da die KWEA jede Nacht auf- und abgebaut werden musste. Für die Auswahl wurden verschiedene, FrlnaT bereits bekannte Gebiete mit Flugstraßen, Jagdgebieten oder Quartiernähe einbezogen. Alle potenziellen Standorte wurden in Hinblick auf ihre aktuelle Fledermausaktivität Ende April/Anfang Mai 2018 begangen und beurteilt. Die sechs präferierten und schließlich beprobten Standorte (Abb. 1, Abb. 2) werden im Folgenden vorgestellt:

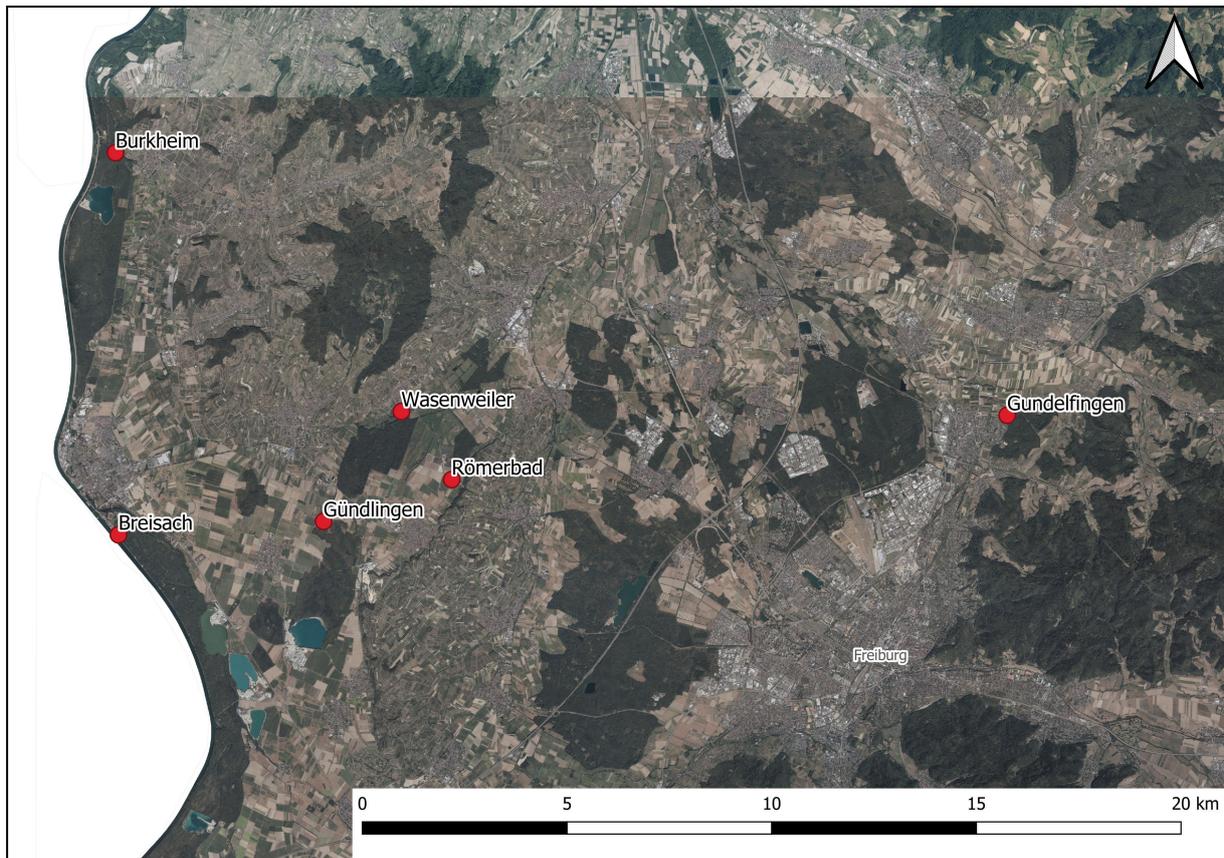


Abb. 1: Lage der sechs Untersuchungsstandorte im südwestdeutschen Naturraum um Freiburg. Bildgrundlage vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

- Wasenweiler: Flugstraße aus > 40 Bartfledermäusen und > 50 Zwergfledermäusen am Sportplatz/Bahnhof von Wasenweiler,
- Römerbad (archäologische Fundstätte am Waldrand bei Merdingen): Flugstraße von > fünf Mausohren, Jagdgebiet von Nyctaloiden und Pipistrelloiden,
- Burkheim: Quartier von > 250 Mückenfledermäusen, > 20 Zwergfledermäusen und einzelnen Rauhautfledermäusen am Klärwerk in Burkheim,
- Gundelfingen: Flugstraße von > 20 Zwergfledermäusen, Jagdgebiet der Breitflügelfledermaus und der Abendsegler-Arten am Waldrand bei Gundelfingen,
- Gündlingen: Flugstraße von > fünf Fransenfledermäusen am Scheidgraben in Gündlingen, Jagdgebiet von Mücken- und Zwergfledermäusen,
- Breisach: Jagdgebiet verschiedener Arten am Rhein bei Breisach.

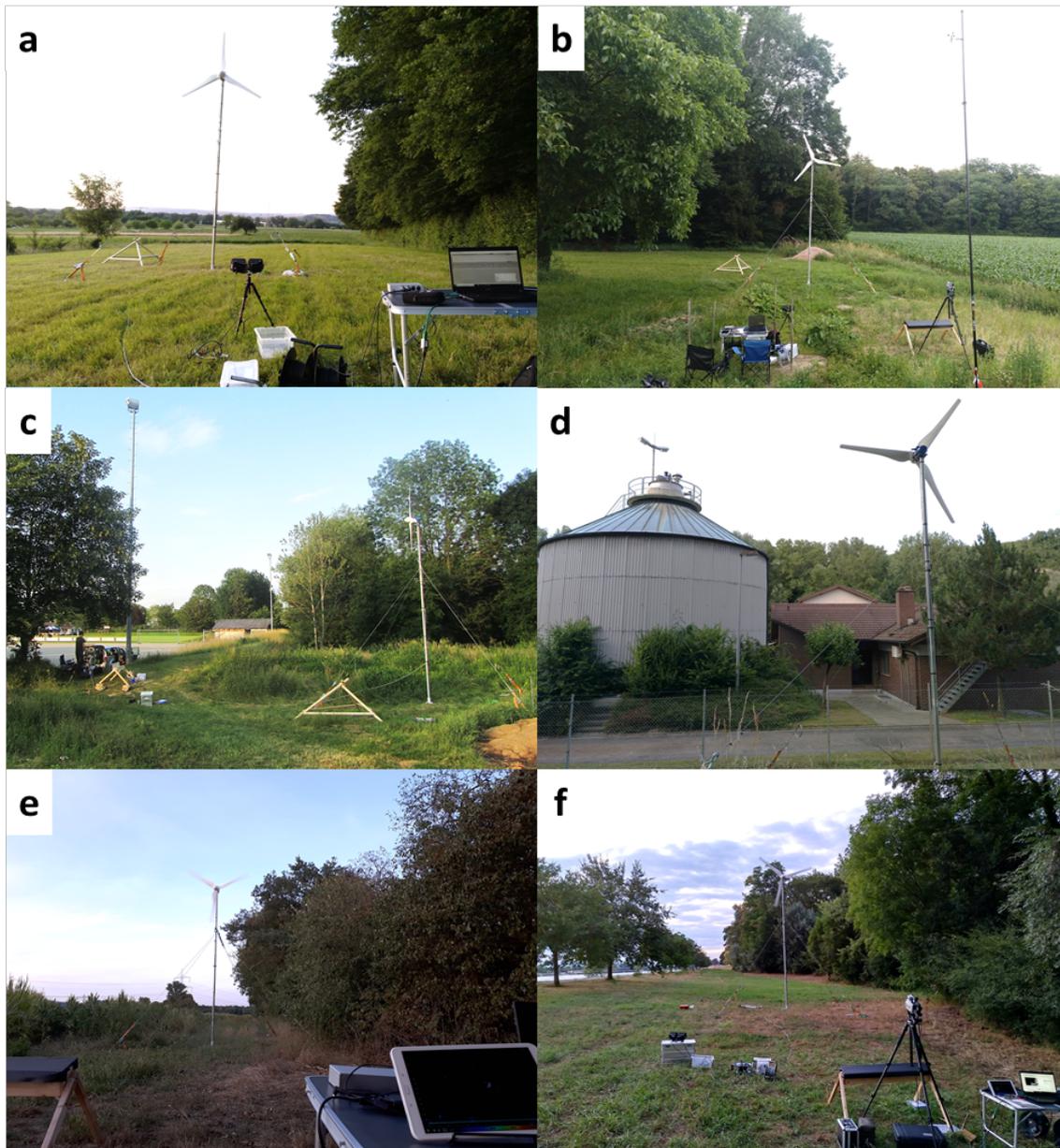


Abb. 2: Versuchsaufbau an den sechs Untersuchungsstandorten (a: Gundelfingen, b: Römerbad, c: Wasenweiler, d: Burkheim, e: Gündlingen, f: Breisach). Fotos: Sören Greule

### 2.3. Vermeidung der Beeinträchtigungen von Fledermäusen im Experiment

In einem Vorversuch am 08.05.2018 wurde die Möglichkeit erprobt, ob die KWEA während des Experiments mit Netzen abgeschirmt werden kann, sodass die Tiere kurz vor dem Einfiegen in den Gefahrenbereich gestoppt würden, eine Beinahe-Kollision aber als solche gut erkennbar sein würde. Dabei wurden sowohl vor als auch hinter der KWEA straff gespannte, sechs Meter breite und 7,8 m hohe Nylon-Monofilamentnetze (Netzgestell: High Flier Mist Net Support System, nhbs; Netze: Ultra Thin Mist Nets – M-20/6, Ecotone) aufgestellt. Da die gespannten Netze das Verhalten der Fledermäuse möglichst wenig beeinflussen sollten, um die eigentliche Interaktion der Tiere mit der KWEA beurteilen zu können, wurden die vertikalen Spannschnüre der Netze verlängert, um die Überlappungen (Netztaschen) zu beseitigen und die Sichtbarkeit der Netze für Fledermäuse zu verringern. Während des Tests wurden die Netze innerhalb von 40 Minuten 14-mal von Fledermäusen angefliegen, dabei aber von diesen

nur einmal nicht bemerkt. In 13 Fällen wichen die Fledermäuse dem Netz aus. Somit war anzunehmen, dass ein Netzaufbau zum Schutz der Fledermäuse das Experiment stark beeinflussen würde, sodass keine Kausalität zwischen KWEA-Aufbau oder Betrieb und dem Fledermausverhalten herzustellen wäre.

Deshalb wurde auf den Aufbau der Netze verzichtet und gemäß der Ausnahmegenehmigung des Regierungspräsidiums Freiburg (vom 05.04.2018, Aktenzeichen: 55-8852.44/100) das Experiment im Fall einer Fledermauskollision am betroffenen Standort vorzeitig beendet. Damit dies unverzüglich passieren konnte, wurde der Rotorbereich live von zwei Personen mit einem Nachtsichtgerät als auch einer Wärmebildkamera ununterbrochen beobachtet.

## **2.4. Experimentelle Untersuchung des Verhaltens und Kollisionsrisikos von Fledermäusen an KWEA**

### **2.4.1. Versuchsdesign und -aufbau**

Das Experiment wurde mithilfe einer handelsüblichen KWEA (Windturbine WKA 600, EAN 4251108115622, HeuSa GmbH, Rotordurchmesser 2,8 m, Nabenhöhe 6,1 m, Nennleistung 600 W) durchgeführt. Die KWEA-Gondel wurde allerdings durch einen Bremsmotor (MS 803-0,75 kW-6pol-B3) der Firma JS Technik ausgetauscht. Durch diesen Umbau ließ sich der Rotor auch ohne Wind beschleunigen, wobei er allerdings – außer bei festgestellter Bremse im Stillstand – durch Windeinwirkung weiter beschleunigt werden konnte.

Zwischen Ende Mai und Ende August 2018 wurde an allen sechs Standorten für vier bis fünf aufeinanderfolgende Tage in möglichst windstillen Nächten folgendes Experiment durchgeführt: Am ersten Tag wurde die Fledermausaktivität ohne KWEA aufgezeichnet. Hierzu wurde ein Kohlefasermast (im Folgenden als Teleskopstange bezeichnet) am geplanten KWEA-Standort aufgestellt, um die akustische Erfassung in gleicher Höhe wie an den Folgetagen mit KWEA zu ermöglichen. Am zweiten und dritten Tag wurde die KWEA einmal außer Betrieb (stehender Rotor) und einmal auf maximale Motorleistung gestellt. Am vierten Tag lief die KWEA mit halber Motorleistung, um zu untersuchen, wie sich unterschiedliche Rotorgeschwindigkeiten auf das Verhalten und die Kollisionsgefährdung der Tiere auswirken. Der fünfte Tag diente dazu, gewisse Settings zu wiederholen, falls an den Vortagen wetterbedingt der angestrebte zeitliche Untersuchungsumfang nicht erreicht werden konnte. Ein genauer Überblick über die Laufzeiten der unterschiedlichen Betriebsmodi pro Standort findet sich im Anhang 9.1.

Das Experiment wurde an jedem Abend eine halbe Stunde vor Sonnenuntergang gestartet und zur Hauptaktivitätszeit der Fledermäuse bis 2,5 Stunden nach Sonnenuntergang durchgeführt. Bei Gewitter oder Starkregen wurde das Experiment pausiert und anschließend um die wetterbedingt verlorengangene Zeit weitergeführt. Bei kurzem leichten Regen wurde das Experiment fortgeführt.

In Gündlingen und Breisach wurde das Experiment im August, also während bzw. nach der Wochenstubezeit, durchgeführt. Im Vergleich zu den übrigen Standorten war hier auch mit der Anwesenheit von Jungtieren zu rechnen.

Die Interaktion zwischen KWEA und Fledermäusen wurde auf dreierlei Weisen dokumentiert:

- Live-Beobachtung mit Nachtsichtgeräten durch zwei Personen,
- Videodokumentation durch eine Wärmebildkamera der Firma „Infratec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden“,

- Videodokumentation durch eine eigens für das Projekt angepasste Stereo-Infrarot-Kamera, Betreuung und Auswertung durch Dr. Klaus Hochradel, UMIT (Institut für Mess- und Sensortechnik).

Um die Sichtbarkeit der Fledermäuse auf den Infrarot-Kameraaufnahmen zu verbessern, wurde die KWEA mit zwei Infrarotstrahlern (IR06/60 850NM, Indexa) ausgeleuchtet (Abb3). Während das Nachtsichtgerät und die Wärmebildkamera hauptsächlich zum Zwecke des Risikomanagements (sofortige Abschaltung im Kollisionsfall) und der Live-Beobachtung vor Ort dienen, lieferte die Stereo-Infrarot-Kamera die Datenbasis für die weiteren Auswertungen.

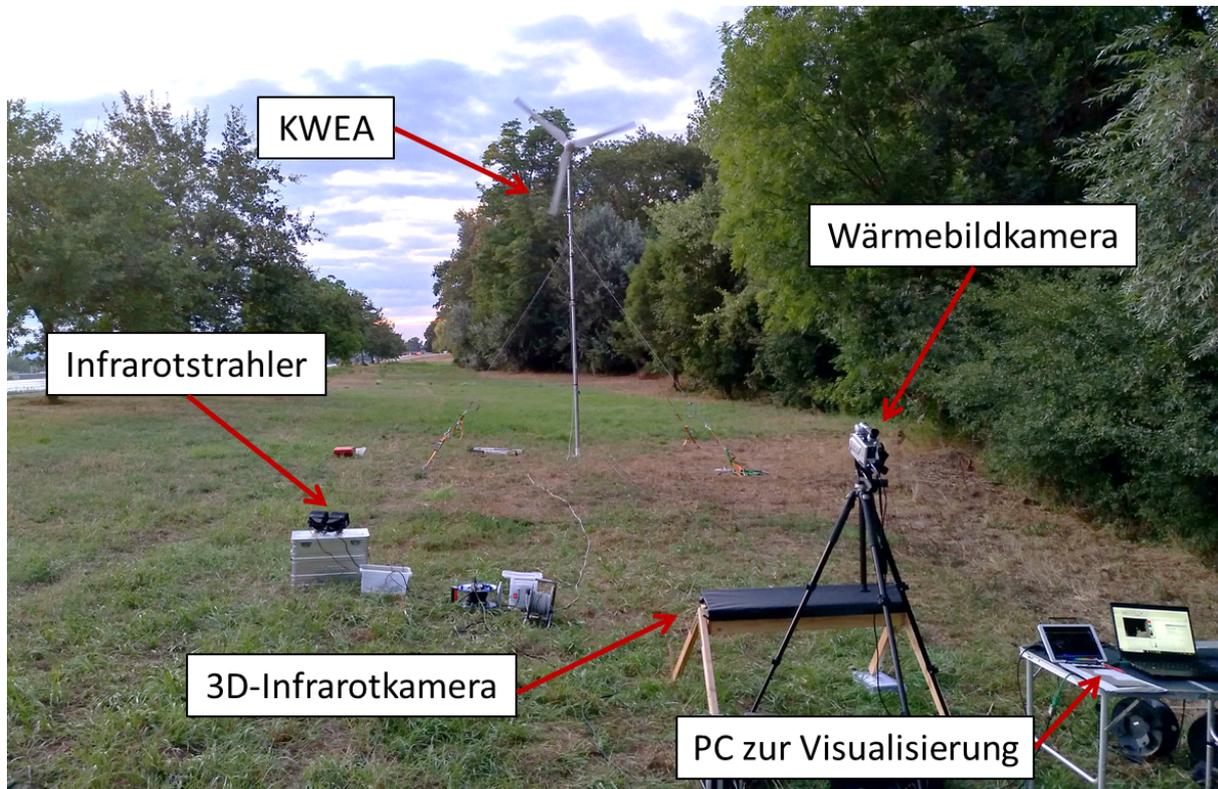


Abb. 3: Aufbau des Experiments (hier am Standort Breisach). Foto: Sören Greule

#### 2.4.2. Meteorologische Daten

Aus zahlreichen Studien ist bereits bekannt, dass sowohl meteorologische Faktoren als auch standortspezifische Parameter Auswirkungen auf die Fledermausaktivität haben (Verboom & Huitema 1997; Verboom & Spoelstra 1999; Rydell et al. 2010; Baerwald & Barclay 2011; Bach et al. 2012; Cryan et al. 2014; Kelm et al. 2014; Reichenbach et al. 2015; Moyle 2016). Um die Einflusswirkung von Windgeschwindigkeit, Temperatur und Helligkeit auf die Aktivität von Fledermäusen an den KWEA-Standorten bei den statistischen Auswertungen zu berücksichtigen und diese kontrollieren zu können, wurden verschiedene Parameter an den KWEA-Standorten aufgenommen: Während des Experiments wurden minütlich Windmessungen (Windmessgerät PCE-ADL 11, PCE Instruments) durchgeführt. Es wurden zwei Windmesser auf Rotorhöhe an der Teleskopstange auf je gegenüberliegenden Seiten befestigt. Am ersten Tag stand die Teleskopstange mit den Windmessern am geplanten KWEA-Standort, in den folgenden Tagen 15 - 20 m entfernt.

In 15-Minuten-Intervallen wurden Temperaturmessungen und relative Luftfeuchtheitsmessungen (EasyLog EL-USB-2, LASCAR Electronics) durchgeführt. Der Temperaturlogger

wurde am Fuß der KWEA auf etwa einem Meter Höhe befestigt. Durch Ausfälle der Messinstrumente lagen am Standort Gundelfingen an allen Terminen und am Standort Römerbad am 04.06.2018 keine Daten zur Windgeschwindigkeit vor. Am Standort Gündlingen fehlten hingegen am 06.08.2018 die Temperaturdaten. Als Näherungswert für die Helligkeit wurde die globale Solarstrahlung des Deutschen Wetterdienstes verwendet (BMW 2018). Diese lag als Zehn-Minuten-Summe in  $\text{J}/\text{cm}^2$  vor.

### **2.4.3. Stereo-Infrarot-Kamera**

Im vorangegangenen Forschungsprojekt „Berücksichtigung von Artenschutzbelangen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen“ wurde ein neuartiges optisches System entwickelt, um Fledermäuse im Nahbereich von KWEA zu dokumentieren. Das Stereo-System basierte auf zwei infrarotlicht-empfindlichen Kameras und einem Infrarot-Strahler. Durch die Anwendung dieses bildgebenden Verfahrens konnte das Verhalten der Fledermäuse an den KWEA und besonders im Gefahrenbereich des Rotors direkt und reproduzierbar über lange Zeiträume beobachtet werden. Über eine zeitliche Verknüpfung der akustischen Daten mit den stereo-optischen Beobachtungen konnte sogar eine Artbestimmung dieser Fledermäuse erfolgen. Die Kamera wurde ursprünglich im Rahmen des BMW-Forschungsvorhabens RENEBAT III von Klaus Hochradel entwickelt. Das eingesetzte System wurde mit den Erfahrungen des Vorgängervorhabens verbessert und auf die hier vorgestellte Methodik angepasst.

#### **Aufbau des Kamerasystems**

Der Aufbau des Kamerasystems basiert auf zwei Raspberry Pi Einplatinencomputern (Single Board Computer: SBC), die zwei Infrarot-Kameras (Modell Pi NoIR mit CS Linse) ansteuern (Abb. 4). Um mit den Kameras zeitsynchron aufzunehmen, wurde für die unabhängig arbeitenden SBCs eine Hard- und Softwarelösung entwickelt. Für korrekte Zeitstempel der Aufnahmen sorgte ein GPS Modul, über das zu Beginn der Messnacht die Zeit abgefragt und eingestellt wurde. Mit den korrekten Zeitstempeln wurden die Videosequenzen auf externen USB Speichern mit 64 Gigabyte Kapazität gespeichert. Zur leichteren Bedienung des Kamerasystems und zur Kontrolle des Blickfeldes wurde ein kleiner Bildschirm installiert. Dieser ermöglichte es, die Ausrichtung des Kamerasystems und des Infrarotstrahlers zu prüfen. Die Stromversorgung wurde durch einen Akku gewährleistet, welcher tagsüber geladen wurde. Der Akku versorgte beide Raspberry Pis und die Kameras, der Infrarotstrahler wurde an den eingesetzten Generator angeschlossen.

Das NoIR-Kameramodul der Firma Watterott basierend auf dem  $\frac{1}{4}$ " CMOS Sensor der Firma OmniVision bietet als Besonderheit die Möglichkeit, andere Objektive mittels eines CS Bajonetts anzuschließen. Die Kameramodule besitzen keinen Infrarotlichtfilter und können in Kombination mit einem Infrarotstrahler für die nächtliche Aufzeichnung von Fledermäusen genutzt werden. Als Infrarotbeleuchtung kamen zwei Strahler vom Typ IR06/60 850NM der Firma Indexa zum Einsatz. Im Vorgängervorhaben konnten Fledermäuse bis auf 20 m Distanz gut detektiert werden.

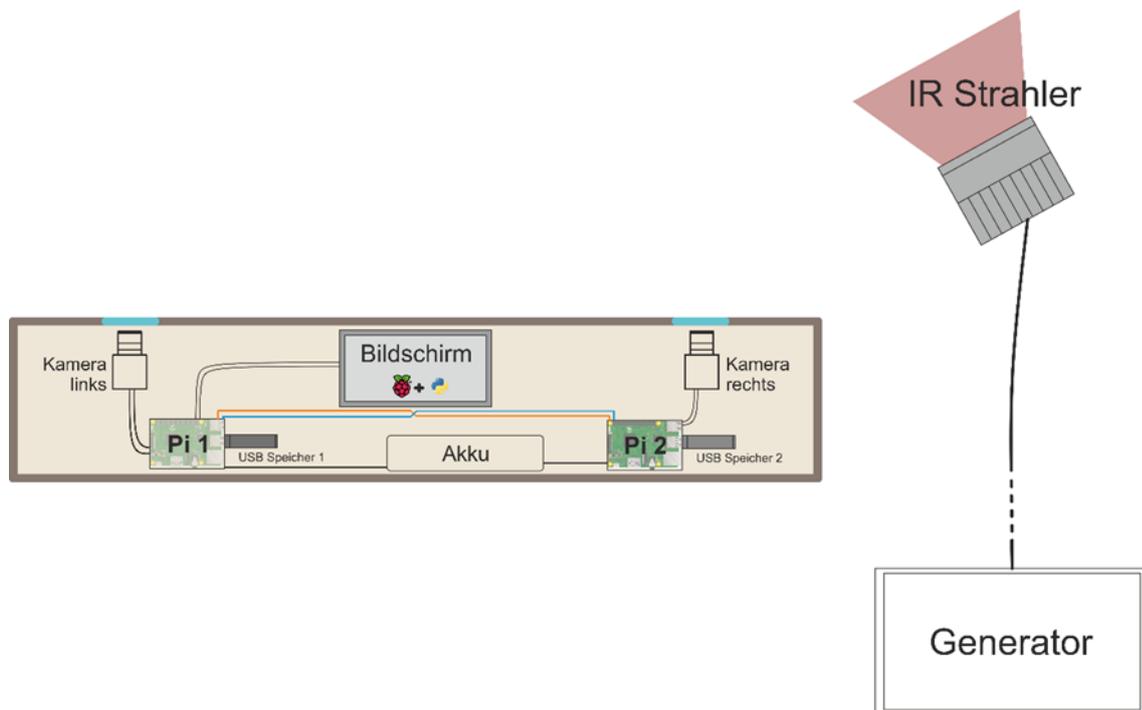


Abb. 4: Schematische Darstellung des Aufbaus der Stereo-Infrarot-Kamera mit den wichtigsten Komponenten.

### Bilderfassung mit dem Kamerasystem

Das Stereo-System arbeitete mit einer Bildfrequenz von 15 Bildern pro Sekunde. Dieser Wert wurde im Vergleich zum Vorgängervorhaben erhöht, um eine höhere zeitliche Auflösung zu erhalten. Während der Versuchsphase war es dadurch nötig, nach jeder Erfassungsnacht die USB-Speicher des Systems zu sichern. Zum Erreichen dieser Bildfrequenzen wurde der von der Kamera zur Verfügung gestellte Video-Port verwendet. Statt Einzelbilder aufzunehmen, wurden hier Videosequenzen bestehend aus 1500 Bildern im H264-Format gespeichert. Dieser Modus erlaubt höhere Bildwiederholungsraten bei verbesserter Bildqualität im Vergleich zum Vorgängervorhaben. Trotz der Verbesserungen der Bildqualität und der zeitlichen Auflösung, ermöglichen diese Aufnahmen weiterhin keine Arterkennung.

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Funktionalität des Kamerasystems war die zeitliche Synchronisierung der Einzelbilder der beiden Kameras. Um am Ende der Auswertung ein über beide Kameras aufgenommenes Objekt einer 3D-Position zuordnen zu können, ist es nötig, die Bilder der linken und rechten Kamera zu synchronisieren. Das entwickelte Gesamtsystem ist autark und auf keinerlei Anschlüsse angewiesen. Es ist somit keine Netzwerkverbindung für das NTP-Protokoll und darüber hinaus kein interner Zeitgeber, z. B. eine Realtime-Clock, auf dem Raspberry Pi vorhanden. Uhrzeit sowie Datum sind dem System somit nicht bekannt. Um dieses Problem zu lösen und die Dateien mit einem Zeitstempel aufzuzeichnen, wurde einer der beiden SBC mit einem GPS-Modul ausgestattet (Abb. 4). Dieser SBC stellt mit der korrekten Uhrzeit einen NTP-Server zur Verfügung, womit der zweite Computer auch die Uhrzeit des GPS-Satelliten erhält.

Um die nachträgliche Zuordnung der linken und rechten Bilder zu vereinfachen, wurden beide SBC mit Hilfe von digitalen I/O Pins verbunden. So war es möglich, nach einer gewissen Anzahl an aufgenommenen Bildern zu kontrollieren, ob das jeweils andere System diese Aufnahmen ebenso abgeschlossen hatte, um anschließend wieder zeitgleich die Aufnahme der Videosequenz einzuleiten. Diese Abfragen nehmen eine kurze Zeit in Anspruch und verursachen

somit ‚Blindzeiten‘ in denen keine Bilder aufgezeichnet werden. Um diese Zeiten zu minimieren, wählten wir ein Prüfintervall von 1.500 Bildern. Bei dieser Intervallgröße lagen die ‚Blindzeiten‘ unter einer Sekunde. In der Auswertung wurde zudem eine exakte zeitliche Software-synchronisierung der Erkennung aus linker und rechter Kamera implementiert (Hochradel et al. 2019).

### Technische Umsetzung und Erfassung im Feld

Der erneuerte schematische Aufbau aus Abb. 4 wurde basierend auf dem Aufbau des Vorgängervorhabens in die Praxis umgesetzt. Von zentraler Bedeutung bei der Umsetzung waren die Steuerbarkeit im Feld und die Zuverlässigkeit. Um das Aufnahmesystem im Feld aufstellen zu können, wurde die speziell angefertigte Holzkonstruktion des vorangehenden Projekts verwendet, wobei die Solarpaneele, Laderegler und Taukappen im vorliegenden Fall nicht mehr benötigt wurden.

Die Kamerasysteme wurden, je nach örtlichen Gegebenheiten, in einer Entfernung von ca. 11 oder 14 m zum Mast der KWEA aufgestellt. Die Strahler wurden, wenn möglich, in einer Entfernung von zwei bis drei Metern zwischen der Kamera und der KWEA positioniert, um die Aufzeichnung von Insekten in direkter Nähe zur Kamera zu vermeiden (Abb. 5, Abb. 6). Der effektive Sichtbereich ergibt sich aus dem Öffnungswinkel beider Kameras und der Abstrahlcharakteristik des Infrarotstrahlers. Der Sichtbereich wurde durch manuelle Kontrolle des Sichtfelds an allen Standorten gleich gehalten. In Burkheim wurde der Rotor seitlich gefilmt, damit die Rotorfläche im rechten Winkel zur vermuteten Ausflugrichtung aus den Quartieren stand. An allen anderen Standorten wurde die Rotorfläche frontal zur Kamera ausgerichtet.

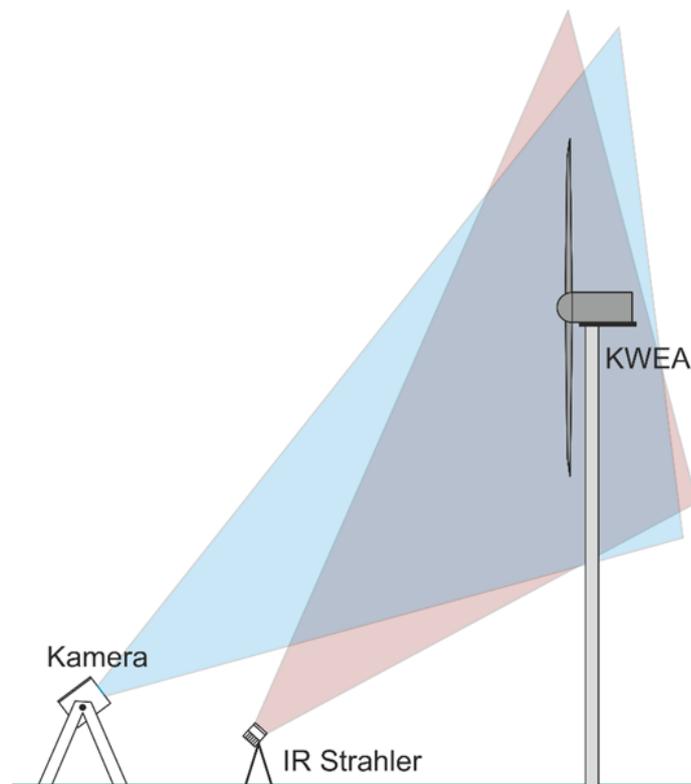


Abb. 5: Schematische Darstellung der Aufnahmesituation an den KWEA. Die blauen und roten Bereiche markieren den jeweiligen Blickwinkel der Kamera bzw. des IR-Strahlers; der überlappende Bereich markiert den tatsächlichen Aufnahmebereich.

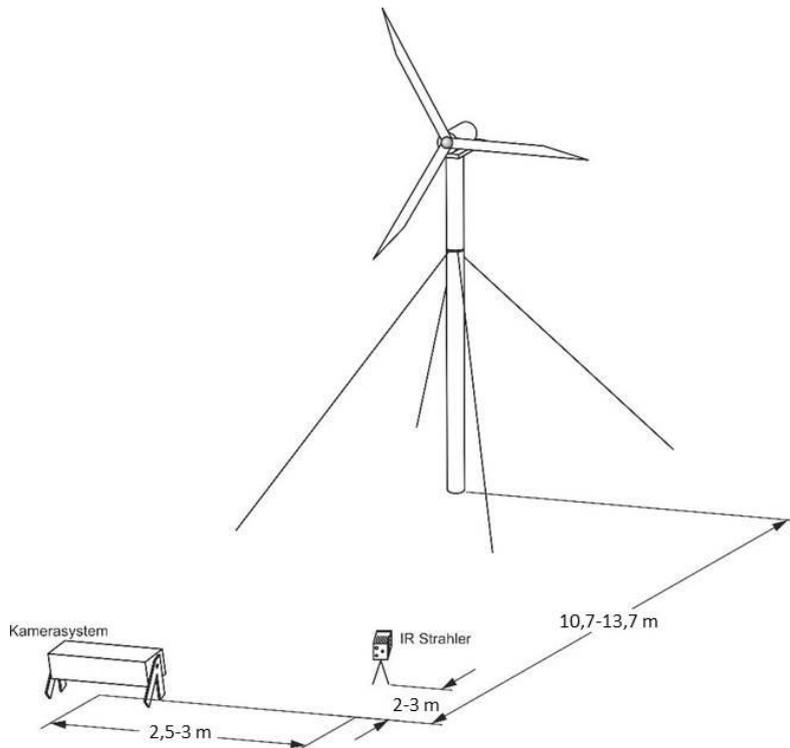


Abb. 6: Schematische Darstellung des geometrischen Aufbaus an der KWEA.

### Softwaresteuerung des Kamerasystems

Die Programmierung der Messautomatisierung sowie die Überwachung des Systems wurden in der interpretierbaren Programmiersprache *python*<sup>TM</sup> sowie Linux Shell realisiert. Unterschiedliche Programme steuern jeweils die Kameraaufnahme, die Sensordatenerfassung und die Überwachung des Systems. Einrichtung, Bildkontrolle und Ausrichtung des Systems erfolgten über den installierten kleinen Bildschirm.

Die Automatisierung wurde durch verschiedene Programme umgesetzt. Da verschiedene Aufgaben vorhanden waren und diese auch überwacht werden mussten, wurde jede Aufgabe in einem separaten Programm abgearbeitet. Abb. 7 zeigt eine Übersicht des Programmablaufs: Nach Abschluss des Bootvorgangs startete das eine Raspberry Pi das GPS-Modul und wartete auf Empfang und damit auf eine korrekte Uhrzeit, welche von den Satelliten geliefert wird. Beide Raspberry Pis starteten anschließend einen Zeitserver, wodurch eine Zeitsynchronisierung erreicht wurde. Die korrekte Uhrzeit beider Raspberry Pis konnte auf dem eingebauten Monitor überprüft werden. Nachdem die Uhrzeit aktualisiert und das System auf die KWEA ausgerichtet wurde, startete das Aufnahmeprogramm durch manuelle Eingabe. Dieser Hauptaufnahmeprozess wurde ebenfalls von einem Watchdog überwacht. Wurde ein Fehler im Ablauf festgestellt, leiteten die Watchdogs einen Neustart beider Raspberry Pis ein. Die Aufnahme lief bis zum manuellen Beenden des Programms.

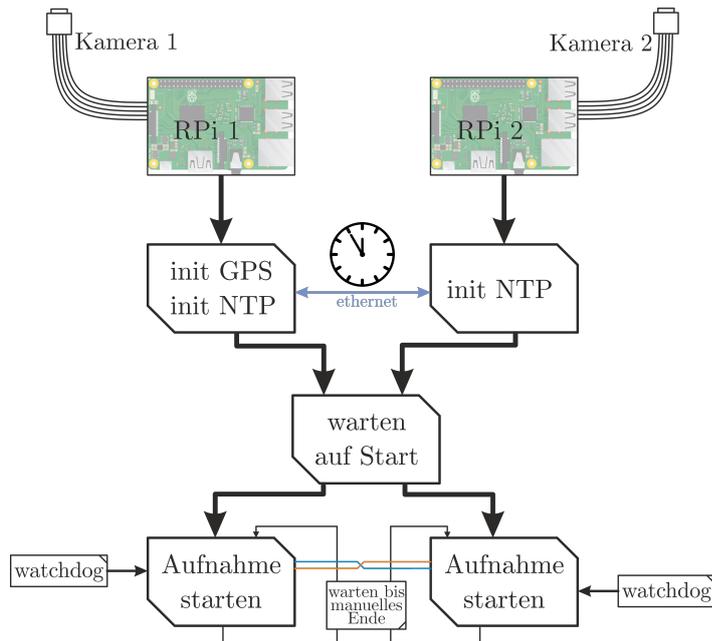


Abb. 7: Programmablauf des Stereo-Kamera-Systems; nach erfolgreicher Uhrzeiteinstellung durch das GPS-Modul wartet das System bis zum manuellen Start.

#### 2.4.4. Akustische Erfassung

Parallel zu den optischen Verfahren wurden auch akustische Aufnahmen durchgeführt, um den dokumentierten Fledermausflugbahnen später eine Fledermausart bzw. -artengruppen zuordnen zu können. Hierfür wurden zwei Elektret Ultraschallmikrofone Knowles FG (Avisoft Bioacoustics, Glienike/Deutschland) in vier Meter Höhe an der KWEA bzw. am Teleskopmast parallel zur Rotorachse angebracht. Die Mikrofone zeigten dabei in entgegengesetzte Richtungen, so dass Echoortungsrufe aus beiden Richtungen aufgezeichnet werden konnten. Ein Mikrofon war zu Beginn des Experiments am Standort Gundelfingen defekt und wurde sofort ausgetauscht, um den Datenverlust gering zu halten. Die Trigger Sensitivität der Mikrofone wurde während des Experiments mehrfach angepasst, um die Überlagerung der Fledermausrufe durch Heuschreckenrufe zu verhindern. Da die Mikrofone während des Experiments an einen Laptop angeschlossen wurden, waren die Aufnahmen über die PC-interne Real-Time-Clock synchronisiert. Da die Mikrofone nicht immer die gleiche Trigger Sensitivität hatten, war die Anzahl der Aufnahmen nicht proportional zur Fledermausaktivität und konnte nur für die Zuordnung von Rufen zu Flugbahnen bzw. zur Erstellung eines Artenspektrums pro Standort verwendet werden, aber nicht für eine weiterführende statistische Auswertung bezüglich der Fledermausaktivität.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte am Computer mit der Software BATscreen V 1.0.5 (bat bioacousticstechnology GmbH, Winkelhaid). Alle akustischen Aufnahmen, die mit einem maximalen Abstand von 40 s zu einer Flugbahn aufgezeichnet wurden, wurden visuell geprüft und manuell Gruppen, Gattungen, Artpaaren oder Arten zugewiesen (Tab.1).

Tab. 1: Bestimmungskategorien für die Zuordnung der Aufnahmen der akustischen Erfassungen.

Kategorie	Erläuterung
Art / Artpaar	Auf Art- oder Artpaarebene wurden nur die Arten bestimmt, bei denen eine eindeutige akustische Bestimmung erfolgen kann. Eine Bestimmung erfolgte bei Erfüllung folgender Kriterien: Abendsegler ( <i>Nyctalus noctula</i> ), Hauptfrequenz $\leq 20$ kHz Rauhaut-/Weißrandfledermaus ( <i>Pipistrellus nathusii/kuhlii</i> ), Hauptfrequenz 35-40 kHz Zwergfledermaus ( <i>Pipistrellus pipistrellus</i> ), Hauptfrequenz 42-50 kHz Mückenfledermaus ( <i>Pipistrellus pygmaeus</i> ), Hauptfrequenz 52-60 kHz
<i>Myotis</i>	beinhaltet Rufsequenzen der Arten aus der Gattung <i>Myotis</i>
Nyctaloid	kann Rufsequenzen von Breitflügelfledermaus ( <i>Eptesicus serotinus</i> ), Nordfledermaus ( <i>E. nilssonii</i> ), Kleinabendsegler ( <i>Nyctalus leisleri</i> ), Abendsegler ( <i>N. noctula</i> ) und Zweifarbfledermaus ( <i>Vespertilio murinus</i> ) beinhalten
<i>P.</i> hoch	beinhaltet Rufsequenzen aus dem Überschneidungsbereich der Rufparameter der Zwergfledermaus und Mückenfledermaus (Hauptfrequenz 50-52 kHz)
<i>P.</i> tief	beinhaltet Rufsequenzen aus dem Überschneidungsbereich der Rufparameter der Zwerg-, Weißrand- und Rauhautfledermaus (Hauptfrequenz 40-42 kHz)
Pipistrelloid	beinhaltet Rufsequenzen der vier <i>Pipistrellus</i> -Arten, die nicht eindeutig zuzuordnen sind, z. B. Fragmente

## 2.5. Aufbereitung der Felddaten für die statistischen Analysen

### 2.5.1. Umwandlung der Motorleistungen in Rotorgeschwindigkeitsklassen

Um mögliche Unterschiede im Fledermausverhalten gegenüber der Teleskopstange, der stillstehenden KWEA und der verschiedenen Rotorgeschwindigkeiten untersuchen zu können, mussten die eingesetzten Motorleistungen (volle und halbe Leistung) in eine für die statistische Analyse geeigneter Form überführt werden. Vor dem Hintergrund, dass der Wind eine zusätzliche Geschwindigkeitserhöhung bewirkte, ergaben sich aus den zwei eingesetzten Motorleistungen tatsächlich vier Geschwindigkeitscluster in den Rohdaten (Abb. 8). Aus diesen wurden dann vier Rotorgeschwindigkeitsklassen als kategoriale Variablen gebildet. Dazu wurde basierend auf den IR-Aufnahmen die mittlere Rotordrehzahl pro Video (100-s-Länge) berechnet. Durch eine Fourier-Analyse ausgewählter Rotorbereiche wurde die dominante Rotationsfrequenz ermittelt und über das jeweilige 100-s-Intervall gemittelt. Aufgrund des Nyquist-Abtasttheorems kann mit einer Bildwiederholrate von 15 Bildern pro Sekunde maximal eine Rotationsgeschwindigkeit von 150 Umdrehungen pro Minute (U/min) aufgelöst werden. Jeder Flugbahn wurde die Rotordrehzahlmessung mit kleinstem Zeitabstand zugewiesen. Im Histogramm der gesamten Rotordrehzahlaufzeichnungen an allen Standorten sind die vier bereits beschriebenen Verteilungsschwerpunkte erkennbar (Abb. 8). Indem diese als erklärende Faktoren in die folgenden statistischen Modelle eingespeist werden können, lassen sich Aussagen darüber treffen, inwieweit sich Kollisionsgefahr oder der Abstand, den die Tiere zum Rotor halten, abhängig davon ändern, wie schnell sich der Rotor drehte.

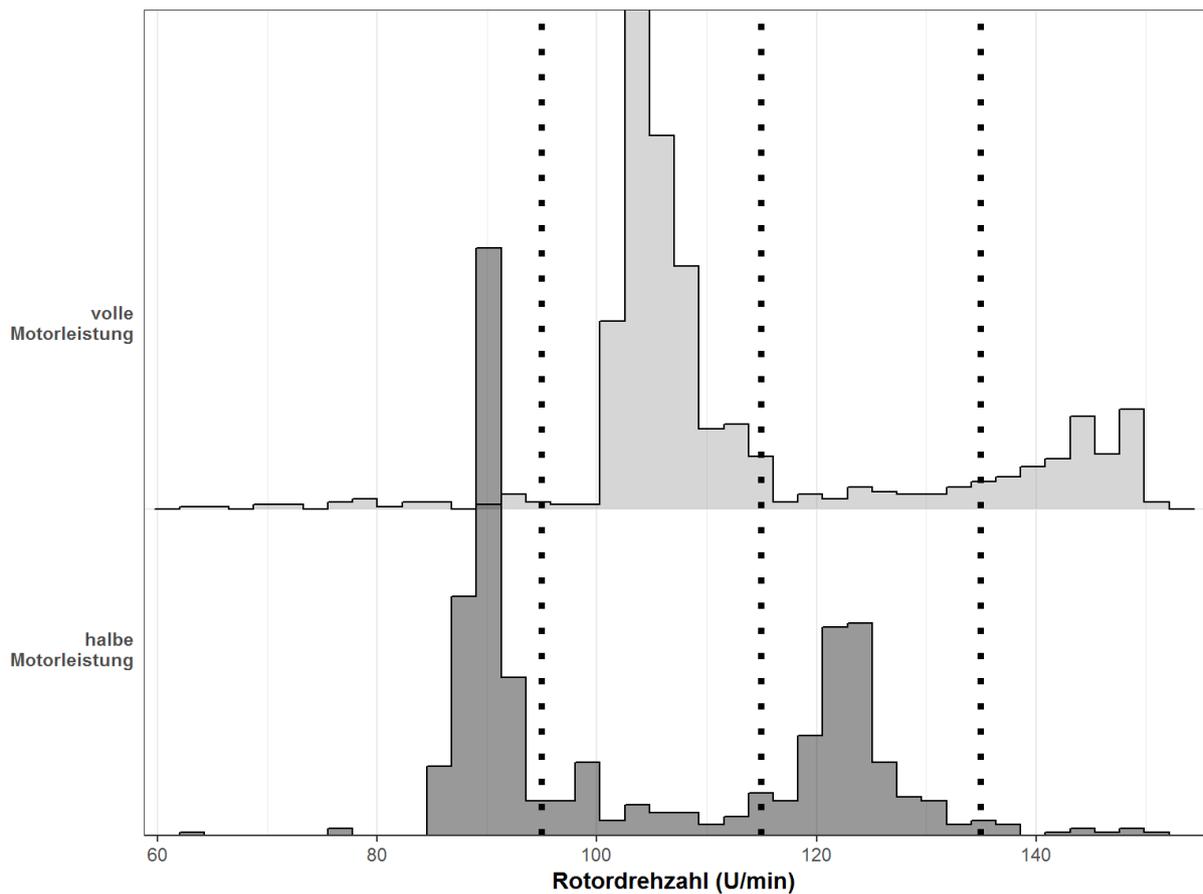


Abb. 8: Häufigkeit der verschiedenen Rotordrehzahlen, die bei halber und voller Motorleistung erreicht wurden. Die gestrichelten Linien stellen die Klasseneinteilung der Rotorgeschwindigkeiten in U/min dar: Klasse 1 : > 95 U/min , Klasse 2: > 95 - 115 U/min , Klasse 3: > 115 - 135 U/min, Klasse 4: > 135 U/min.

Die Anlage drehte sich mit durchschnittlich etwa 88 U/min und 102 U/min bei erzeugter halber und voller Motorleistung, wenn diese nicht durch Wind beeinflusst wurde. Diese Konstellation wurde während eines Großteils des Experiments erreicht. Zwei weitere Maxima der Häufigkeitsverteilung entstanden bei proportional höheren Geschwindigkeiten, wenn der Rotor durch Wind beschleunigt wurde (Abb. 8). Wenn im Feld eine windbedingte Verlangsamung des Rotors bemerkt wurde, wurde die Drehrichtung des Motors, und damit auch des Rotors, entsprechend der Windrichtung ausgerichtet. Rotordrehzahlen unter 60 U/min sind das Resultat von Bildrauschen bei stehendem Rotor und wurden vermutlich meistens nach Experimentende aufgezeichnet, wenn die Kamera noch lief, aber der Motor bereits ausgeschaltet war. Deshalb wurden alle Messungen mit Rotordrehzahlen < 60 U/min als Stillstand eingestuft. Insgesamt entstanden durch diese Einteilung sechs Experimentsettings: Teleskopstange, Stillstand und Rotorgeschwindigkeitsklassen 1 – 4 (Abb. 8). Die Klassen wurden wie folgt eingeteilt:

- Rotorgeschwindigkeitsklasse 1: 60 - 95 U/min (32 - 50 km/h an der äußeren Rotorspitze),
- Rotorgeschwindigkeitsklasse 2: 96 - 115 U/min (51 - 60 km/h an der äußeren Rotorspitze),
- Rotorgeschwindigkeitsklasse 3: 116 - 135 U/min (61 - 71 km/h an der äußeren Rotorspitze),
- Rotorgeschwindigkeitsklasse 4: > 135 U/min (>72 km/h an der äußeren Rotorspitze).

An den meisten Standorten traten die Rotorgeschwindigkeitsklasse 3 und 4 in deutlich geringeren Zahlen auf als 1 und 2, da es während des Experiments nur in seltenen Fällen windig war (Anhang 9.2).

### **Bildverarbeitung, Objekterkennung und Triangulation**

Die während des Experiments aufgezeichneten Videosequenzen wurden durch eine automatisierte Auswertung auf bewegte Objekte in beiden Kameraansichten reduziert (Hochradel et al. 2019). Durch manuelle Nachkontrolle wurden richtig-positive Erkennungen markiert und für die Triangulation vorbereitet. Dies geschah, um anschließend für jeden Fledermaus-Flugpunkt die genaue dreidimensionale Lage im Raum bzw. in Relation zum Rotor errechnen zu können.

Mit der aktualisierten Aufzeichnungssoftware wurde die Anzahl an Dateien im Vergleich zum Vorgängervorhaben deutlich reduziert, was die Berechnungsdauer der Objekterkennung deutlich verkürzte. Die Erkennung wurde durch die automatisierte Vorauswahl verbessert, trotz der gleichbleibenden Herausforderung der geringen Pixelanzahl der Fledermaus (abhängig von der Distanz, minimal 5 Pixel). Zudem handelte es sich um Graustufenbilder, was in einem schwachen Kontrast zwischen Fledermaus und Umgebung resultierte. Weiterhin beinhalteten die Videosequenzen auch Bildrauschen sowie die sich bewegende Umgebung (etwa Büsche oder Bäume). Die entwickelte Objekterkennung wurde in „Mathworks Matlab“ implementiert und umfasst mehrere Schritte, um Fledermäuse zuverlässig automatisch zu erkennen. Diese Auswertung ist rechenintensiv und wurde auf einem leistungsfähigen PC mit 64 GB Arbeitsspeicher sowie einer CUDA-fähigen Grafikkarte ausgeführt. Durch die eingesetzte Grafikkarte war es möglich die Rechenzeit um etwa 75 % – verglichen mit der Berechnung einer CPU – zu reduzieren. Die Extrahierung der Fledermauspositionen auf beiden Kameras lief nach folgendem Schema ab:

1. Automatisierte Detektion bewegter Objekte mittels gleitender Varianz
2. Filterung der KWEA
3. Manuelle Nachkontrolle und Markierung richtig-positiver Detektionen
4. Zeitsynchronisierung durch Korrelation in der y-t-Domäne (Hochradel et al. 2019)
5. Triangulation der resultierenden Erkennungen beider Kameras
6. Manuelle Nachkontrolle der 3D Flugbahnen.

Für in beiden Bildern übereinstimmende Punkte, wurden die 3D-Koordinaten bestimmt. Wie im Vorgängervorhaben wurde eine homogene DLT Methode („Direct Linear Transformation“) angewendet: Zuerst wurde der Aufbau mit Hilfe eines Schachbrettmusters kalibriert. Bei der Kalibrierung wurde aus den bekannten Maßen und denselben Punkten eines Schachbrettmusters auf beiden Kameras die Fundamental-, die Translations- und Rotationsmatrix des Stereosystems berechnet. Details zur verwendeten Triangulations- und Kalibriermethode finden sich in Hartley & Zisserman (2003).

Jedem Triangulationsergebnis wurde im Anschluss ein Zeitstempel zugewiesen. Da die einzelnen Bilder der Videosequenzen keinen Zeitstempel beinhalteten, wurde dieser anhand des Dateizeitstempels und der Framenummer bei bekannter Bildfrequenz berechnet. Zeitlich und örtlich korrelierende Erkennungen wurden zudem als Flugbahn gruppiert gespeichert.

Tritt jedoch ein Tier aus dem Sichtbereich der Kameras aus und anschließend wieder ein oder wird über längeren Zeitraum nicht erkannt, wurden zwei einzelne Flugbahnen klassifiziert, die jedoch eigentlich zwei partielle Flugbewegungen desselben Tieres darstellen. Bei jeder im Fol-

genden als „Flugbahn“ bezeichneten zusammenhängenden aufgezeichneten Fledermausflugbewegung kann es sich also genau genommen auch um mehrere partielle Flugbahnen desselben Tieres handeln, welches wiederholt in den Kamerakegel eingetreten ist.

### **2.5.2. Flugbahnvisualisierung**

Um die Vielzahl an aufgezeichneten Flugbahnen überschaubar darzustellen, wurde durch eine 3D-Kerndichteschätzung (R-Paket ks) die Verteilung der Aktivität im dreidimensionalen Raum geschätzt und jeweils das 50, 70 und 90 %ige kleinstmögliche Volumen dieser Verteilung in Polygonen abgegrenzt. Dadurch wird sichtbar, in welchen Bereichen um den Rotor sich die Fledermausflugbahnen konzentrieren, in welchem Abstand und in welcher Höhe also die meiste Fledermausaktivität vorlag. Diese Polygone wurden mit dem R-Paket rgl zusammen mit den einzelnen Flugpunkten sowie Kamera, Strahler (Standort und Strahlrichtung) und der KWEA/Teleskopstange visualisiert.

Vor der Visualisierung der Richtungsänderungen wurden die einzelnen Flugbahnen durch ein mehrstufiges Filterverfahren auf Plausibilität überprüft, um z. B. sicherzustellen, dass nicht etwa große oder nah an der Kamera fliegende Fledermäuse mit zwei Flugpunkten versehen und somit ein künstlicher Zickzack-Flug suggeriert wurde. Im Detail wurden folgende Filterschritte durchgeführt:

1. Löschen eines Punktes von jedem Flugpunktpaar mit identischem Zeitstempel, die weniger als einen Meter voneinander entfernt waren (→ adressiert das Problem der groß abgebildeten Fledermaus für die zwei gleichzeitige Punkte berechnet wurden)
2. Löschen von jeweils einem Flugpunkt aus Flugpunktpaaren mit identischen Zeitstempel, wenn diese Flugpunkte weniger als 10 % einer Flugbahn ausmachen (→ adressiert Vermischung mehrerer zeitgleicher Flugbahnen)
3. Löschen aller Flugbahnen, die immer noch Punkte mit identischem Zeitstempel enthalten (→ Entfernen von unrealistischen Flugbahnen, die durch die vorhergehenden Schritte nicht bereinigt werden konnten)
4. Löschen aller Flugpunkte, von denen aus mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 km/h weitergeflogen wurde (→ adressiert Vermischung mehrerer Flugbahnen)
5. Löschen der kompletten Flugbahn, wenn immer noch Fluggeschwindigkeiten von 100 km/h überschritten werden (dafür wurden die Geschwindigkeiten nach dem Löschen der Punkte im vorherigen Schritt neu berechnet).

Im Folgenden wurden für die gesäuberten Flugbahnen Richtungsänderungen berechnet, um präzisere Aussagen über ein mögliches Erkundungs- oder Ausweichverhalten der Tiere am Rotor treffen zu können. Hierfür wurde jeder Flugpunkt mit seinem Folge-Flugpunkt über einen Vektor verbunden und der Winkel zur vorherigen Vektorrichtung bestimmt. Dieser Winkel zwischen den Vektoren zweier aufeinanderfolgender Flugpunkte gibt die Richtungsänderung an, die die Fledermaus zwischen diesen Punkten vollzogen hat. Für den ersten und letzten Flugpunkt einer Flugbahn konnten keine Richtungsänderung berechnet werden, da für diese Flugpunkte kein vorhergehender bzw. nachfolgender Flugpunkt existiert. Die berechneten Werte reichen von 0° (identische Flugrichtung im Vergleich zum vorherigen Flugpunkt) bis 180° (entgegengesetzte Flugrichtung im Vergleich zum vorherigen Flugpunkt). Die Visualisierung wurde mit dem R-Paket rgl erstellt.

### 2.5.3. Zuordnung von Wind-, Temperatur- und akustischen Erfassungen zu den jeweiligen Flugbahnen

Den Flugbahnen wurde jeweils die nächstgelegene Temperaturmessung zugeordnet, wobei im Fall von abweichenden Messwerten an den beiden Temperaturloggern der höhere Wert ausgewählt wurde.

Den Flugbahnen wurde jeweils die nächstgelegene Audioaufnahme mit maximalem Zeitabstand von 20 s als Art(-gruppen) -Bestimmung zugeordnet. Dies geschah im Hinblick darauf, mögliche Unterschiede zwischen den Arten oder Artengruppen feststellen zu können, was das Annäherungs- oder Ausweichverhalten am Rotor betrifft.

### 2.5.4. Bestimmung der Minimaldistanz der Flugbahnen zum Rotor und potenzieller Rotordurchflüge

Um festzustellen, ob die Fledermäuse unterschiedliche Abstände zur KWEA einhalten, abhängig davon, ob und wie schnell sich der Rotor dreht, oder abhängig davon, welcher Art(en)gruppe sie angehören, war es notwendig, den kürzesten Abstand einer jeden Flugbahn zum Rotor zu kennen. Zur Berechnung dieser minimalen Distanz einer Flugbahn zum Rotor wurde zunächst für jeden Flugpunkt die Distanz zur Rotorfläche, also dem vom Rotor überstrichenen Bereich, ermittelt. Befand sich der Punkt  $P$  senkrecht zu dem vom Rotor gebildeten Kreis entlang der  $x$ -Achse, entsprach die Distanz  $d$  der  $z$ -Koordinate von  $P$  (Abb. 9 (a)). Konnte von  $P$  keine senkrechte Linie zur Rotorebene  $E$  gebildet werden (Abb. 9 (b)), wurde dieser zunächst auf die Rotorebene  $E$  auf den Punkt  $Q$  projiziert und von hier der auf dem Rotor nächstgelegene Punkt  $K$  gesucht. Anschließend konnte die Distanz  $d$  zwischen  $P$  und  $K$  berechnet werden.

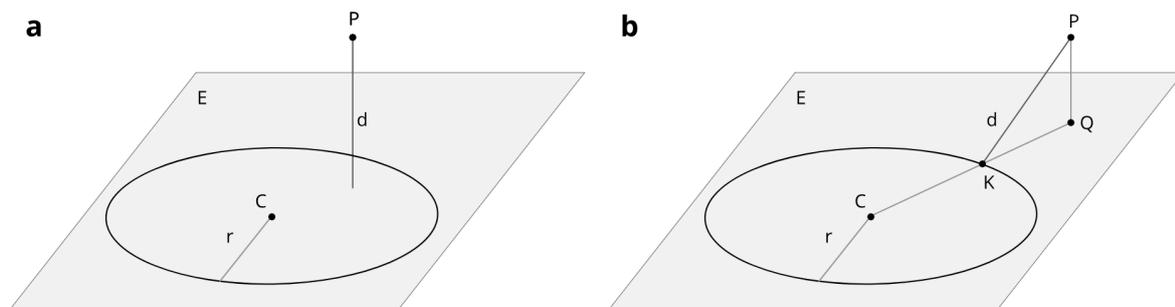


Abb. 9: Abstrahierte Darstellung des Rotors der KWEA zur Veranschaulichung der Berechnung der Distanz eines Flugpunktes ( $P$ ) zum Rotor.  $C$  = Zentrum des Rotors,  $r$  = Radius des Rotors. Lag der Punkt  $P$  senkrecht zum Rotor (**a**) entsprach die Distanz  $d$  der  $z$ -Koordinate abzüglich des Rotorversatzes in  $z$ -Richtung in Bezug zur Kamera. Lag  $P$  nicht senkrecht zum Rotor (**b**), so wurde dieser zunächst auf die Rotorebene  $E$  in den Punkt  $Q$  projiziert, der nächstgelegene Punkt  $K$  auf dem Rotor gesucht und die Distanz  $d$  zwischen  $P$  und  $K$  berechnet.

Zur Berechnung der Rotordurchflüge wurden zeitlich direkt aufeinanderfolgende Punkte der Flugbahnen gewählt, die sowohl vor als auch hinter der Rotorebene lagen, jedoch nicht weiter vom Zentrum des Rotors als der Rotorradius entfernt waren. Ein solches Punktepaar wurde als Durchflugereignis gewertet, wenn die beiden Punkte zeitlich nicht weiter als 0,5 Sekunden auseinander lagen. Durch den kurzen Zeitabstand wurde sichergestellt, dass Flüge um den Rotor herum nicht fälschlich als Durchflug interpretiert wurden.

Zusammenfassend gilt also, dass eine Fledermaus ab dem Abstand 0 m zur Rotorfläche in den Gefahrenbereich eintritt, da sich der gemessene minimale Abstand einer jeden Flugbahn nicht auf die Nabe, sondern die vom Rotor überstrichene scheibenförmige Fläche bezieht. Bei

Bezug auf die Referenz, die Teleskopstange, wurde der Abstand zu einem hypothetischen Rotorbereich um diese herum kalkuliert.

## **2.6. Statistische Analysen zur Minimaldistanz**

Die statistische Auswertung sowie die grafische Darstellung der Daten erfolgte in R 3.5 (The R Foundation for Statistical Computing). Um den Einfluss der Betriebsmodi der Anlage auf die minimale Distanz der Flugbahnen zu berechnen, wurden lineare gemischte Modelle (mixed effect models) mit der Funktion lmer aus dem R-Paket lme4 (Bates et al. 2015) gerechnet.

Im Betriebsmodus-Modell wurden der Betriebsmodus und die Globalstrahlung als feste Effekte definiert und der Standort als zufälliger Effekt einbezogen. Dadurch wurde berücksichtigt, dass allein durch die unterschiedlichen Gegebenheiten an den Standorten, beispielsweise durch die räumliche Anordnung der KWEA im Hinblick auf Vegetation oder Gebäude, auch Unterschiede im Flugverhalten der Tiere zu erwarten sind. Die Globalstrahlung wurde als Näherungsvariable für die Helligkeit während der Dämmerung verwendet, da davon auszugehen ist, dass sich die Tiere bei Helligkeit auch visuell im Raum orientieren (vgl. Eklöf & Jones (2003); Müller et al. (2009)). Das könnte also bedeuten, dass die Tiere mit zunehmender Dunkelheit einem größeren Kollisionsrisiko unterliegen, weil die zusätzliche zur Echoortung mögliche Orientierung per Augenlicht dann erschwert ist bzw. wegfällt. Die Artengruppe wurde nicht in das Betriebsmodus-Modell integriert, da nur für einen geringen Teil der Flugbahnen eine zuverlässige Zuordnung der Art erfolgen konnte und die Stichprobe sich sonst deutlich verringert hätte.

Die vor Ort gemessenen Wind- und Temperaturdaten wurden aufgrund geringer Varianz dieser Parameter sowie Ausfällen an einzelnen Abenden, bzw. einem einzelnen Standort, nicht mit in das finale Modell aufgenommen, um die Aussagekraft des Modells zu erhöhen. Vorige Modelle inklusive der Temperatur und dem Wind zeigten allerdings auch keine anderen Zusammenhänge als das finale Modell, weil es meist windstill war und die Temperaturen meist nur wenig zwischen 15 und 20°C schwankten (Anhang Abb. 19).

Im Artengruppen-Modell wurde für den Teil der Aufnahmen, bei denen eine Artzuweisung eindeutig möglich war, untersucht, ob Fledermäuse der verschiedenen Artengruppen unterschiedlich nah an Strukturen fliegen und dies auch ggf. den minimalen Abstand zum Rotor beeinflussen könnte. Hier wurde der Abstand zum Rotor in Abhängigkeit der Artengruppe als fester Effekt und dem Standort als zufälliger Effekt modelliert.

Für alle Modelle wurden die Residuen gegen die Anpassungswerte aufgetragen, um die Annahmen des linearen Zusammenhangs sowie der Homogenität der Varianzen zu überprüfen. Die Normalverteilung der Residuen wurde ebenfalls überprüft.

Um zu testen, ob die untersuchten festen Effekte wie Betriebsmodus oder Artengruppe einen Einfluss auf den Abstand zum Rotor und damit dem Gefahrenbereich haben, wurden für jedes Modell anschließend die Regressionskoeffizienten mit ihren 95 % Konfidenz-Intervallen grafisch aufgetragen. Gab es keine Überlappung dieser Konfidenzintervalle mit der Null-Linie der Referenzgruppe, so bedeutet das, dass ein Unterschied vorliegt.



Am Standort Gundelfingen zeigte sich die Flugstraße der Zwergfledermaus mit anschließender Jagdaktivität sowie beständig hohe Jagdaktivität der Breitflügelfledermaus (Artengruppe Nyctaloide). Daneben jagten *Myotis*-Arten in geringeren Zahlen.

Am Standort Gündlingen bildete sich die in den Voruntersuchungen dokumentierte Flugstraße der Fransenfledermaus während des Experiments nicht aus. Jedoch sind die *Myotis*-Rufe, die häufigste Gruppe an diesem Standort, vermutlich der Jagdaktivität dieser Art zuzuschreiben. In etwas geringeren Zahlen jagten auch Zwerg- und Mückenfledermäuse an diesem Standort. Grundsätzlich blieb die Fledermausaktivität in Gündlingen hinter den Erwartungen zurück. Es handelte sich hier um den Standort mit der geringsten akustischen Fledermausaktivität.

Am Römerbad flogen wie erwartet Mausohren in großer Zahl, obwohl auch hier die erwartete kleine Flugstraße ausblieb. Bei den beobachteten Individuen handelte es sich um jagende Mausohren. In geringeren Zahlen jagten an diesem Standort Nyctaloide und Zwergfledermäuse.

In Wasenweiler dominierten wie erwartet die beiden Flugstraßen aus Zwergfledermäusen und Bartfledermäusen das Bild. Anschließende Jagdaktivität wurde hier kaum verzeichnet.

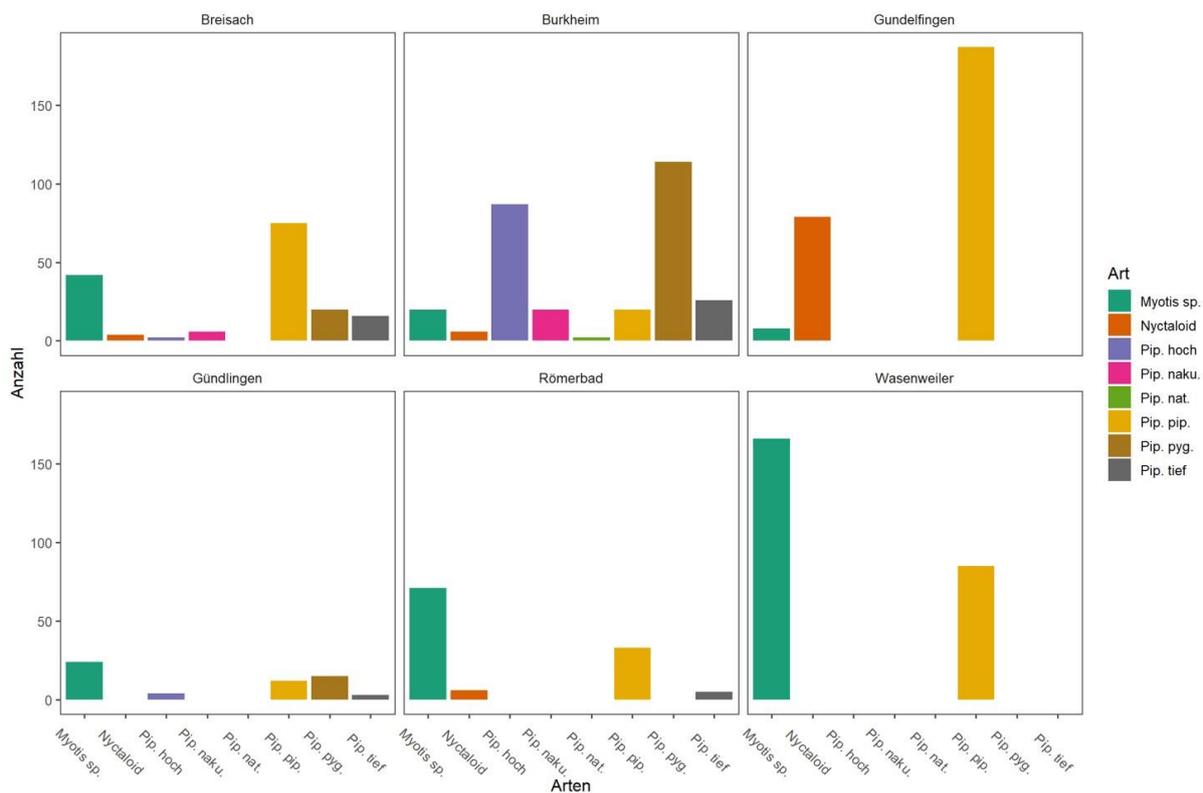


Abb. 11: Artenspektrum und Anzahl der Rufsequenzen aus der akustischen Artbestimmung im 40-Sekunden-Bereich um die optisch aufgezeichneten Flugbahnen an den sechs Standorten. Pip. naku = Rohhaut/Weißrandfledermaus, Pip. nat = Rohhautfledermaus, Pip.pip = Zwergfledermaus, Pip. pyg. = Mückenfledermaus. Pip tief = Überschneidungsbereich Rohhaut/Weißrand/Zwergfledermaus, Pip. hoch = Überschneidungsbereich Zwerg/Mückenfledermaus, Nyctaloid = Abendsegler, Kleinabendsegler, Breitflügel- und Zweifarbfledermaus.

## 3.2. Verhalten von Fledermäusen an KWEA

### 3.2.1. Minimaldistanz zum Rotorbereich, Anzahl Rotordurchflüge und Kollisionen

Der kürzeste Abstand einer jeden aufgezeichneten Flugbahn zum Rotor betrug im Durchschnitt 4,6 m ( $\pm 2,6$  m) mit einem Minimum von 0,0 m (bei Durchflügen) und einem Maximum von 18,4 m (Abb. 12). Die geringste durchschnittliche Minimaldistanz wurde am Römerbad mit 3,7 m gemessen und die höchste in Gündlingen mit 6,2 m.

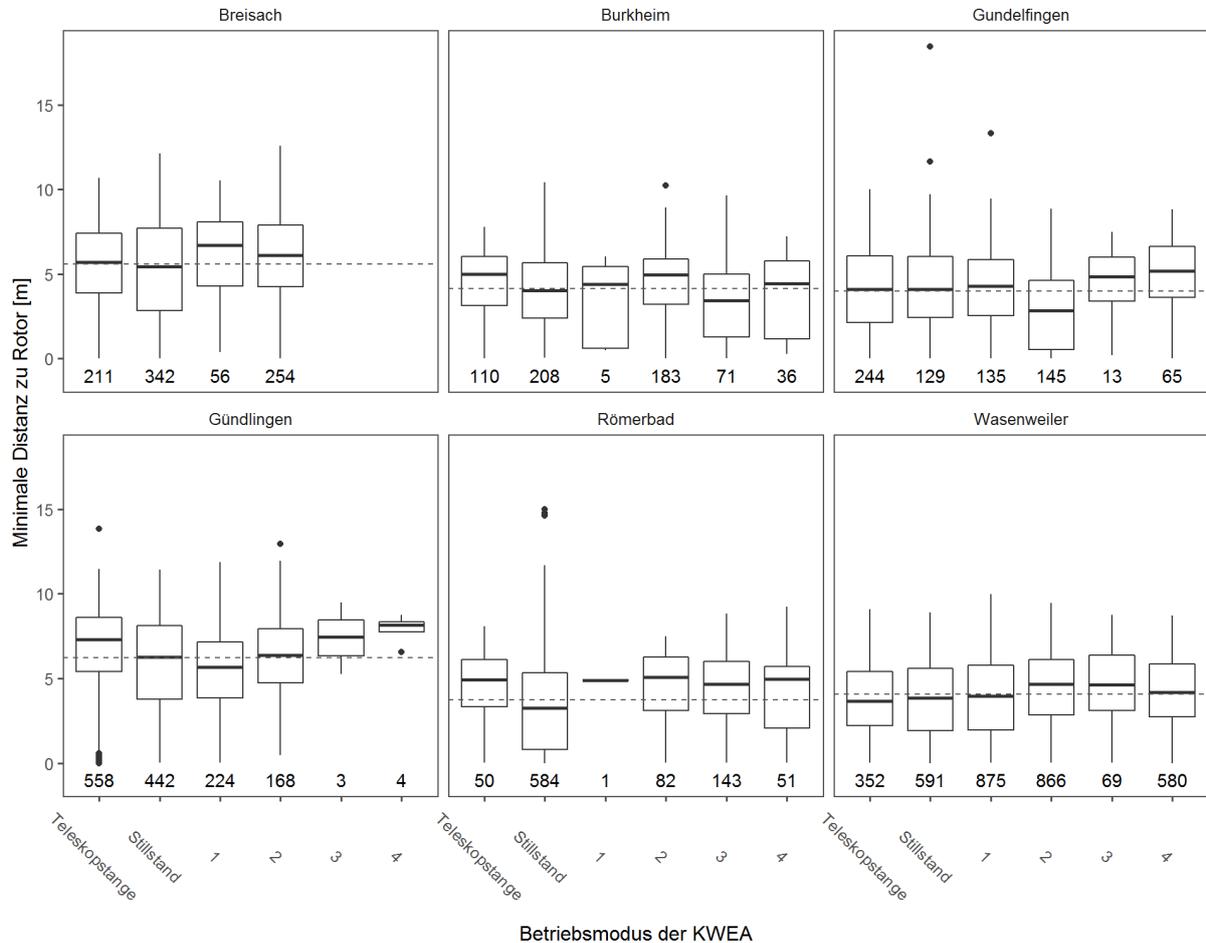


Abb. 12: Darstellung des kürzesten Abstands aller Flugbahnen zum Rotor pro Betriebsmodus und Standort. Die Box umfasst das erste und dritte Quartil (25. und 75. Perzentil). Der hervorgehobene horizontale Strich in der Box repräsentiert den Median der Verteilung. Die unteren und oberen Antennen (engl. „Whisker“) umfassen maximal das 1,5-fache des Interquartilabstands. Ausreißer sind als Punkte dargestellt. Die Nummern unterhalb der Boxen geben die Stichprobe, also Anzahl der Messungen an. Die durchschnittliche minimale Distanz pro Standort ist durch die gestrichelten Linien dargestellt und zeigt die hohen Schwankungen im Rotorabstand zwischen den Standorten.

Die Ergebnisse des Betriebsmodus-Modells lassen darauf schließen, dass Fledermäuse abhängig von der Rotorgeschwindigkeit unterschiedlich nah an die Anlage heranfliegen. Im Durchschnitt flogen die Tiere 0,4 m näher an der Anlage, wenn sich diese im Stillstand befand und 0,3 m näher an der Anlage bei langsamer Rotorgeschwindigkeit (Rotorgeschwindigkeitsklasse 1) im Vergleich zur Teleskopstange.

Der positive Effekt der Globalstrahlung auf die Minimaldistanz zeigt, dass die Tiere im Durchschnitt bei höherer Globalstrahlung, also mehr Tageslicht, weiter von der Anlage entfernt blieben (Abb. 13, Tab. 2).

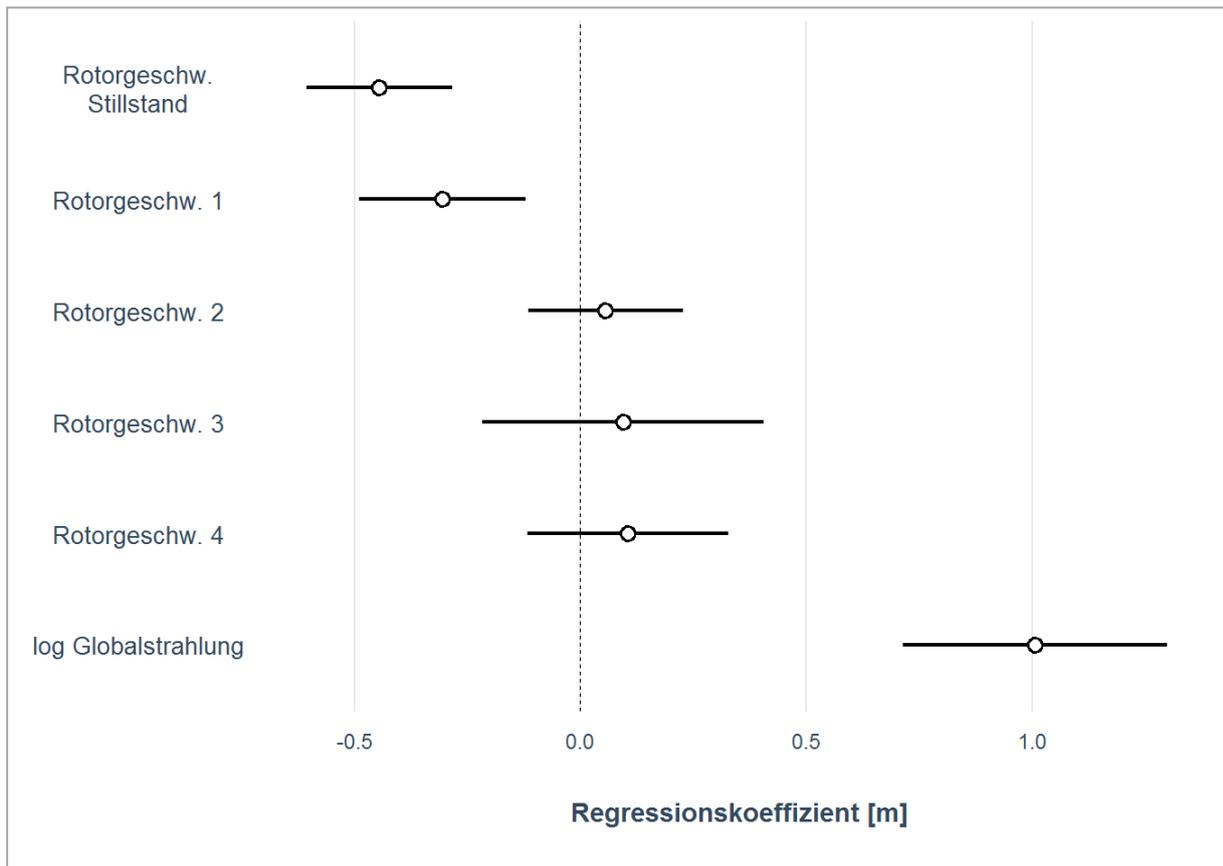


Abb. 13: Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz zum Rotor in Abhängigkeit der Betriebsmodi und der Globalstrahlung (feste Effekte) sowie den Standorten (zufälliger Effekt). Die Kreise geben die Regressionskoeffizienten und die Linien die 95 % Konfidenzintervalle an. Die Teleskopstange stellt die Referenz (gestrichelte Linie beim 0-Wert) dar. Wenn die Konfidenzintervalle mit der Null-Linie überlappen, gibt es keinen Unterschied zur Teleskopstange. Abweichungen des Regressionskoeffizienten ins Positive bedeuten, dass der entsprechende Faktor einen größeren Abstand verursacht, Abweichungen ins Negative, dass die Fledermäuse weniger Abstand halten.

Tab. 2: Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz (mD) zum Rotor in Abhängigkeit der Betriebsmodi und der Globalstrahlung (feste Effekte) sowie den Standorten (zufälliger Effekt). Die Stichprobengröße betrug  $n = 7.850$  Flugbahnen, das Bestimmtheitsmaß der festen Effekte alleine betrug  $R^2 = 0,01$  und der festen und zufälligen Effekte zusammen  $R^2 = 0,17$ .

	Regressionskoeffizient	Unterer 95 % KI	Oberer 95 % KI
Ø mD an Teleskopstange	7,78	6,56	8,99
Stillstand	-0,45	-0,61	-0,28
1	-0,31	-0,49	-0,12
2	0,06	-0,12	0,23
3	0,09	-0,22	0,41
4	0,11	-0,12	0,33
log Globalstrahlung	1,01	0,71	1,30

Neben der minimalen Distanz der Flugbahnen wurden zusätzlich (potenzielle) Durchflüge durch den Rotorbereich berechnet (Tab. 3). An der Teleskopstange und der Anlage im Stillstand wurden an jedem Standort Durchflüge registriert (ein Durchflug an der Teleskopstange bezieht sich auf den hypothetischen Rotorbereich). Über 60 % aller gemessenen Durchflüge fanden bei Stillstand oder Teleskopstange und somit ohne jede Kollisionsgefahr statt. Befand sich die KWEA in Betrieb, unterschied sich die Anzahl an potenziellen Durchflügen zwischen den Standorten und Betriebsmodi. Insgesamt verliefen je nach Standort und Betriebsmodus zwischen 0 – 10 % der insgesamt registrierten Flugbahnen durch den Rotorbereich (Tab. 3). An den Standorten Wasenweiler und Gündlingen wurden die meisten Durchflüge an der Teleskopstange und im Stillstand verzeichnet, während in Burkheim und Gundelfingen die meisten Durchflüge während des laufenden Betriebs registriert wurden. Ein klares, über alle Standorte konsistentes Muster lässt sich nicht erkennen (Tab. 3). Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass von den 7.850 aufgezeichneten Flugbahnen insgesamt 176 so nah an der KWEA verliefen, dass sie den (hypothetischen) Rotorbereich querten, 141 davon bei Anwesenheit eines realen Rotors (und nicht der Referenz-Teleskopstange), und wiederum 65 davon während sich der Rotor drehte. Die Fledermäuse waren also während des gesamten Experimentzeitraums bei 65 Flugbahnen einem Schlagrisiko ausgesetzt.

Tab. 3: Durchflüge durch den Rotorbereich pro Standort und Betriebsmodus. Angegeben sind die absolute Anzahl der Durchflüge und der prozentuale Anteil der Durchflüge an Gesamtzahl aller während des Experiments aufgezeichneten Durchflüge. Wurde keine Flugbahn registriert ist dies durch „-“ gekennzeichnet.

Standort	Teleskopst.	Stillstand	1	2	3	4	Summe
Breisach	5	7	0	4	0	0	16 (10 %)
Burkheim	3	2	0	3	4	0	12 (7 %)
Gundelfingen	9	2	5	9	1	1	27 (15 %)
Gündlingen	7	8	0	0	0	0	15 (8 %)
Römerbad	2	46	0	0	6	2	56 (32 %)
Wasenweiler	9	11	13	14	1	2	50 (28 %)
Summe	35 (20 %)	76 (43 %)	18 (10 %)	30 (17 %)	12 (7 %)	5 (3 %)	176

Am Standort Gündlingen kam es am 11.08.2018 um 23:20 Uhr, also 10 min vor Ende des letzten Beprobungstages an diesem Standort, bei einer Rotorgeschwindigkeit von 45 km/h an der äußeren Rotorspitze, dies entspricht Rotorgeschwindigkeitsklasse 1, zu einer Kollision mit einer Mückenfledermaus (*Pipistrellus pygmaeus*). Das tote Tier wurde von der KWEA in einen

Gehölzstreifen katapultiert, wo es sich vermutlich in den oberen Zweigen der Vegetation ver-  
fing. Trotz Einsatz der Wärmebildkamera konnte die Fledermaus nicht gefunden werden. Eine  
Nachsuche am folgenden Tag blieb auch ergebnislos, möglicherweise war der Kadaver zu  
diesem Zeitpunkt bereits von einem Prädator abgetragen worden.

### 3.2.2. Einfluss des Standortes auf das räumliche Verhalten der Fledermäuse am Rotor

Die sechs ausgewählten Standorte unterschieden sich deutlich in den naturräumlichen Gege-  
benheiten, der Vegetationsstruktur unmittelbar um die Anlage, dem Artenspektrum und der Art  
des Fledermausaufkommens (Flugstraße, Jagdhabitat oder Quartiernähe). Diese hohe Varia-  
bilität spiegelt sich auch in den statistischen Ergebnissen wider: Die festen Effekte des im  
vorigen Kapitel beschriebenen Modells (Betriebsmodus und Globalstrahlung) erklärten nur  
etwa 1 % der Variabilität der Daten ( $R^2 = 0.01$ ), während bei Hinzunahme der zufälligen Effekte  
(Standorte) schon etwa 17 % ( $R^2 = 0.17$ ) der Variabilität der Daten erklärt werden. Der Einfluss  
des Standortes auf die Minimaldistanz war damit um ein Vielfaches größer als die Effekte der  
Betriebsmodi und der Globalstrahlung auf diesen Faktor.

Dies wird auch im räumlichen Verhalten der Fledermäuse erkennbar, wie die nachfolgende  
Darstellung der gesamten Aktivitätsverteilung um den Rotor zeigt. Um trotz der teils hohen  
Dichte an Flugbahnen übersichtlich darstellen zu können, wie sich die Fledermausaktivität  
räumlich um die KWEA und den Rotorbereich verteilte, wurden über alle aufgezeichneten  
Punkte der Flugbahnen sogenannte Kerndichtezentren berechnet. Hierbei umfassen die Po-  
lygone das 50 (rot), 70 (orange) und 90 %ige (gelb) Volumen der mittels Kerndichteschätzung  
interpolierten Flugaktivität (Abb. 14).

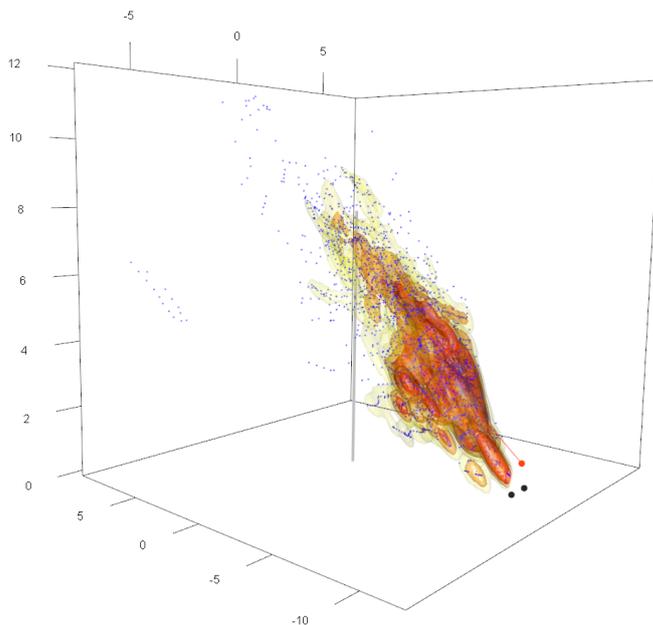


Abb. 14: Visualisierung der Kerndichteschätzung am Beispiel der Teleskopstange am Standort Gunde-  
lfingen. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote,  
orangefarbene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung  
interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter  
Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

Wird nun die räumliche Verteilung der Aktivitätsschwerpunkte aufsummiert und über alle Tage  
für die einzelnen Betriebsmodi betrachtet, so scheint sich beispielsweise am Standort

Gundelfingen die Aktivität zum Rotorbereich zu verlagern, sobald anstelle der Teleskopstange die KWEA steht, insbesondere sobald sich der Rotor dreht (Abb. 15). Dieser Effekt scheint für die Standorte Gundelfingen oder Breisach genau umgekehrt ausgeprägt, während er in Wasenweiler, Burkheim oder am Römerbad komplett fehlt. Hier umfassen die Polygone unabhängig vom Betriebsmodus den Rotorbereich stets ähnlich stark (Anhang 9.3). Über alle Standorte betrachtet zeichnet sich also auch hier kein klares Bild ab, was die statistischen Ergebnisse aus dem vorigen Kapitel widerspiegelt und deutlich zeigt, wie groß der Einfluss der unterschiedlichen Standorte war.

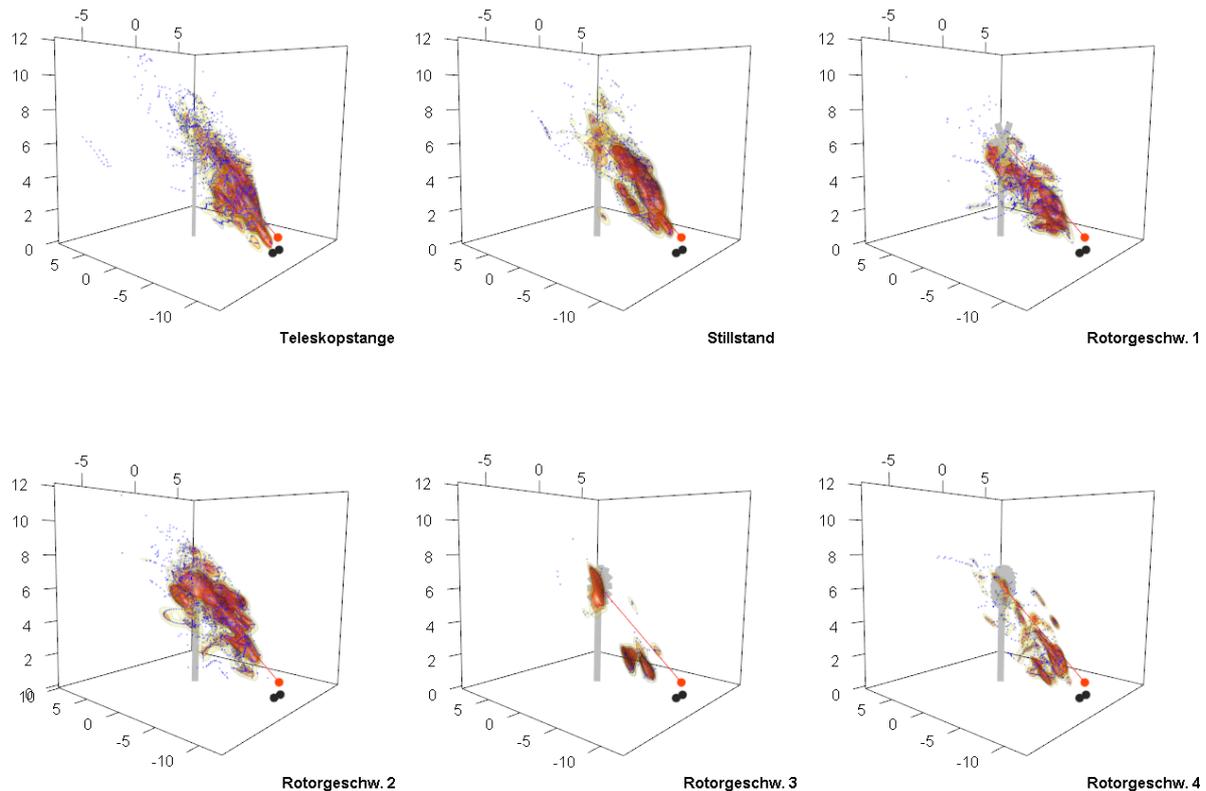


Abb. 15: Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Gundelfingen bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote, orangene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

### 3.2.3. Einflüsse der Arten(gruppen) auf die Minimaldistanz zum Rotor

Die großen Unterschiede im Fledermausverhalten zwischen den Standorten gehen möglicherweise auf das unterschiedliche Artenspektrum zwischen den Standorten zurück, weshalb ein zusätzliches lineares gemischtes Modell der minimalen Distanz in Abhängigkeit der Art (fester Effekt) und des Standortes (zufälliger Effekt) berechnet wurde. Dieses Modell bestätigt die Erwartungen, dass Tiere der *Myotis*-Gruppe grundsätzlich strukturgebundener fliegen als die Gruppe der Pipistrelloide oder gar der im freien Luftraum jagenden Nyctaloide: Im Vergleich zu der Artengruppe der Pipistrelloide mit einer durchschnittlichen Minimaldistanz von 4,6 m, flogen Tiere der Gattung *Myotis* um etwa 0,5 m näher an die Anlage, unabhängig vom Betriebsmodus (Abb. 16, Tab. 4). Im Gegensatz dazu flogen Tiere der Artengruppe Nyctaloid

durchschnittlich 0,6 m weiter von der Anlage entfernt als die Tiere der Gattung *Pipistrellus*. Der größte Anteil der Streuung der Daten wird aber weiterhin durch die Standorte erklärt: Das Bestimmtheitsmaß der Arten (feste Effekte) beträgt  $R^2 = 0,01$  und unter Hinzunahme der zufälligen Effekte  $R^2 = 0,17$ .

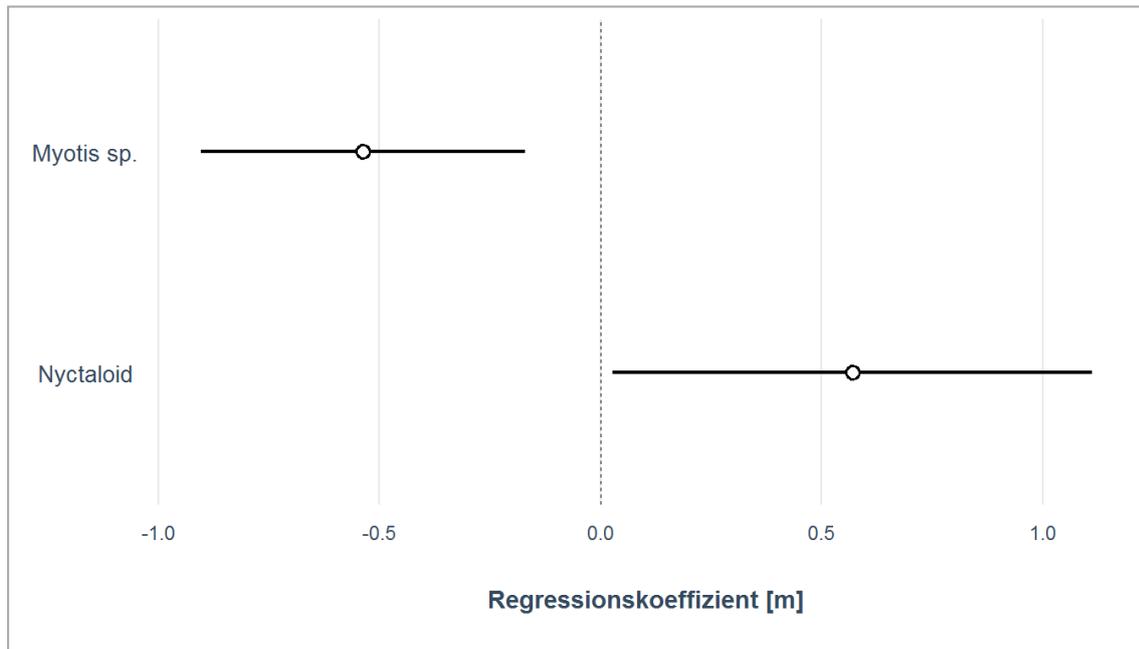


Abb. 16: Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz zum Rotor in Abhängigkeit der Artengruppe (feste Effekte) unter Korrektur für den Standort (zufälliger Effekt). Die Kreise geben die Regressionskoeffizienten und die Linien die 95 % Konfidenzintervalle an. Die Gruppe der Pipistrelloide diente als Referenz (gestrichelte Linie über dem 0-Wert). Überlappungen einer Gruppe mit dieser Linie bedeuten keinen Unterschied, Abweichungen ins Positive, dass die Gruppe einen größeren Abstand zur KWEA hält als die Pipistrelloide, Abweichungen ins Negative, dass die Gruppe einen kleineren Abstand hält als die Pipistrelloide.

Tab. 4: Ergebnisse des linearen gemischten Modells mit der minimalen Distanz (mD) zum Rotor in Abhängigkeit der Artengruppe (feste Effekte) sowie den Standorten (zufälliger Effekt). Die Stichprobengröße betrug  $n = 1.158$ , das Bestimmtheitsmaß der festen Effekte alleine betrug  $R^2 = 0,01$  und der festen und zufälligen Effekte zusammen  $R^2 = 0,17$ .

	Regressionskoeffizient	Unteres 95 % Konfidenzintervall	Oberes 95 % Konfidenzintervall
Ø mD Pipistrelloide	4,57	3,75	5,39
<i>Myotis sp.</i>	-0,54	-0,90	-0,17
<i>Nyctaloid</i>	0,57	0,03	1,11

### 3.2.4. Richtungsänderungen der Fledermäuse am Rotor

Um das Verhalten der Tiere im Umfeld um die KWEA detailliert zu visualisieren (und nicht nur die Aufenthaltsschwerpunkte in Relation zum Rotor zu zeigen), wurde zusätzlich für jeden Flugpunkt einer Flugbahn die Richtungsänderung zwischen den einzelnen Flugpunkten bestimmt. Dabei wurden von Flugbewegungen ohne Richtungsänderungen, was einem Winkel von  $0^\circ$  zwischen zwei Flugpunkten entspricht, bis hin zu Kehrtwenden, was einem Winkel von  $180^\circ$  zwischen zwei Flugpunkten entspricht, sämtliche Richtungsänderungen festgestellt. In der grafischen Darstellung werden Flugpunkte, die verglichen mit dem vorherigen Flugpunkt

keine Richtungsänderung beschreiben ( $0^\circ$ ), in Gelb symbolisiert und Flugpunkte, die verglichen mit dem vorherigen Flugpunkt eine Kehrtwende beschreiben ( $180^\circ$ ), in Rot (Abb. 17, Abb. 18). Der Gradient der Richtungsänderungen wird dabei über einen Farbgradienten codiert (für  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  von Gelb zu Rot).

Für den Standort Gundelfingen sind die Richtungsänderungen innerhalb der aufgezeichneten Flugbahnen bei verschiedenen Betriebsmodi exemplarisch dargestellt (Abb. 17). Der optische Eindruck zeigt hier, dass bei Rotorgeschwindigkeitsklasse 1 und 2 vermehrt orangene bis rote Flugpunkte, also solche mit einem größeren Richtungsänderungs-Winkel, nahe des Rotors auftreten. Diese eher prägnanten Richtungsänderungen könnten Erkundungsverhalten der Fledermäuse am langsam drehenden Rotor bedeuten. Bei den verbleibenden Betriebsmodi bzw. bei aufgestellter Teleskopstange ist optisch keine Konzentration von Flugpunkten mit ausgeprägter Richtungsänderung in der Nähe des Rotors zu erkennen. Theoretisch können Richtungsänderungen innerhalb einer Flugbahn auch bei der Insektenjagd auftreten. Dieses Verhalten ist im dargestellten Beispiel allerdings unwahrscheinlich, da ein solches Verhalten dann auch bei den Betriebsmodi Stillstand, 3 und 4 sowie bei aufgestellter Teleskopstange auftreten sollte. Unabhängig vom Betriebsmodus zeigen alle Richtungsänderungs-Winkel eine linksschiefe Poisson-Verteilung, d. h. die Anzahl an scharfen Ausweichmanövern mit hohen Winkeländerungen änderte sich nicht mit der Rotorgeschwindigkeit (Anhang 9.5). In den hier untersuchten Situationen ist es also nicht so, dass die Tiere umso abrupter ausweichen mussten, je schneller sich der Rotor drehte.

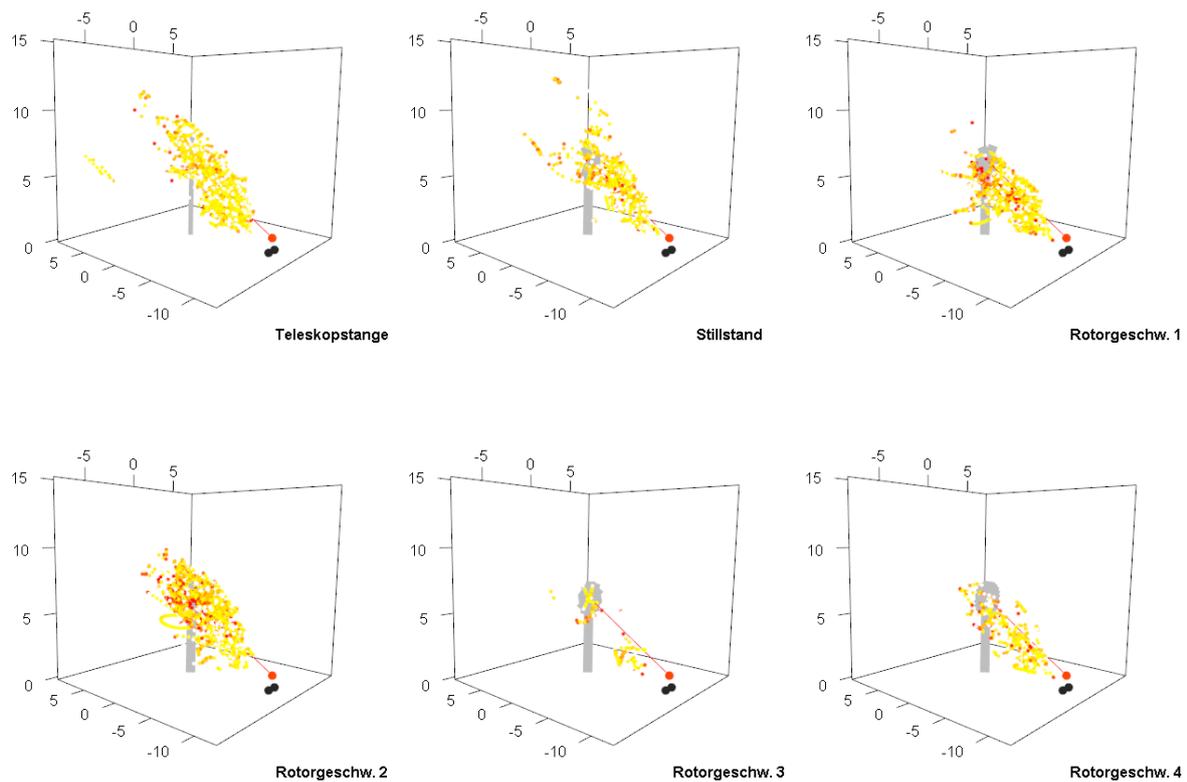


Abb. 17: Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Gundelfingen. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis Gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

Dass sich die Anzahl roter Punkte zum Rotor hin verdichtet, wenn sich die Anlage dreht, im Vergleich zum stillstehenden Rotor oder der Teleskopstange, bestätigt sich an allen Standorten (Anhang 9.4). Dies weist auf ein verstärktes Erkundungsverhalten bei laufendem Betrieb hin. Unabhängig vom Betriebsmodus zeigen alle Richtungsänderungswinkel ein linksschiefe Poisson-Verteilung, d. h. die Anzahl an scharfen Ausweichmanövern mit hohen Winkeländerungen änderte sich nicht mit der Rotorgeschwindigkeit (Anhang 9.5). In den hier untersuchten Situationen ist es also nicht so, dass die Tiere umso abrupter ausweichen mussten, je schneller sich der Rotor drehte.

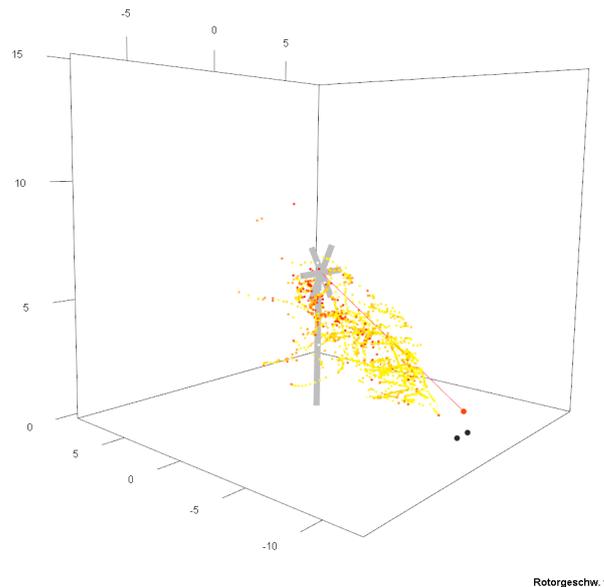


Abb. 18: Exemplarische Darstellung der Richtungswechsel innerhalb der Flugbahnen bei langsam drehendem Rotor am Standort Gundelfingen. Scharfe Richtungswechsel konzentrieren sich auf den unmittelbaren Rotorbereich. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis Gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

## 4. Diskussion

### 4.1. Die Fledermausaktivität an KWEA im Überblick

Die Ergebnisse dieses Experiments zeigen, dass an KWEA unter bestimmten Voraussetzungen, z. B. in Quartiernähe, durchaus sehr hohe Fledermausaktivitäten auftreten können. Dies bedeutete für die hier untersuchten Anlagenkonstellation jedoch nicht zwingend, dass in der Folge viele Kollisionen auftraten. Obwohl der Betriebsmodus der KWEA nur eine geringe Auswirkung auf das Annäherungsverhalten der Fledermäuse an den Rotor hatte und häufiges Erkundungsverhalten beobachtet wurde, konnten die Fledermäuse dem Rotor bei den meisten beobachteten Interaktionen ausweichen. Dass trotzdem eine grundsätzliche Kollisionsgefahr bestehen bleibt, zeigt die Kollision einer Mückenfledermaus am Standort Gündlingen im August 2018.

Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass die Erkenntnisse dieser Studie nur für die untersuchten Fledermausarten sowie Anlagen mit vergleichbarer Größe und horizontaler Rotorachse gelten. Zwar wurde ein sehr breites Artenspektrum untersucht, seltene Arten wie z. B. die Mopsfledermaus kamen jedoch nicht vor. Die verwendete KWEA war mit knapp zehn Metern Gesamthöhe, einem Rotordurchmesser von drei Metern und Umdrehungen bis 160 U / min einer Mikrowindanlage zuzuordnen.

## **4.2. Anzahl der Flugbahnen und Artenspektrum der lokalen Fledermausfauna an KWEA**

Es ist im Laufe dieser Studie gelungen, 7.850 Fledermausflugbahnen mit exakter 3D-Position aufzuzeichnen, während im Vorgängerprojekt in Norddeutschland insgesamt nur 500 Flugbahnen (entspricht 6 %) dokumentiert wurden. Dort lagen lediglich 41 Flugbahnen im Zehn-Meter-Radius um den Rotorbereich, während sich hier beinahe alle der 7.850 Flugbahnen im Zehn-Meter-Radius befinden. Das liefert eine exzellente Datengrundlage, um das Verhalten der Fledermäuse im Rotorbereich qualitativ und quantitativ zu analysieren und zeigt zudem, dass der Forschungsansatz sehr gut geeignet war, Erkenntnisse über die Fledermausaktivität im Nahbereich von KWEA zu erlangen.

Das gemessene Artenspektrum entspricht der zu erwartenden Fledermausfauna in der Region. Akustische und optische Aufzeichnungen liegen mindestens von den Arten Breitflügel-fledermaus (*Eptesicus serotinus*), Kleinabendsegler (*Nyctalus leisleri*), Abendsegler (*N. noctula*), Rauhautfledermaus (*Pipistrellus nathusii*), Zwergfledermaus (*P. pipistrellus*), Mückenfledermaus (*P. pygmaeus*) sowie Mausohr (*Myotis myotis*) und weiteren *Myotis*-Arten vor. All diese Arten wurden an mindestens einem Standort mit Jagdverhalten dokumentiert.

Dabei wurde die KWEA an zwei Standorten in Flugstraßen von Zwergfledermäusen (*P. pipistrellus*, zwei Flugstraßen) sowie Bartfledermäusen (*M. mystacinus*, eine Flugstraße) und an einem Standort in unmittelbarer Quartiernähe aufgestellt: Hier befanden sich Wochenstuben der Mückenfledermaus und der Zwergfledermaus sowie ein Männchenquartier der Rauhautfledermaus. Die Mausohr-Flugstraße am Römerbad und die Fransenfledermaus (*M. nattereri*)-Flugstraße in Gündlingen konnten nicht wie erwartet beprobt werden, da – anders als in der Voruntersuchung Anfang Mai – diese Flugstraßen zum Experimentzeitraum nicht ausgebildet waren. Fledermäuse bewegen sich auf diesen Flugstraßen zwar auf tradierten Flugrouten, diese gestalten sich jedoch flexibel, abhängig davon, welches Quartier gerade genutzt wird und wo gerade die Haupt-Jagdgebiete liegen (Limpens & Kapteyn 1991). Saisonal bedingt kann es also variieren, welche Flugstraßen gerade ausgebildet sind. An den betroffenen Standorten Römerbad und Gündlingen herrschte statt der gerichteten Transferflüge, wie sie für Flugstraßen typisch sind, Jagdverhalten von Zwergfledermäusen, Mausohren und wahrscheinlich Fransenfledermäusen vor. So war die Aktivität an diesen Standorten trotz fehlender Flugstraßen hoch.

Im Gegensatz zu der Studie in Norddeutschland konnten bei der aktuellen Studie häufiger Fledermäuse im Rotorbereich beobachtet werden. Neben einer grundsätzlich höheren Artendiversität sowie einem höheren Fledermausaufkommen an den explizit auf hohe Aktivität selektierten Standorten in Süddeutschland, war auch die Entfernung zu Hecken und Waldrändern hier vergleichsweise viel geringer. Dem entsprechend wurden im süddeutschen Projekt knapp 200-mal mehr Flugbahnen in kürzerer Aufnahmezeit dokumentiert als im Vorgängerprojekt.

## **4.3. Verhalten von Fledermäusen an KWEA**

### **4.3.1. Erkundungs- und Ausweichverhalten**

Im Gegensatz zur norddeutschen Studie, bei der die Fledermäuse die KWEA meist im gerichteten Streckenflug mit mehreren Metern Abstand passierten, wurde bei der hier vorliegenden süddeutschen Studie häufig Erkundungs- und Ausweichverhalten dokumentiert. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass die experimentelle Untersuchung in Süddeutschland unmittelbar nach Inbetriebnahme einer KWEA stattfand. Fledermäuse zeigen sich gegenüber unbekanntem Objekten in ihrem gewohnten Umfeld grundsätzlich neugierig (eigene Daten). So

überraschen auch die vor Ort beobachteten Anflüge auf den Rotorbereich und die Richtungsänderungen innerhalb der Flugbahnen nicht. Ob diese als Erkundungsverhalten und Ausweichen gedeutet werden können, lässt sich nicht abschließend klären, wurde aber von allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die das Experiment mit Nachtsichtgerät begleiteten, als solches interpretiert. Ein Widerspruch zur Absenz solcher Verhaltensbeobachtungen in Norddeutschland besteht nicht, da die Anlagen dort bereits mehrere Jahre in Betrieb waren, die Fledermausaktivität niedriger war und der Rotorbereich mehrere Meter über dem dortigem Hauptaktivitätsraum der Fledermäuse lag. Die KWEA in Süddeutschland war mit knapp 10 m nur halb so hoch wie die in Norddeutschland beprobten Anlagen (Mikrowindanlage vs. Miniwindanlage). Der Rotorbereich ragte also viel stärker in den Aktionsraum von strukturgebunden fliegenden Fledermäusen, wie z.B. *Pipistrellus*-Arten auf einer Flugstraße oder grundsätzlich die Arten der *Myotis*-Gruppe hinein.

Während des Experiments konnten bei sämtlichen Betriebsmodi Fledermäuse im Rotorbereich beobachtet werden, von den insgesamt 141 Rotordurchflügen fanden 65 (46 %) bei sich drehendem Rotor und damit mit potenzieller Schlaggefährdung statt. Die Modellierungen zeigten, dass sich Fledermäuse bei stillstehendem Rotor und Rotorgeschwindigkeitsklasse 1 im Durchschnitt um etwa 0,4 m näher an diesen annäherten, als es mit der als Referenz eingesetzten Teleskopstange der Fall war. Bei höheren Rotorgeschwindigkeiten hielten die Tiere einen ähnlich großen Abstand wie zur Teleskopstange ein. Wahrscheinlich lässt sich dieses Phänomen nicht damit erklären, dass schnell drehende Rotoren weniger interessant für die Tiere sind, sondern diese zu einer gewissen Gefahreinschätzung in der Lage sind. Denn schnell drehende Rotoren neigen dazu, Fledermausortungsrufe stark zu verwerfen und ein schlecht wahrnehmbares Echo zu produzieren. Diese Vermutung wird von zwei britische Studien gestützt, die die physikalischen Eigenschaften von Fledermausrufen untersuchten, die von sich drehenden Rotorblättern emittiert werden (Long et al. 2009; Long et al. 2010b). Dabei beschallten die Autoren im Laborversuch einen sich drehenden Rotor. Dieser hatte sechs Rotorblätter und einen Durchmesser von 0,9 m. Bei einer Drehgeschwindigkeit von 4-5 m/s wurde der Schall sowohl von horizontal als auch von lateral aus einer Entfernung von 0,5 - 1 m ausgesendet und die zurückgeworfenen Echos gemessen. Die Autoren stellten fest, dass die Echos teils so stark gestreut werden, dass diese nicht mehr an der Schallquelle messbar waren. Bei lateraler Beschallung war dies bereits bei 0,5 m und bei horizontaler Beschallung ab 1 m der Fall (Long et al. 2009). Es zeigte sich, dass besonders die laterale Annäherung von Fledermäusen an einen sich drehenden Rotor gefährlich für die Tiere sein kann, weil diese kein klar zu ortendes Echo vom Rotor erhalten. Zudem treten Doppler-Shifts auf, die zu Fehleinschätzungen der Entfernung führen (Long et al. 2010b). Demnach bräuchten Fledermäuse bis zu 50 Echos, um einen sich drehenden Rotor korrekt wahrnehmen zu können. Die verzerrten Echos, die die Fledermäuse in diesem Experiment möglicherweise von den Rotoren mit den Geschwindigkeitsklassen 2 bis 4 erhalten haben,

könnten die Tiere dazu veranlasst haben sich dem unbekanntem Objekt nicht so anzunähern wie an einen stillstehenden oder langsam drehenden Rotor. Grundsätzlich gilt aber zu beachten, dass der Betriebsmodus in der vorliegenden Studie nur einen sehr kleinen Anteil der Varianz in den Daten erklärt und sein Einfluss als vergleichsweise gering einzustufen ist. Der Einfluss der verschiedenen Standorte auf die minimale Distanz einer jeden Flugbahn zum Rotor war grundsätzlich viel stärker ausgeprägt als der Effekt des Betriebsmodus.

Der große Einfluss des Standorts auf die aufgezeichnete Minimaldistanz zum Rotor ist mit folgenden Aspekten zu erklären: Zum einen unterschieden sich die Standorte strukturell (Hecke vs. Waldrand, Acker vs. Grünland, Gebäude vs. keine Gebäude, Gewässer vs. kein Gewässer, vgl. Kapitel 2.2). Diese strukturellen Gegebenheiten können dazu führen, dass sich

die Fledermäuse an manchen Standorten näher am Boden oder den vorhandenen Strukturen aufhielten und damit einen größeren Abstand zum Rotor einhielten. Zum anderen wiesen die verschiedenen Standorte ein unterschiedliches Artenspektrum auf. Das Flugverhalten bei der Jagd und auf Transferflügen variiert zwischen den Arten stark (Dietz et al. 2007). Unterschiede in der Minimaldistanz zum Rotor lassen sich auch im hier vorliegenden Fall zumindest teilweise auf das vorgefundene Artenspektrum zurückführen. So flogen Individuen der Artengruppe *Myotis* durchschnittlich 0,5 m näher an die Anlage als die Artengruppe der Pipistrelloide, wobei sich letztere bis auf eine durchschnittliche Minimaldistanz von 4,6 m an den Rotor annäherten. Individuen der Artengruppe Nyctaloid flogen durchschnittlich 0,6 m weiter entfernt zur KWEA als die Artengruppe der Pipistrelloide. Zusätzlich unterscheiden sich die Tiere in ihrem Flugverhalten abhängig davon, ob sie sich auf der Jagd befinden, gezielt ihr Quartier anfliegen oder in gerichtetem Flug eine Leitstruktur passieren. Beispielsweise bewegen sich Fledermäuse auf Flugstraßen meist sehr gerichtet und wahrscheinlich mit einer geringeren Echoortungsfrequenz als beispielsweise bei der Jagd (Barchi et al. 2013). Alle drei Faktoren (Landschaftliche Struktur, Artzugehörigkeit, Nutzungstyp) sind zwischen den Standorten so unterschiedlich ausgeprägt, dass sie in der Summe den großen Einfluss des Standortes auf das Verhalten der Fledermäuse am Rotor erklären.

#### **4.3.2. Meideverhalten**

Die vorliegende Studie zeigt, dass sich die Fledermäuse an den beprobten Standorten häufig an den Rotor annäherten und über eine ausgeprägte Ausweichfähigkeit verfügen. Ein Gewöhnungseffekt der Fledermäuse bezüglich der KWEA wurde während der jeweils fünf Tage der Experimentdurchführung nicht beobachtet. Richtungsänderungen und Annäherungen an den Rotor wurden an jedem Standort auch an Tag vier bzw. fünf dokumentiert. Möglicherweise ist der hier untersuchte Zeitraum von wenigen Tagen auch zu kurz, um einen Gewöhnungseffekt hervorzurufen.

Es darf allerdings nicht vom Ausweichverhalten auf ein Meideverhalten bzw. einen Vergrämungseffekt geschlossen werden. Ausweichverhalten findet im kleinen Raum um den Rotor herum statt, meist infolge eines Annäherungsflugs. Über die vorliegenden visualisierten Richtungsänderungen innerhalb der aufgezeichneten Flugbahnen ist dies erkennbar. Ein Meideverhalten würde auf einer größeren Skala um die KWEA herum stattfinden und eher durch Störung der Tiere durch die Silhouette, die Rotorbewegung oder die Betriebsgeräusche ausgelöst werden. Im schlimmsten Fall könnten die Tiere ihre Flugrouten oder Jagdgebiete nicht mehr nutzen, es käme also zu einem Verlust von Lebensstätten (Minderman et al. 2017).

Da in der Studie aufgrund der technischen Voraussetzungen nur sehr kleinräumig wenige Meter um die KWEA herum untersucht wurde (vgl. Abb. 5), können zu einem möglichen großräumigen Meideverhalten der Fledermäuse keine Aussage getroffen werden. Das hohe Fledermausaufkommen unmittelbar um die Anlage legt aber nahe, dass es zumindest auf der von uns untersuchten Skala keinen Meideeffekt gab. Auch bei schnell drehenden Rotoren hielten die Tiere nicht mehr Abstand zur KWEA als zur Teleskopstange, bei niedrigen Geschwindigkeiten oder stillstehendem Rotor näherten sie sich sogar noch mehr an. Allerdings wurden im vorliegenden Fall auch spezielle Lebensräume ausgewählt, die aufgrund ihrer Quartiernähe oder Jagdhabitatqualität von besonders hoher Bedeutung für die Fledermäuse sind. Hier könnte die Toleranzschwelle gegenüber möglichen Störeffekten vielleicht zunächst noch höher sein.

Bisher veröffentlichte internationale Untersuchungen zum Thema Meideverhalten von Fledermäusen an KWEA stammen sämtlich aus Großbritannien (Minderman et al. 2012; Minderman

et al. 2015; Moyle 2016; Minderman et al. 2017). In einem Fall wurde hierbei auf eine kleinräumige Meidung bis auf 25 m an KWEA geschlossen (Minderman et al. 2012), in einer zweiten Studie schienen die Zwergfledermäuse KWEA mit zunehmendem Wind bis auf 100 m zu meiden (Minderman et al. 2017). Aufgrund der geringen Stichprobe von maximal vier Nächten und der großen Anzahl unterschiedlicher KWEA-Typen innerhalb der 20 untersuchten KWEA, sind die Ergebnisse jedoch nur unter Vorbehalt zu betrachten. Auch Moyle (2016) entdeckt ein Meideverhalten der Fledermäuse gegenüber KWEA in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, allerdings kehrte sich hier das Phänomen zu einem Anlockungseffekt um, sobald es windstill war. Dieser Effekt findet sich auch bei der eingangs genannten Studie, in der die Aktivität der Fledermäuse mit höheren Windgeschwindigkeiten anstieg, sobald die Anlagen außer Betrieb waren (Minderman et al. 2012). In der einzigen uns bekannten weiteren Vorher-Nachher-Studie mit einer mobilen KWEA (Tatchley 2015) war die akustisch gemessene Aktivität von Zwergfledermäusen nahe der KWEA geringer als an entfernteren Referenzpunkten. Auch Mückenfledermäuse mieden zumindest im experimentellen Ansatz die errichtete KWEA. Arten der Gattung *Myotis* waren im Nahbereich bestehender KWEA weniger aktiv, wenn die Windgeschwindigkeit zunahm (Tatchley 2015). Es ist also durchaus denkbar, dass in den genannten Studien die Fledermäuse gar nicht die KWEA selbst mieden. Vielmehr könnte es sein, dass die Tiere die durch Wind erzeugte Störgeräusch oder die höheren Windgeschwindigkeiten der lokalen Umgebung mieden, da KWEA grundsätzlich an windhöffigen Standorten errichtet werden. Ferner muss bei den bisher zitierten Studien berücksichtigt werden, dass nur indirekte Rückschlüsse über die akustisch gemessene Fledermausaktivität möglich sind. Bei akustischen Messungen kann aber nicht unterschieden werden, ob ein einzelnes Tier wiederholt in der Nähe des Detektors jagt und viele Rufsequenzen des gleichen Individuums aufgezeichnet werden oder eine Vielzahl von Tieren jeweils nur einzelne Rufsequenzen emittiert. Die Anzahl der aufgezeichneten Rufsequenzen ist in beiden Szenarien gleich, allerdings würden die Auswirkungen im ersten Fall nur Einzeltiere betreffen, im zweiten möglicherweise bereits die lokale Population.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass aufgrund der großen Anzahl von Flugbahnen in unmittelbarer Rotornähe ein großräumiges Meideverhalten der Fledermäuse an der KWEA unwahrscheinlich ist. Für die Einschätzung, ob sich möglicherweise über die Jahre dieses entwickeln würde, bräuchte es ein anderes Studiendesign. Andere Studien legen ein Meideverhalten bis zu mehreren hundert Metern nahe, welchem aber auch Effekte von Wind, Standort oder der Erfassungsmethode zugrunde liegen könnten.

#### **4.4. Kollisionsrisiko für Fledermäuse an KWEA**

Angesichts der Vielzahl an aufgezeichneten Flugbahnen ( $n=7.850$ ) und der allgemein hohen Fledermausaktivität, die auf das worst-case-Studiendesign zurückzuführen ist, erscheint das Kollisionsrisiko mit einer geschlagenen Fledermaus zunächst eher gering. Nur ein kleiner Teil der aufgenommenen Flugbahnen ( $n = 141$ ) durchflog den vom Rotor überstrichenen Bereich, und nur knapp die Hälfte davon zu einem Zeitpunkt, zu dem sich der Rotor tatsächlich drehte. Es ist allerdings zu bedenken, dass dies im vorliegenden Experiment in der Summe nur während 47 Stunden der Fall war. Obwohl also die meisten Fledermäuse den Durchflug unbeschadet überstanden, hätten sich durchaus noch mehr Kollisionen ereignen können, wenn das Experiment über mehrere Wochen und Monate bei stetig laufendem Rotor durchgeführt worden wäre. Dabei hätte auch der bei WEA angewandte Schwellenwert von 1 - 2 toten Fledermäusen pro WEA und Jahr überschritten werden können. Hinsichtlich des Kollisionsrisikos gilt jedoch zu beachten, dass im vorliegenden Fall explizit Risiko-Standorte mit sehr hohen Fledermausaktivitäten ausgewählt und das Experiment ausschließlich bei wenig bis keinem Wind mit ei-

nem motorbetriebenen Rotor durchgeführt wurde. Es ist davon auszugehen, dass die im Experiment provozierten Rahmenbedingungen nicht der Betriebsstandardsituation entsprechen. Im Normalfall ist i. d. R. von einer geringeren Gefährdung auszugehen, da die Rotoren sich bei Windstille nicht drehen.

Andere Studien schätzen die Kollisionsgefährdung an KWEA gering ein. Die Spannweite reicht von keinen gefundenen Fledermäusen an 21 KWEA über zwei Jahre (Minderman et al. 2015) bis hin zu drei toten Fledermäusen an 31 KWEA über einen Zeitraum von drei Jahren (Moyle 2016). In erstgenannter Studie wurde zusätzlich zu der erfolglosen Schlagopfernachsuche eine Befragung unter 271 KWEA-Betreibern durchgeführt. Hier wurde von drei toten Fledermäusen berichtet, was zu einer theoretischen Schlagopferquote von 0,008 bis 0,169 geschlagenen Fledermäusen pro KWEA und Jahr führt. Allerdings ist dieses Ergebnis kritisch zu betrachten, da die befragten KWEA-Betreiber weder für die Suche von Fledermäusen geschult wurden, noch es nicht bekannt ist, ob und wie viel Zeit sie für die Suche von Schlagopfern aufwendeten (Minderman et al. 2015). Es handelt sich hier also um Zufallsfunde. Zudem ist zu erwarten, dass die Betreiber innerhalb der Studie nicht unbedingt geneigt sind, über Kollisionen an ihren KWEA zu berichten. Die tatsächliche Zahl an getöteten Fledermäusen pro KWEA und Jahr ist an den betrachteten Anlagen daher vermutlich höher. Dies ergibt auch die Studie von Moyle (2016), in der die Schlagopfer mittels eines speziell trainierten Suchhunds aufgespürt wurden. Die berechnete Schlagrate innerhalb dieser Studie wurde mit 0,81 toten Fledermäusen pro KWEA und Jahr angegeben. Eine worst-case-Analyse geht sogar von 15,15 geschlagenen Fledermäusen pro KWEA und Jahr aus (Moyle 2016).

Dass diese Schätzung im Extremfall plausibel sein kann, zeigt eine Studie aus der Schweiz. Hier wurde im Randbereich eines Industriegebiets eine KWEA mit drei nebeneinanderliegenden Rotoren (Durchmesser je 13,5 m) auf ca. 25 m Höhe zwischen Juli und September 2016 mittels Wärmebildkameras überwacht (Alder 2017). Durch diese Methode konnten während 1.781 Beobachtungsstunden 203 Ausweichmanöver sowie acht Kollisionen in einem Zeitraum von knapp drei Monaten beobachtet werden.

Es müssen aber nicht immer hohe Fledermausaktivitäten vorliegen, um eine Kollision an KWEA zu verursachen. Die in dieser Studie dokumentierte Kollision fand am Standort Gündlingen bei ca. 45 km/h Rotorgeschwindigkeit statt. Im Vergleich zu den anderen Standorten herrschte hier die geringste akustische Fledermausaktivität und die Tiere hielten durchschnittlich den größten Abstand zum Rotor. Möglicherweise handelte es sich bei der Fledermaus um ein Jungtier, da diese zum Zeitpunkt der Untersuchung in Gündlingen – im Gegensatz zu den ersten vier beprobten Standorten – bereits flügge waren. Jungtiere besitzen noch nicht dieselbe Manövrierfähigkeit wie adulte Fledermäuse (Lesiński 2007). Es ist denkbar, dass eine junge Fledermaus dem sich langsam drehenden Rotor nicht rechtzeitig ausweichen konnte. Leider konnte das geschlagene Tier, das in die angrenzende Hecke geschleudert wurde, trotz aufwendiger Nachsuche nicht gefunden werden. Es bleibt also Spekulation, ob es sich bei dem geschlagenen Tier tatsächlich um ein Jungtier handelte.

#### **4.5. Methodenkritik**

Um das Fledermausaufkommen im Rotorbereich filmen zu können, wurden eine Infrarot-Kamera und Infrarotstrahler eingesetzt. Bedenken, dass die Infrarot-Strahler des eingesetzten Kamerasystems nachtaktive Insekten anlocken, die wiederum Fledermäuse auf Nahrungssuche zu der Lichtquelle ziehen und damit die festgestellten Aktivitätsdaten künstlich erhöhen, können über drei Wege ausgeräumt werden. Erstens gibt es in der Literatur keine eindeutigen Hinweise dafür, dass Insekten von Infrarotlicht angezogen werden (Long et al. 2010a). Es ist bekannt, dass Insekten Licht in diesem Wellenlängenbereich wahrnehmen können (Briscoe &

Chittka 2001), allerdings ist die Attraktionswirkung von Licht im UV- und mittelwelligen Bereich auf Insekten deutlich stärker (Long et al. 2010a). Zweitens wurden während der Untersuchungen in Norddeutschland in beiden Jahren der automatisierten akustischen Dauererfassung ähnliche relative Fledermausaktivitäten an den KWEA festgestellt. Die Stereo-Infrarot-Kamerasysteme kamen nur im zweiten Jahr zum Einsatz. Eine Attraktionswirkung auf Insekten und damit Fledermäuse hätte sich in höheren Zahlen der detektierten Rufsequenzen im zweiten Erfassungsjahr niederschlagen müssen. Dies war nicht der Fall. Die Anzahl von Aufnahmen pro Nacht war für die Monate Juli bis September im Jahr 2016 insgesamt leicht höher als 2015, jedoch wurden für die Erfassungen im Jahr 2016 die KWEA mit der höchsten Fledermausaktivität beprobt. Um eine Lockwirkung definitiv ausschließen zu können, wurde drittens während der Untersuchungen in Süddeutschland der Infrarotstrahler auf mögliche Insektenakkumulationen hin untersucht. Im Nahbereich des Strahlers wurde kein vermehrtes Auftreten von Insekten festgestellt. Eine relevante Lockwirkung von Fledermäusen in das Sichtfeld der Kamera kann damit ausgeschlossen werden.

Es gilt zu beachten, dass die Detektion der Fledermausflugbahnen um den Rotor herum durch den Kameraausschnitt und den vom Infrarotlicht ausgeleuchteten Kegel nur ein eingeschränktes Bild liefert und nicht den Raum um die KWEA in jede Richtung gleich weit abbildet. Die Detektionswahrscheinlichkeiten von Flugbahnen hinter und über der KWEA (aus Kamerasicht betrachtet) war beispielsweise niedriger als z. B. im Raum zwischen Kamera und Rotor. Auch die Bereiche seitlich des Rotors wurden nur eingeschränkt abgebildet (vgl. Abb. 5). Auch wenn nicht sämtliche Bereiche um die KWEA und damit nicht alle Flugbahnen vollständig erfasst wurden, sind die Ergebnisse relativ zueinander gut zu vergleichen. Durch die lückenlose Parallelbeobachtung mit Nachtsichtgerät, welches ein viel größeres Sichtfeld ermöglichte als die Kamera, konnte bestätigt werden, dass die Aktivitätsschwerpunkte der Fledermäuse, und damit ein Großteil der Flugbahnen, im von der Kamera detektierbaren Bereich lagen und die Tiere nicht etwa ein jenseits des Kamerakegels liegendes Ausweichverhalten zeigten.

## 5. Erkenntnisse aus dem Expertenworkshop

Am 28.03.2019 fand im Bundesamt für Naturschutz, Außenstelle Leipzig, ein Expertenworkshop zum Thema „Kleinwindenergie und Fledermäuse“ mit 23 Teilnehmerinnen und Teilnehmern statt. Die Ergebnisse wurden in Kleingruppen diskutiert. Die Aufteilung erfolgte in Gutachter, Behörden und Fledermausschutz/Forschung. Ein wichtiger Diskussionspunkt war insbesondere, wie das Kollisionsrisiko an KWEA zu interpretieren ist und welche Relevanz sich hieraus für die Praxis ableiten lässt. Jede Gruppe hat folgende Fragen bearbeitet:

1. Wie schätzen Sie das Kollisionsrisiko für Fledermäuse an KWEA basierend auf den Ergebnissen von KWEA 1 (Nord) und 2 (Süd) ein?
2. Welche Empfehlungen an die Planungs- und Genehmigungspraxis würden Sie aus Ihrer Einschätzung des Kollisionsrisikos an KWEA ableiten?
3. Welche Anforderungen an die Antragstellung können oder müssen gestellt werden?
4. Welche Vermeidungsmaßnahmen sind denkbar und sollten gefordert werden?
5. Welche Forschungsfragen sehen Sie bzw. welche Fragen bleiben offen?

In der Gruppe der **Gutachter** wurde die Einschätzung getroffen, dass das Kollisionsrisiko schwer einschätzbar sei und es noch mehr Forschung bräuchte, um diese Frage fundiert beantworten zu können. Tendenziell deutete sich aber aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ein eher geringes Kollisionsrisiko an, welches aber mit der Nähe zu Strukturen vermutlich höher zu beurteilen ist. Ferner wurden Rotordurchmesser und Rotorgeschwindigkeit als wichtige Punkte genannt, die das Gefährdungspotential an einer KWEA mit beeinflussen. Im Hinblick auf Empfehlungen für die Planungs- und Genehmigungspraxis wurde von der Gruppe der Gutachter vorgeschlagen, dass KWEA um die 50 m Gesamthöhe mit Voruntersuchungen belegt werden sollten. Da diese Anlagen aber wie WEA eine interne Steuerung besitzen, könnte alternativ auch eine pauschale Abschaltung erfolgen und ein Gutachten bzw. die Voruntersuchungen dann entfallen. Ferner sollte bei allen größeren KWEA immer eine Überprüfung auf Schlagopfer erfolgen, da ein Teilnehmer über zahlreiche Schlagopfer bei KWEA am oberen Ende der Größenskala zu berichten wusste. Die Gruppe der Gutachter hielt die Abstandshaltung zu für Fledermäuse interessanten Strukturen für die wichtigste Vermeidungsmaßnahme, weitere Vermeidungsmöglichkeiten bestünden in meteorologisch gesteuerten Abschaltungen wie sie die Fledermausschutzbox ermöglicht. Aus Sicht der Gutachter bleibt ein Forschungsbedarf insbesondere an den großen KWEA offen, ebenso an KWEA mit Vertikalläufnern.

In der Gruppe **Behörden** wurde die Einschätzung getroffen, dass das Kollisionsrisiko an KWEA unter 10 m unter Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse als eher gering einzuschätzen sei und dass die Fledermäuse den drehenden Rotoren bei den sehr kleinen Anlagen offenbar gut ausweichen könnten, selbst wenn es sich um Standorte mit sehr hoher Fledermausaktivität handelt. Allerdings dürfte diese Einschätzung auf keinen Fall auf andere KWEA-Typen übertragen werden und es sei daher auch nicht möglich, hier eine grundsätzliche Einschätzung zum Kollisionsrisiko an KWEA zu treffen. Ökologische Gutachten wurden von der Gruppe der Behördenvertreter nur dann als nötig eingestuft, wenn eine Abstandsregelung zu Strukturen nicht eingehalten werden kann. Auch die Behördenvertreter sprachen sich für eine Abstandsregelung als erste Vermeidungsmaßnahme aus. Zu Strukturen mit potenzieller Funktion als Jagdgebiet oder Flugstraße sollte ein Abstand von 20 m gehalten werden, zu potenziellen Quartieren ein Abstand von mindestens 30 m. Eine Abschaltung von KWEA unter zehn Meter Höhe wurde von der Gruppe der Behördenvertreter als nicht nötig erachtet, bei KWEA größer zehn Meter waren sich die Gruppenteilnehmer nicht einig. Eine Kompromisslösung

wäre eine pauschale Abschaltung der KWEA mit z. B. der Fledermausschutzbox. Forschungsbedarf sehen die Behördenvertreter bei weiteren Größenklassen von KWEA und KWEA-Typen.

Die Gruppe **Fledermausschutz und Forschung** kam zu der Einschätzung, dass offensichtlich ein gewisses Kollisionsrisiko an KWEA vorliegt, es aber schwierig einzuschätzen sei, wie relevant dieses ist. Das Kollisionsrisiko sei standortabhängig und könne daher nicht pauschal abgeschätzt werden. Ökologische Gutachten bei der Realisierung von KWEA einzufordern, wurde von dieser Gruppe als unverhältnismäßig eingestuft. Es solle stattdessen lieber eine Abstandsregelung eingeführt werden. Einen tatsächlichen Abstandswert könne man ohne belastbare Daten, also speziell auf diese Fragestellung hin ausgerichtete Forschung, jedoch nicht abschätzen. Falls aus bestimmten Gründen eine Abstandsregelung zu fledermausrelevanten Strukturen nicht möglich sein sollte, sprach sich die Gruppe dafür aus, die KWEA dann pauschal abzuschalten. Forschungsbedarf sehen die Fledermausschützer und Forscher bei der Klärung der Frage nach konkreten Abstandsregelungen. Es sollte also das Verhalten der Fledermäuse an verschiedenen Strukturen und in Abständen zu diesen detailliert untersucht werden.

Zusammenfassend wurde von allen drei Gruppen konstatiert, dass im Expertenkreis sowie im breiten Anwenderkreis weiteres Forschungsinteresse vorhanden ist und in Bezug auf verschiedene Anlage-Typen (z. B. auf Hausdächern) als wichtig erachtet wird. Eine bundesweite Handlungsempfehlung zum Thema KWEA würde vielen Behörden sehr helfen. Im Hinblick auf die vorgeschlagenen Vermeidungsmaßnahmen wurde von einem Teilnehmer die Fledermausschutzbox vorgestellt: Die Schutzbox wurde vor dem Hintergrund entwickelt, dass im Zuge der KWEA-Planung mangels Leitfäden von Behörden oft ökologische Gutachten gefordert wurden, diese aber in Relation zu Kosten und Ertrag der KWEA unverhältnismäßig teuer seien. Die Schutzbox hingegen sei mit etwa 1.000 € relativ günstig und ermögliche pauschale Abschaltungen der KWEA vom 15. März bis zum 20. November zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang abhängig von Wind und Temperaturschwellenwerten. Bei dem Gerät handle es sich um ein Logikmodul von SIEMENS, das programmierbare Relais und Datalogger enthält. Insgesamt seien bisher nur 20 bis 30 Stück verkauft und die Produktion im Jahr 2017 vorerst eingestellt worden. Die Produktion ließe sich aber bei Bedarf problemlos wieder aufnehmen.

## **6. Empfehlungen für die Planung sowie für den Betrieb von KWEA**

Die vorliegende Studie zeigt, dass insbesondere an Standorten mit hohem Fledermausauftreten auch bei kleinen Windenergieanlagen ein gewisses Kollisionsrisiko besteht. KWEA unter 10 m Gesamthöhe sind bisher nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) keine genehmigungsbedürftigen Anlagen und bedürfen keiner Umweltverträglichkeitsprüfung (Reinhard & Günther 2013). Dennoch dürfen sie keine artenschutzrechtlichen Verbotstatbestände nach § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG auslösen. Die Studienergebnisse legen nahe, dass es bei schlechter Standortplanung und entsprechend langer Laufzeit zu Kollisionen an kleinen Windenergieanlagen kommen kann. Insbesondere in Quartiernähe oder im Bereich von Flugstraßen könnte die Schwelle des signifikant erhöhten Tötungsrisiko von 1 - 2 toten Fledermäuse pro Jahr und Anlage überschritten werden. Zudem sollte bedacht werden, dass eine KWEA deutlich weniger Strom produziert als eine WEA. Während der Diskussionsrunde des Expertenworkshops sind wichtige Impulse gegeben worden, wie mögliche negative Beeinträchtigungen von Fledermäusen durch KWEA verringert werden können (siehe Kapitel 5). Die wichtigsten Maßnahmen werden hier noch einmal aufgegriffen und im Detail erläutert.

## **Standortwahl für KWEA**

Die von allen Teilnehmern des Expertenworkshops priorisierte Methode zur Vermeidung von Schlagopfern an KWEA und damit des Tötungstatbestands nach § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG ist die auf Fledermaus-Bedürfnisse angepasste Standortwahl. Generell werden KWEA überwiegend an oder in der Nähe der zu versorgenden Gebäude installiert (Jüttemann 2017). Diese Platzierung der KWEA in meist kleinstrukturierten Landschaften oder Siedlungsbereichen überschneidet sich zu großen Teilen mit Quartier- und Jagdhabitatspräferenzen von Fledermäusen (Reinhard & Günther 2013).

Über die Hälfte der europäischen Fledermausarten beziehen zumindest im Sommer Quartiere in oder an Gebäuden (Dietz et al. 2007). Entsprechend korreliert ihr Auftreten positiv mit dem Anteil von Siedlungsflächen im Umfeld (Mehr et al. 2011). Zu diesen Arten zählen zum Beispiel die Zwergfledermaus, das Große Mausohr sowie die Bartfledermaus oder das Graue Langohr (Dietz et al. 2007). Einige Arten jagen auch gezielt im Siedlungsbereich, da sie an Straßenlaternen, in Kuhställen, auf Viehweiden, Gärten oder in Streuobstwiesen ein reiches Nahrungsangebot vorfinden (Dietz et al. 2007). Auf ihren Flugrouten orientieren sich die Fledermäuse häufig an kleinräumigen, linearen Strukturen (Verboom & Huitema 1997; Verboom & Spoelstra 1999; Kelm et al. 2014). Damit ist es wahrscheinlich, dass Fledermäuse bereits auf ihren Wegen zwischen Quartier und Jagdhabitat mit KWEA in Kontakt kommen können (Tatchley 2015; Moyle 2016).

Um dies wirkungsvoll zu vermeiden, sollten KWEA immer abseits von für Fledermäuse interessanten Strukturen (z. B. Wälder, Waldränder, Feldgehölze, Hecken, Knicks, Streu- und Spalierobstbestände, Einzelbäume, Fließ- und Stillgewässer, Gebäude mit Quartierpotential, Straßenlaternen) errichtet werden. Konkrete Abstandsempfehlungen zu derartigen Strukturen lassen sich aus der vorliegenden Untersuchung nicht ableiten, der Forschungsansatz zielte auch nicht auf diese Fragestellung ab. Abstandsempfehlungen, die aus der bisher verfügbaren Literatur hervorgehen, schlagen einen Mindestabstand von 20 m zwischen KWEA und den nächstgelegenen Strukturen vor (Minderman et al. 2012; Moyle 2016). Auch der Leitfaden aus Rheinland-Pfalz greift diesen Abstand zu potentiellen Quartieren und häufig frequentierten Leit- und Habitatstrukturen sowie künstlichen Lichtquellen auf (LUWG Rheinland-Pfalz 2015). Da Fledermausarten unterschiedlich eng an der Vegetation jagen, müssten sich Abstandsempfehlungen aber ohnehin an der Situation vor Ort und dem vorkommenden Artenspektrum orientieren. Denkbar wäre auch, dass im Rahmen einer Begehung vor Ort das Kollisionsrisiko in Abhängigkeit der umliegenden Strukturen und der zu erwartenden Fledermäuse gutachterlich eingeschätzt wird und ggf. weitergehende Empfehlungen zur Platzierung gegeben werden.

## **Vermeidung von betriebsbedingten Kollisionen**

Eine weitere Möglichkeit, um das Kollisionsrisiko zu senken, wäre möglicherweise, die KWEA nach der Installation zunächst nachts nicht in Betrieb zu nehmen, damit den Fledermäusen ein gefahrloses erstes Erkunden ermöglicht wird. Wahrscheinlich ist der Unterschied in der Fledermausaktivität zwischen dem nord- und dem süddeutschen Forschungsvorhaben zumindest teilweise auch darin begründet, dass in KWEA Nord die Anlagen bereits mehrere Jahre in Betrieb waren, ein Erkundungsverhalten zumindest im großen Stil nicht zu erwarten war. Wie lang ein entsprechender Zeitraum sein müsste, kann aus den gewonnenen Daten allerdings nicht abgeleitet werden. Ein Gewöhnungseffekt war zumindest während der ersten fünf Tage Experimentzeitraum noch nicht festzustellen. Die Fledermäuse zeigten insbesondere dann ein erhöhtes Erkundungsverhalten, wenn die Rotoren sich langsam drehten. Es ist also

nicht davon auszugehen, dass mit dieser Maßnahme sämtliche durch Erkundung herbeigeführten Gefahrensituationen vermieden werden können.

Um die Kollisionsgefahr für Fledermäuse an KWEA weiter zu senken, können die Anlagen zu Zeiten hoher Fledermausaktivität abgeschaltet werden. Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass die Fledermausaktivität positiv mit der Temperatur sowie negativ mit der Windgeschwindigkeit korreliert ist (Verboom & Huitema 1997; Verboom & Spoelstra 1999; Rydell et al. 2010; Baerwald & Barclay 2011; Bach et al. 2012; Cryan et al. 2014; Kelm et al. 2014; Reichenbach et al. 2015; Moyle 2016). Insbesondere um Unwägbarkeiten wie geografischen, technischen und artspezifischen Besonderheiten gerecht zu werden, und somit sicherzustellen, dass der Betrieb von KWEA keine artenschutzrechtlichen Verbotstatbestände auslöst, kann der Einsatz von Abschaltalgorithmen sinnvoll sein. Das kann zum Beispiel in Form von pauschalen Abschaltungen oder angepassten Abschaltalgorithmen (z. B. die einst für KWEA konzipierte Fledermausschutzbox des Kompetenzzentrum Kleinwindkraft) geschehen. Diese Vermeidungsmaßnahme wird aktuell bei großen WEA bereits umfassend angewendet (Brinkmann et al. 2011; Behr et al. 2016).

Bei den pauschalen Abschaltungen müssten die KWEA in der Regel in einem Zeitraum zwischen dem 1. April und dem 31. Oktober nachts abgeschaltet werden. Der Leitfaden mit Hinweisen zur artenschutzfachlichen Beurteilung von Kleinwindenergieanlagen aus Rheinland-Pfalz dehnt diesen Zeitraum für KWEA aus Vorsorgegesichtspunkten auf den 15. März bis zum 15. November aus, weil davon auszugehen ist, dass die Fledermausaktivitätszeiträume in Bodennähe sich weiter in den Winter hinein erstrecken als in großer Höhe. Diese Abschaltregelungen werden insbesondere die auf Hausdächern platzierten KWEA betreffen, da hier ein Abrücken von den relevanten Strukturen nicht möglich ist.

Aber auch wesentlich größere KWEA-Typen, die mit einer Gesamthöhe von bis zu 50 m die hier untersuchte KWEA um ein Vielfaches überragen, sowie in Situationen, die mit hohen Unsicherheiten bezüglich der Fledermausaktivität am Standort behaftet sind, sollten mit Abschaltung betrieben werden. Auch aus dem Expertenworkshop geht der Konsens hervor, dass große KWEA-Typen bis 50 m Höhe in der Planungs- und Genehmigungspraxis eher den WEA zuzuordnen sind und damit betriebsbedingte Vermeidungsmaßnahmen unumgänglich sind.

## **7. Zusammenfassung und Ausblick**

Erstmalig wurde mittels der durchgeführten Feldstudie die Gefährdungssituation für Fledermäuse unmittelbar nach Errichtung und Inbetriebnahme einer KWEA experimentell nachgestellt. Durch das gewählte Studiendesign einschließlich moderner Technik konnten im Rotorbereich zahlreiche Fledermäuse beobachtet werden. Die Auswertungen der 3-D Infrarotkameraaufzeichnungen haben veranschaulicht, dass die untersuchten Fledermausarten i. d. R. eine gute Manövrierfähigkeit besaßen und sogar unmittelbare Rotordurchflüge unbeschadet überstanden haben.

Gezeigt hat sich außerdem, dass die Tiere umso mehr Abstand zur KWEA hielten, je heller es noch war. Unterschiedliche Betriebsmodi wirkten sich dahingehend aus, dass langsam drehende Rotoren mehr Erkundungsverhalten und eine stärkere Annäherung an den Rotor zur Folge hatten als ein stillstehender oder sich schnell drehender Rotor. Insgesamt waren die Einflüsse der unterschiedlichen Standorte mit ihrer unterschiedlichen Vegetationsstruktur, Art des Fledermausaufkommens (Flugstraße, Quartier, Jagdbereich) und vor allem ihres unterschiedlichen Artenspektrums um ein Vielfaches wichtiger für den zum Rotor gehaltenen Abstand, als der Betriebsmodus. So näherten sich Arten der *Myotis*-Gruppe, wie die Bartfledermaus, deutlich näher an den Rotor an als Pipistrelloide wie Zwerg- und Mückenfledermaus.

Letztere wiederum flogen näher an den Rotor heran als Tiere aus der Gruppe der Nyctaloide wie beispielsweise Kleinabendsegler und Abendsegler. Das Annäherungsverhalten der Fledermäuse steht im Einklang mit der Strukturgebundenheit der genannten Fledermausgruppen.

Dass insbesondere bei Standorten in Quartiernähe oder in Flugstraßennähe durchaus ein höheres Gefährdungspotenzial bestehen kann, zeigte die Kollision einer Mückenfledermaus in den nur 47 Stunden des Experiments mit drehendem Rotor. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Schwellenwerte von 1 bis 2 toten Fledermäusen pro Jahr und Anlage auch durch kleine KWEA überschritten werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Anlagen an Orten mit hoher Fledermausaktivität platziert werden. Vermeidungsmaßnahmen können zur Verringerung des Kollisionsrisikos daher angezeigt sein. Zu beachten ist außerdem, dass kleine KWEA, selbst wenn sie grundsätzlich mit einem geringeren Kollisionsrisiko behaftet scheinen, mit ihrer Leistung auch sehr viel weniger Strom produzieren.

Hinsichtlich des Erkundungsverhaltens, der Manövrierfähigkeit sowie letztendlich des Kollisionsrisikos sind vergleichbare Ergebnisse mit handelsüblichen KWEA ähnlicher Größenordnung (sog. Mikro-Windenergieanlagen) zu erwarten. Neben dem in dieser Studie untersuchten KWEA-Typ existieren zahlreiche andere Anlagentypen, zu deren Kollisionsrisiko bisher keine Erkenntnisse vorliegen. Dies gilt insbesondere für unmittelbar auf Hausdächern installierbare Bautypen mit teilweise vertikal drehenden Rotoren. Die Ergebnisse zum Kollisionsrisiko sind hier nicht übertragbar.

Bezüglich anderer Anlagentypen, insbesondere Vertikalrotoren, und andere Standorte (gebäudemontierte Anlagen, KWEA an künstlichen Lichtquellen) können nur weitere Forschungsvorhaben zu mehr Klarheit führen. Ähnliches gilt für eine Untersuchung des Gefährdungspotenzials von Fledermaus-Jungtieren im Vergleich zu adulten Tieren mittels Flugexperimenten zu deren Manövrierfähigkeit, um ggf. einen jahreszeitlich schwankenden Gefährdungsgrad bestimmen zu können. Für große KWEA mit bis zu 50 m Nabenhöhe sind die Ergebnisse aufgrund zu großer Unsicherheiten insbesondere hinsichtlich der Manövrierfähigkeit nicht übertragbar. Hier dürfte das Kollisionsrisiko eher denen von WEA ähneln.

## 8. Literaturverzeichnis

- Alder, H. (2017). Langzeit-Monitoring an einer Kleinwindanlage mittels Wärmebild-Kameras und Chancen für die Risiko-Einschätzung. Nationale Tagung Fledermausschutz und Fledermausforschung 2017, Bern, Schweiz, Schweizer Koordinationsstelle für Fledermausschutz, 10 S.
- Arnett, E. B., Baerwald, E. F., Mathews, F., Rodrigues, L., Rodríguez-Durán, A., Rydell, J., Villegas-Patracca, R. & Voigt, C. C. (2016): Impacts of Wind Energy Development on Bats: A Global Perspective. – In: Voigt, C. C. & Kingston, T. (Hrsg.): Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World. – Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London (Springer International Publishing).
- Bach, L., Bach, P., Tillmann, M. & Zucchi, H. (2012): Fledermausaktivität in verschiedenen Straten eines Buchenwaldes in Nordwestdeutschland und Konsequenzen für Windenergieplanungen. – Naturschutz und Biologische Vielfalt 128: 147-158.
- Baerwald, E. F. & Barclay, R. M. R. (2011): Patterns of activity and fatality of migratory bats at a wind energy facility in Alberta, Canada. – The Journal of Wildlife Management 75: 1103-1114.
- Baerwald, E. F., D'Amours, G. H., Klug, B. J. & Barclay, R. M. R. (2008): Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. – Current Biology 18: 695-696.
- Baerwald, E. F., Patterson, W. P. & Barclay, R. M. R. (2014): Origins and migratory patterns of bats killed by wind turbines in southern Alberta: evidence from stable isotopes. – Ecosphere 5: 1-17.
- Barchi, J. R., Knowles, J. M. & Simmons, J. A. (2013): Spatial memory and stereotypy of flight paths by big brown bats in cluttered surroundings. – The Journal of Experimental Biology 216: 1053-1063.
- Barclay, R. M. R., Baerwald, E. F. & Gruver, J. C. (2007): Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. – Canadian Journal of Zoology 85: 381-387.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015): Fitting linear mixed-effects models using lme4. – Journal of Statistical Software 67: 1-48.
- Behr, O., Brinkmann, R., Korner-Nievergelt, F., Nagy, M., Niermann, I., Reich, M. & Simon, R. (2016): Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore Windenergieanlagen (RENEBAT II): Ergebnisse eines Forschungsvorhabens. – Hannover (Repositorium der Leibniz Universität Hannover (Umwelt und Raum; 7)): 374 S.
- Behr, O. & Rudolph, B.-U. (2013): Fachliche Erläuterungen zum Windkrafteerlass Bayern. Verringerung des Kollisionsrisikos durch fledermausfreundlichen Betrieb der Anlagen. – Augsburg (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)): 30 S.
- Bernotat, D. & Dierschke, V. (2016): Übergeordnete Kriterien zur Bewertung der Mortalität wildlebender Tiere im Rahmen von Projekten und Eingriffen. 460 S.
- BMU (2016). Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, N. u. n. S. Berlin, Germany, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: 92 S.
- BMWi (2018): Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017. – URL: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=27](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=27) (gesehen am 15.08.2019).

- Brinkmann, R., Behr, O., Niermann, I. & Reich, M. (2011): Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. – Göttingen (Cuvillier Verlag): 457 S.
- Brinkmann, R., Schauer-Weisshahn, H. & Bontadina, F. (2006): Untersuchungen zu möglichen betriebsbedingten Auswirkungen von Windkraftanlagen auf Fledermäuse im Regierungsbezirk Freiburg. – Gundelfingen (Gutachten im Auftrag des Regierungspräsidiums Freiburg - Referat 56 Naturschutz und Landschaftspflege): 66 S.
- Briscoe, A. D. & Chittka, L. (2001): The Evolution of Color Vision in Insects. – Annual Review of Entomology 46: 471-510.
- Bulling, L., Sudhaus, D., Schnittker, D., Schuster, E., Biehl, J. & Tucci, F. (2015): Vermeidungsmaßnahmen bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen. Bundesweiter Katalog von Maßnahmen zur Verhinderung des Eintritts von artenschutzrechtlichen Verbotstatbeständen nach § 44 BNatSchG. – (Fachagentur Windkraft an Land).
- Cryan, P. M. & Barclay, R. M. R. (2009): Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. – Journal of Mammalogy 90: 1330-1340.
- Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Diehl, R. H., Huso, M. M. P., Hayman, D. T. S., Fricker, P. D., Bonaccorso, F. J. & Johnson, D. H. (2014): Behavior of bats at wind turbines. – Proceedings of the National Academy of Sciences 111: 15126-15131.
- Dietz, C., Dietz, I., Hartmann, S., Hurst, J., Kohnen, A., Steck, C. & Brinkmann, R. (2016): Identifizierung von Schlüsselparametern für die Entwicklung von Populationsmodellen bei Fledermäusen. – In: Hurst, J., Biedermann, M., Dietz, C., Dietz, M., Karst, I., Krannich, E., Petermann, R., Schorcht, W. & Brinkmann, R. (Hrsg.): Fledermäuse und Windkraft im Wald. Naturschutz und Biologische Vielfalt, Bd 153. – Bonn-Bad Godesberg (Bundesamt für Naturschutz): 353-396.
- Dietz, C., von Helvesen, O. & Nill, D. (2007): Handbuch der Fledermäuse Europas und Nordwestafrikas. – Stuttgart (Kosmos-Verlag): 399 S.
- Eklöf, J. & Jones, G. (2003): Use of vision in prey detection by brown long-eared bats, *Plecotus auritus*. – Animal Behaviour 66: 949-953.
- Hall, L. S. & Richards, G. C. (1972): Notes on *Tadarida australis* (Chiroptera: Molossidae). – Australian Mammalogy 1: 46-47.
- Hartley, R. & Zisserman, A. (2003): Multiple View Geometry in Computer Vision. – (Cambridge University Press): 670 S.
- HMUELV & HMWVL (2012): Leitfaden Berücksichtigung der Naturschutzbelange bei der Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen (WKA) in Hessen. – Wiesbaden (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz): 76 S.
- Hochradel, K., Häcker, T., Hohler, T., Becher, A., Wildermann, S. & Sutor, A. (2019): Three-dimensional localization of bats: visual and acoustical. – IEEE Sensors Journal
- Howell, J. A. (1997): Bird mortality at rotor swept area equivalents, Altamont Pass and Montezuma Hills, California. – Transactions of the Western Section of the Wildlife Society
- ITN (2015): Arbeitshilfe zur Berücksichtigung des Fledermausschutzes bei der Genehmigung von Windenergieanlagen (WEA) in Thüringen. – Gonterskirchen (Gutachten im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie im Auftrag des Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie und Naturschutz): 121 S.
- Jüttemann, P. (2017): Kleinwind-Marktreport 2017: Die besten Kleinwindkraftanlagen in Deutschland. – Bad Honnef (Kleinwindkraft-Portal): 193 S.

- Keeley, B., Ugoretz, S. & Strickland, D. (2001). Bat ecology and wind turbine considerations. National Avian-Wind Power Planning Meeting IV, Charleston, South Carolina, National Wind Coordinating Committee, Washington, D.C.
- Kelm, D. H., Lenski, J., Kelm, V., Toelch, U. & Dziock, F. (2014): Seasonal Bat Activity in Relation to Distance to Hedgerows in an Agricultural Landscape in Central Europe and Implications for Wind Energy Development. – *Acta Chiropterologica* 16: 65-73.
- Kunz, T. H. & Fenton, M. B. (2003): *Bat Ecology*. – Chicago (University of Chicago Press): 779 S.
- Land Bayern (2011): Hinweise zur Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen (WKA). – [https://www.verkuendung-bayern.de/files/allmbl/2012/01/anhang/2129.1-UG-448-A001\\_PDFa.pdf](https://www.verkuendung-bayern.de/files/allmbl/2012/01/anhang/2129.1-UG-448-A001_PDFa.pdf) (abgerufen am 12.2.2014) 65 S.
- Lesiński, G. (2007): Bat road casualties and factors determining their number. – *Mammalia* 71: 138-142.
- Limpens, H. & Kapteyn, K. (1991): Bats, their behaviour and linear landscape elements. – *Myotis* 29: 39-48.
- Long, C. V., Flint, J. A. & Lepper, P. A. (2010a): Insect attraction to wind turbines: does colour play a role? – *European Journal of Wildlife Research* 57: 323-331.
- Long, C. V., Flint, J. A. & Lepper, P. A. (2010b): Wind turbines and bat mortality: Doppler shift profiles and ultrasonic bat-like reflection from moving turbine blades. – *Journal of the Acoustical Society of America* 128: 2238-2245.
- Long, C. V., Flint, J. A., Lepper, P. A. & Dible, S. A. (2009): Wind turbines and bat mortality: interactions of bat echolocation pulses with moving turbine rotor blades. – *Proceedings of the Institute of Acoustics* 31: 183-190.
- LUBW (2014): Hinweise zur Untersuchung von Fledermausarten bei Bauleitplanung und Genehmigung für Windkraftanlagen. – Karlsruhe (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg): 42 S.
- LUWG Rheinland-Pfalz (2015): Leitfaden - Hinweise zur artenschutzfachlichen Beurteilung von Kleinwindenergieanlagen (KWEA). – Mainz, Germany (Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz): 12 S.
- Mehr, M., Brandl, R., Hothorn, T., Dziock, F., Förster, B. & Müller, J. (2011): Land use is more important than climate for species richness and composition of bat assemblages on a regional scale. – *Mammalian Biology* 76: 451-460.
- Minderman, J., Fuentes-Montemayor, E., Pearce-Higgins, J. W., Pendlebury, C. J. & Park, K. J. (2015): Estimates and correlates of bird and bat mortality at small wind turbine sites. – *Biodiversity and Conservation* 24: 467-482.
- Minderman, J., Gillis, M. H., Daly, H. F. & Park, K. J. (2017): Landscape-scale effects of single- and multiple small wind turbines on bat activity. – *Animal Conservation* 20: 455–462.
- Minderman, J., Pendlebury, C. J., Pearce-Higgins, J. W. & Park, K. J. (2012): Experimental Evidence for the Effect of Small Wind Turbine Proximity and Operation on Bird and Bat Activity. – *PLoS One* 7: e41177.
- Moyle, A. (2016): *The Impacts of Small and Medium Wind Turbines on Bats*. – University of Exeter, 341 S.
- MUGV (2014): Leitfaden des Landes Brandenburg für Planung, Genehmigung und Betrieb von Windkraftanlagen im Wald. – (Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg): 31 S.

- Müller, B., Glösmann, M., Peichl, L., Knop, G. C., Hagemann, C. & Ammermüller, J. (2009): Bat Eyes Have Ultraviolet-Sensitive Cone Photoreceptors. – *PLoS One* 4: 7.
- O'Shea, T. J., Cryan, P. M., Hayman, D. T. S., Plowright, R. K. & Streicker, D. G. (2016): Multiple mortality events in bats: a global review. – *Mammal Review* 46: 175-190.
- Orloff, S. & Flannery, A. (1992): Wind turbine effects on avian activity, habitat use, and mortality in Altamont Pass and Solano County Wind Resource Areas, 1989–1991. – (California Energy Commission, Sacramento, California).
- Park, K., Turner, A. & Minderman, J. (2013): Integrating applied ecology and planning policy: The case of micro-turbines and wildlife conservation. – *Journal of Applied Ecology* 50: 199-204.
- Piorkowski, M. D. & O'Connell, T. J. (2010): Spatial Pattern of Summer Bat Mortality from Collisions with Wind Turbines in Mixed-grass Prairie. – *American Midland Naturalist* 164: 260-269.
- Pitteloud, J.-D. & Gsänger, S. (2017): 2017 Small Wind World Report Summary. – Bonn, Germany (World Wind Energy Association): 16 S.
- Reichenbach, M., Brinkmann, R., Kohnen, A., Köppel, J., Menke, K., Ohlenburg, H., Reers, H., Steinborn, H. & Warnke, M. (2015): Bau- und Betriebsmonitoring von Windenergieanlagen im Wald. Abschlussbericht 30.11.2015. – Oldenburg (Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie): 351 S.
- Reinhard, H. & Günther, A. (2013): Kleinwindenergieanlagen und Fledermäuse - Gefahrenabschätzung und artenschutzrechtliche Aspekte. – *Naturschutz und Landschaftsplanung* 45: 053-059.
- Richarz, K., Hormann, M., Braunberger, C., Harbusch, C., Süßmilch, G., Caspari, S., Schneider, C., Monzel, M., Reith, C. & Weitrath, U. (2013): Leitfaden zur Beachtung artenschutzrechtlicher Belange beim Ausbau der Windenergienutzung im Saarland betreffend die besonders relevanten Artengruppen der Vögel und Fledermäuse. – Saarbrücken: 112 S.
- Richarz, K., Hormann, M., Werner, M., Simon, L. & Wolf, T. (2012): Naturschutzfachlicher Rahmen zum Ausbau der Windenergienutzung in Rheinland-Pfalz - Artenschutz (Vögel, Fledermäuse) und NATURA 2000-Gebiete. – Mainz 145 S.
- Rodrigues, L., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Karapandza, B., Kovac, D., Kervyn, T., Dekker, J., Kepel, A., Bach, P., Collins, J., Harbusch, C., Park, K., Micevski, J. & Minderman, J. (2015): Guidelines for consideration of bats in wind farm projects - Revision 2014. – Bonn (Eurobats Publication Series Nr. 6): 133 S.
- Rogers, S. E., Duffy, M. A., Jefferis, J. G., Sticksel, P. R. & Tolle, D. A. (1976): Evaluation of the potential environmental effects of wind energy system development. – (Battelle Columbus Laboratories).
- Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M.-J., Green, M., Rodrigues, L. & Hedenström, A. (2010): Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. – *Acta Chiropterologica* 12: 261-274.
- Tatchley, C. (2015): Wildlife impacts of and public attitudes towards small wind turbines. – University of Stirling, 147 S.
- Thomsen, K. M., Hartmann, S., Reers, H., Schauer-Weissahn, H., Lüdtke, B., Reinhard, H., Hochradel, K., Brinkmann, R., Evers, A., Schmidt, L., Sohler, J., Korner-Niervergelt, F. & Hötter, H. (2020): Berücksichtigung von Artenschutzbelangen bei der Errichtung von Kleinwindenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz. BfN Skript 550: 122 S.

- UM, MLR, VM & MFW (2012): Windenergieerlass Baden-Württemberg. – (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg und Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg): 51 S.
- Verboom, B. & Huitema, H. (1997): The importance of linear landscape elements for the pipistrelle *Pipistrellus pipistrellus* and the serotine bat *Eptesicus serotinus*. – *Landscape Ecology* 12: 117-125.
- Verboom, B. & Spoelstra, K. (1999): Effects of food abundance and wind on the use of tree lines by an insectivorous bat, *Pipistrellus pipistrellus*. – *Canadian Journal of Zoology* 77: 1393-1401.
- Walter, A., Wiehe, J., Schlömer, G., Hashemifarzad, A., Wenzel, T., Albert, I., Hofmann, L., zum Hingst, J. & von Haaren, C. (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien 2050. BfN-Skripten, Bd 501. – Bonn - Bad Godesberg 160 S.
- Wang, S. & Wang, S. (2015): Impacts of wind energy on environment: A review. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 437-443.
- ZSW (2017). Anteil der erneuerbaren Energien am Strombedarf im 1. Halbjahr 2017, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW).

## 9. Anhang

### 9.1. Überblick über die Laufzeiten der verschiedenen Betriebsmodi an den unterschiedlichen Standorten

Tab. 5: Auflistung des Datums, des Standortes und des Betriebszeitraumes mit der Zuordnung des jeweils gewählten Betriebsmodus

Datum	Standort	Start	Ende	KWEA Betrieb/ Setting
28.05.2018	Gundelfingen	20:45	23:45	Teleskopstange
29.05.2018	Gundelfingen	20:45	23:45	Stillstand
30.05.2018	Gundelfingen	21:55	00:45	volle Motorleistung
01.06.2018	Gundelfingen	20:50	23:50	volle Motorleistung
02.06.2018	Gundelfingen	20:53	23:53	halbe Motorleistung
04.06.2018	Römerbad	21:00	00:00	Teleskopstange
05.06.2018	Römerbad	20:54	23:59	volle Motorleistung
07.06.2018	Römerbad	20:58	23:59	Stillstand
08.06.2018	Römerbad	20:56	23:54	halbe Motorleistung
11.06.2018	Wasenweiler	20:58	23:58	Teleskopstange
13.06.2018	Wasenweiler	21:07	00:06	Stillstand
14.06.2018	Wasenweiler	21:00	00:05	volle Motorleistung
15.06.2018	Wasenweiler	21:02	00:07	halbe Motorleistung
16.06.2018	Wasenweiler	21:00	00:03	volle Motorleistung
18.06.2018	Burkheim	21:01	00:09	Teleskopstange
19.06.2018	Burkheim	20:54	23:53	volle Motorleistung
20.06.2018	Burkheim	20:57	00:04	Stillstand
21.06.2018	Burkheim	21:00	22:40	volle Motorleistung
21.06.2018	Burkheim	22:40	00:06	Stillstand
22.06.2018	Burkheim	20:55	00:07	halbe Motorleistung
06.08.2018	Gündlingen	20:30	23:33	Teleskopstange
07.08.2018	Gündlingen	20:30	23:30	Stillstand
08.08.2018	Gündlingen	20:30	23:36	volle Motorleistung
11.08.2018	Gündlingen	20:30	23:20*	halbe Motorleistung
13.08.2018	Breisach	20:15	23:18	Teleskopstange
14.08.2018	Breisach	20:18	23:22	volle Motorleistung
15.08.2018	Breisach	20:20	23:20	Stillstand
16.08.2018	Breisach	20:11	21:33	halbe Motorleistung
17.08.2018	Breisach	20:13	22:02	halbe Motorleistung

\* Abbruch bereits zehn Minuten vor offiziellem Ende aufgrund der Fledermauskollision

## 9.2. Verteilung der Wind- und Temperaturdaten über den Experimentzeitraum

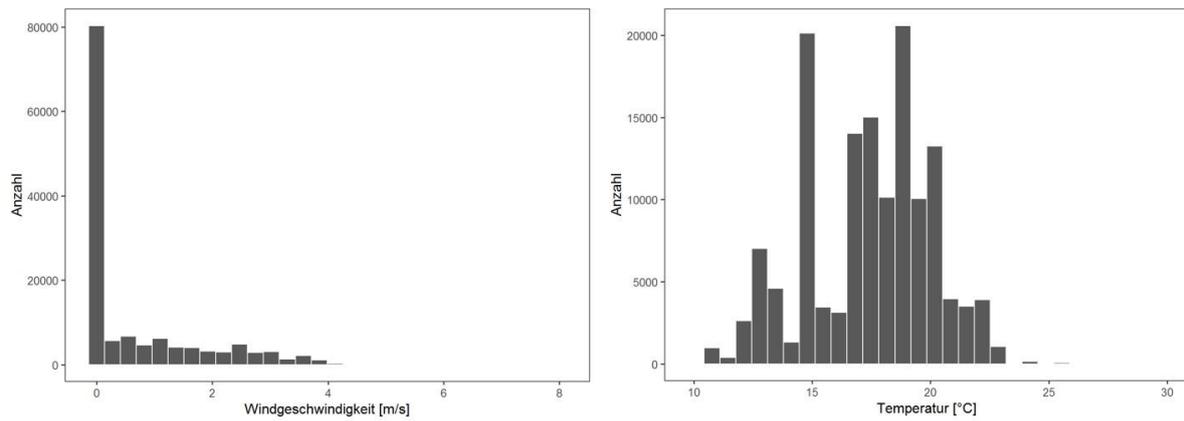


Abb. 19: Überblick über die gemessenen Windgeschwindigkeiten (links) und Temperaturen (rechts) während des Experiments.

### 9.3. Räumliche Verteilung der Aktivitätsschwerpunkte bei den verschiedenen Betriebsmodi für alle Standorte

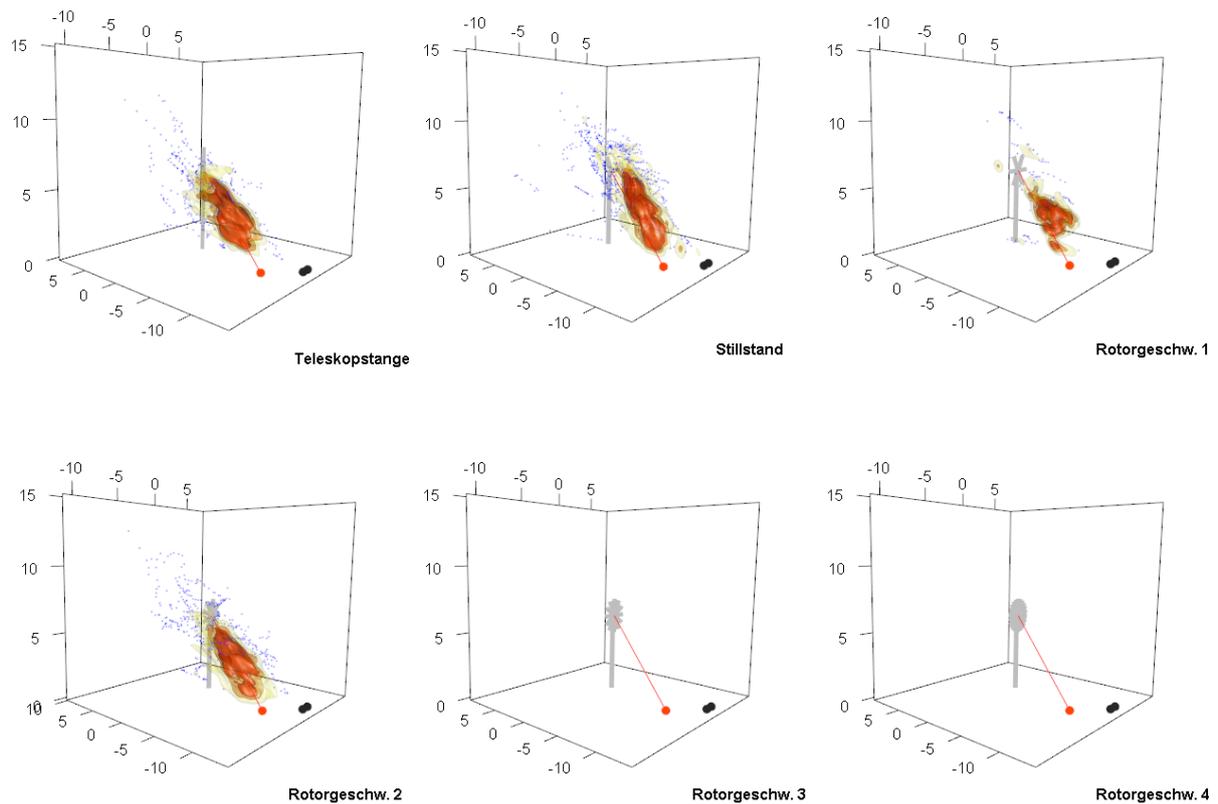


Abb. 20: Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Breisach bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote, orangene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

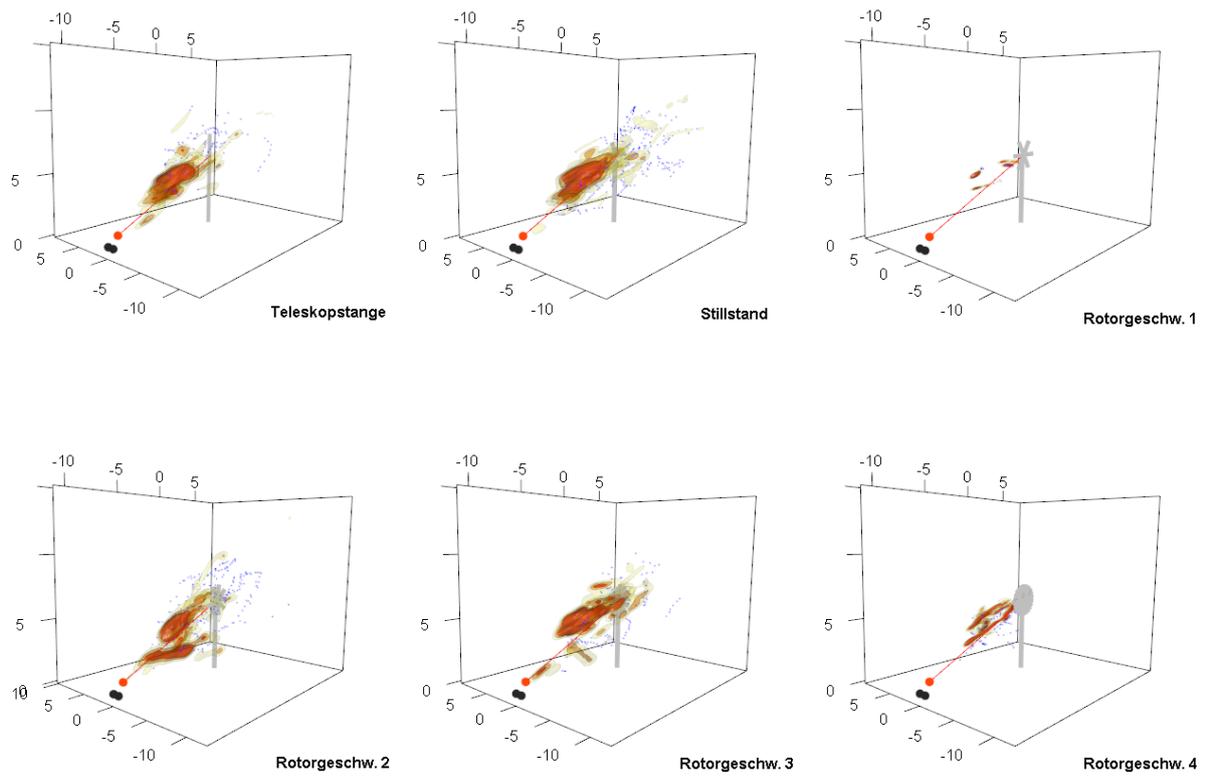


Abb. 21: Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Burkheim bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote, orangene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

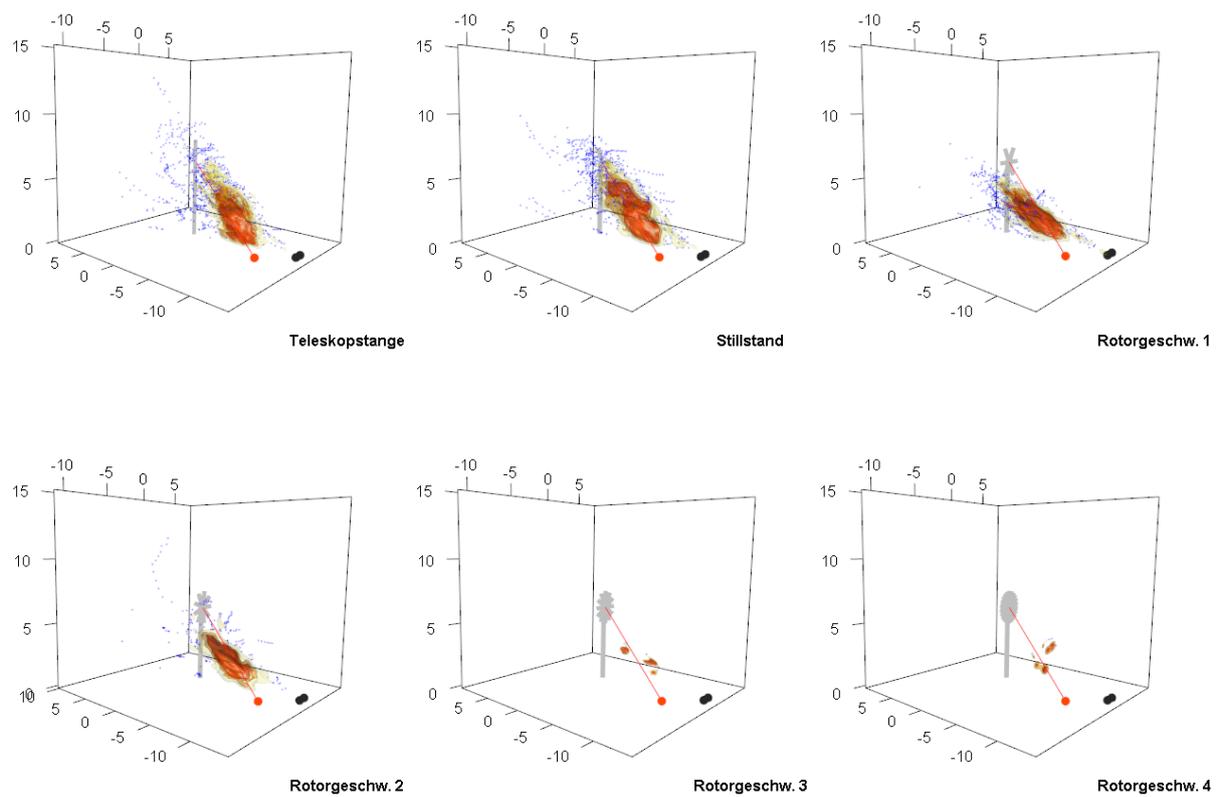


Abb. 22: Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Gündlingen bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote, orangene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

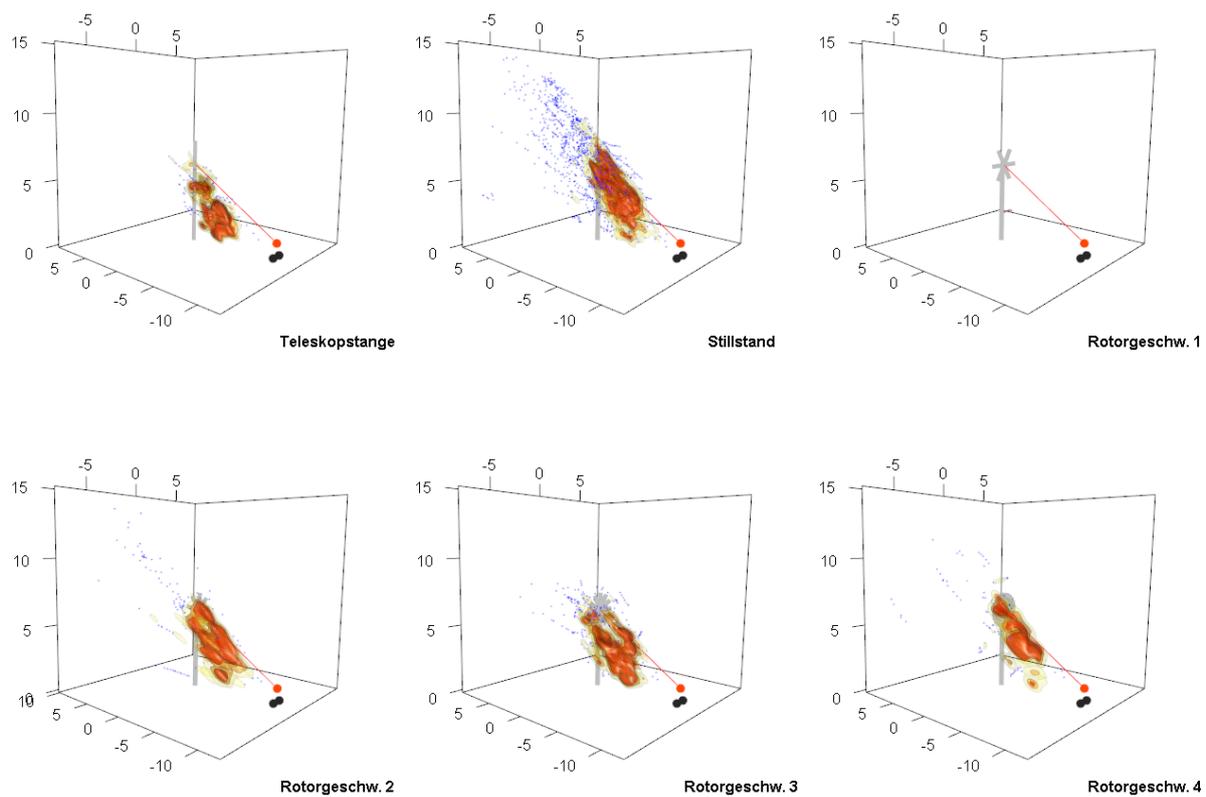


Abb. 23: Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Römerbad bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote, orangene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

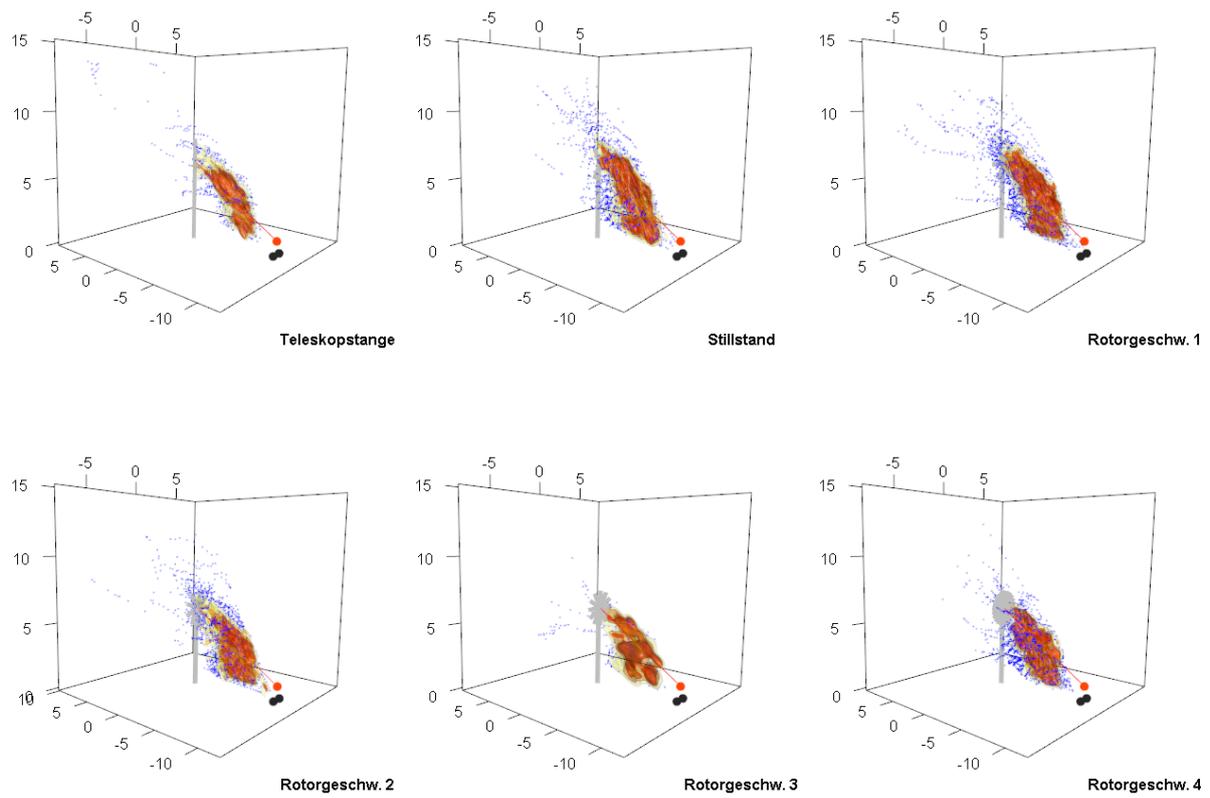


Abb. 24: Verteilung der Fledermausaktivität um die KWEA am Standort Wasenweiler bei den unterschiedlichen Betriebsmodi, aufsummiert über alle Tage. Blaue Punkte entsprechen einzelnen Flugpunkten einer Fledermaus-Flugbahn. Rote, orangene und gelbe Polygone visualisieren 50, 70 und 90 % der mittels Kerndichteschätzung interpolierten Flugaktivität. Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

#### 9.4. Visualisierung von Richtungsänderungen bei verschiedenen Betriebsmodi an den unterschiedlichen Standorten

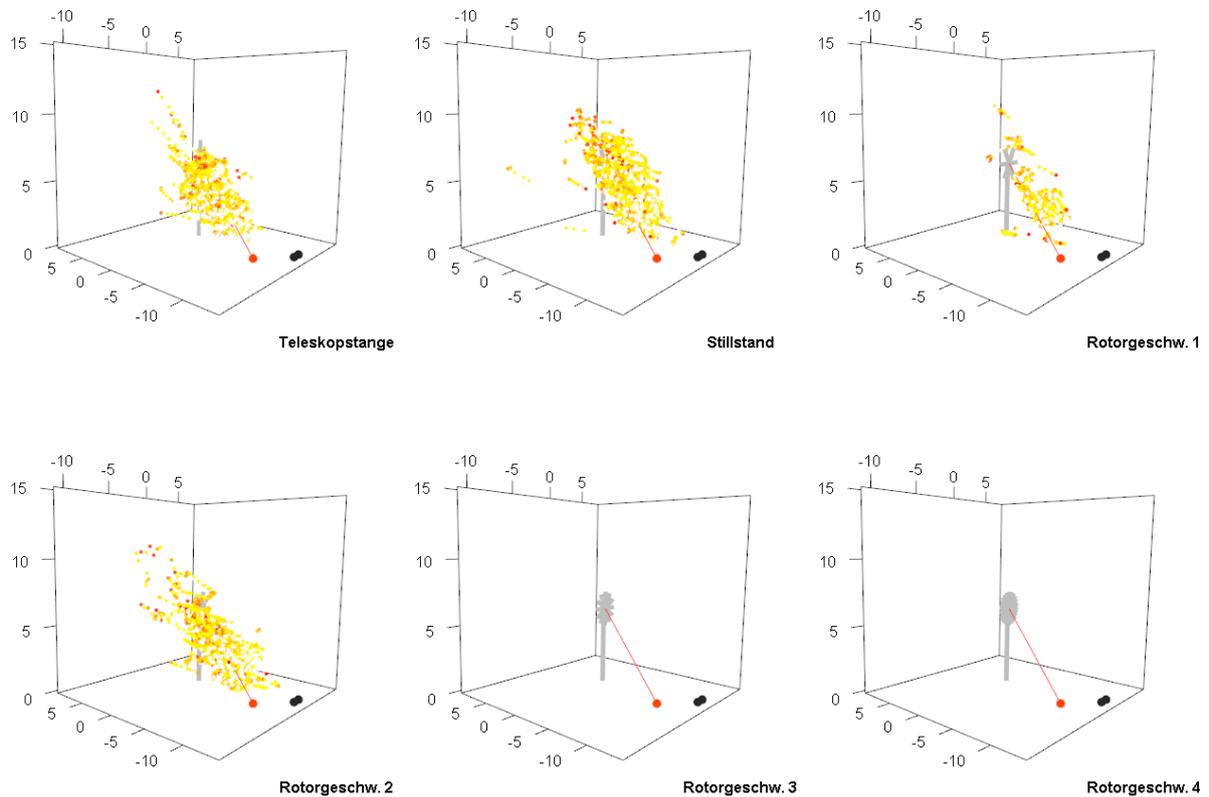


Abb. 25: Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Breisach. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis Gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

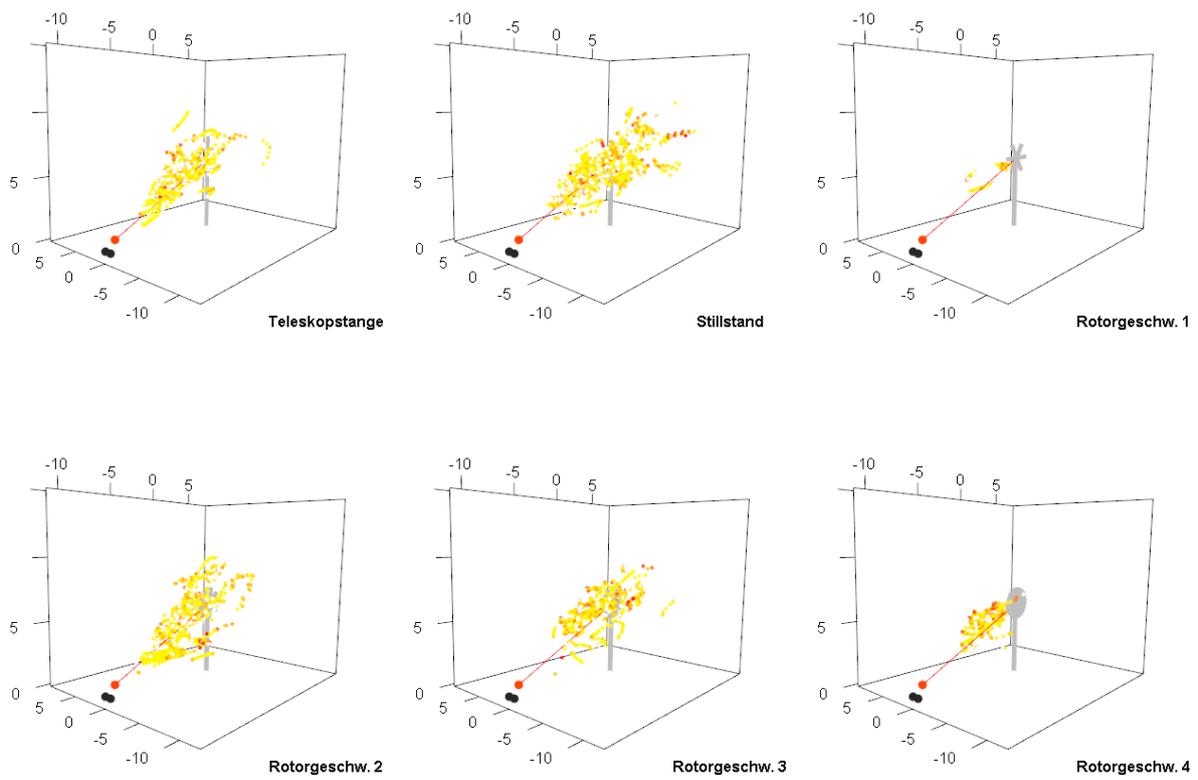


Abb. 26: Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Burkheim. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

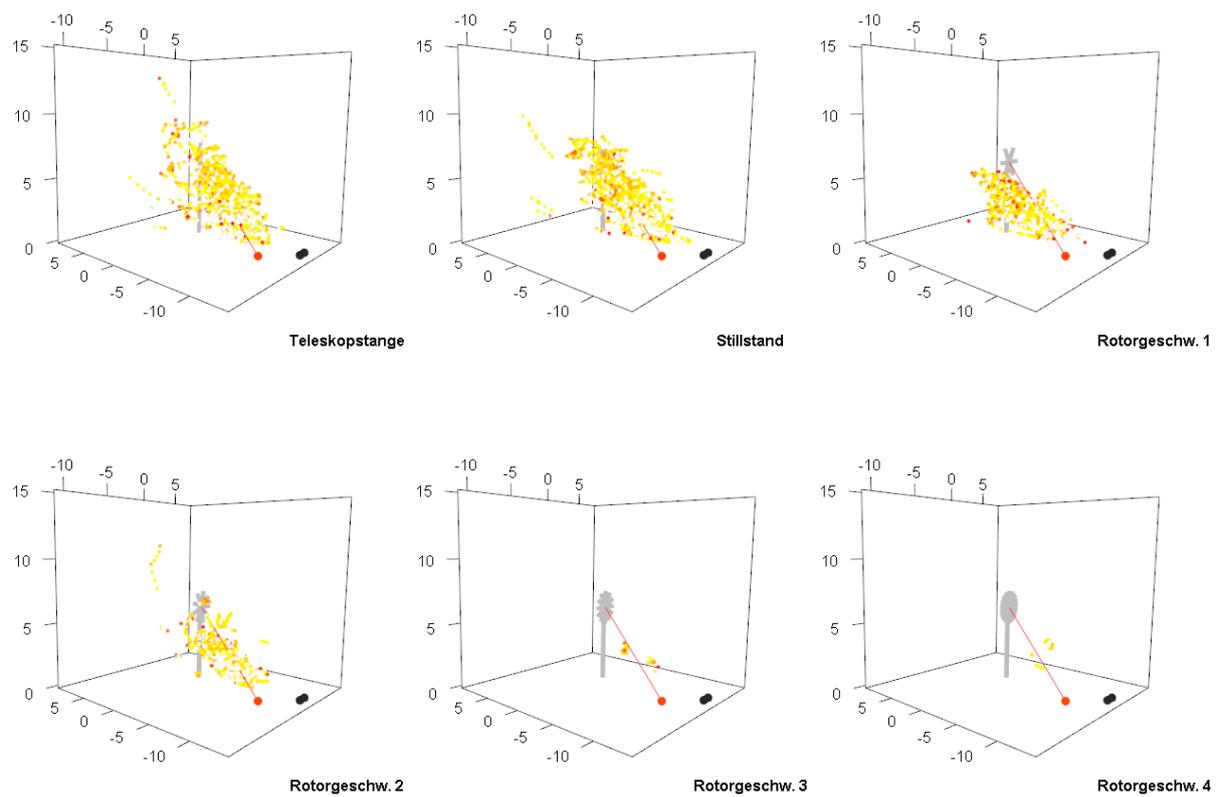


Abb. 27: Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Gündlingen. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

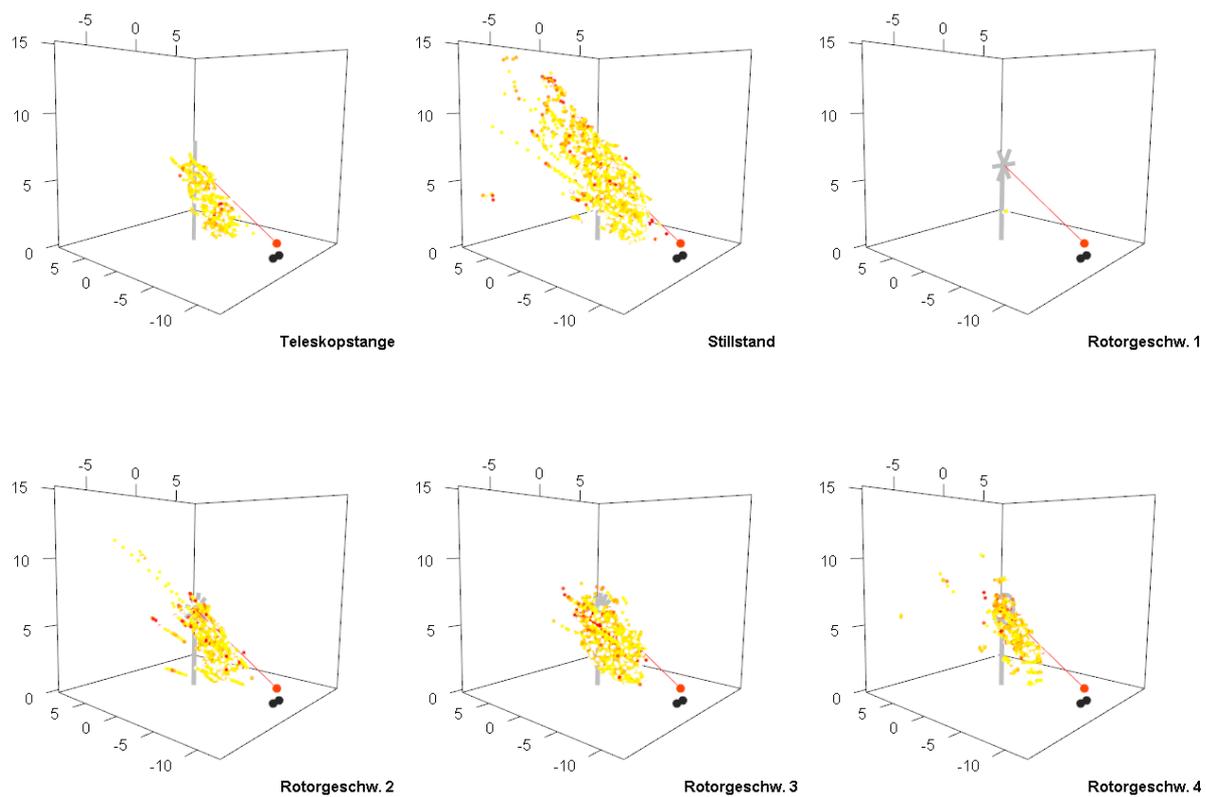


Abb. 28: Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Römerbad. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

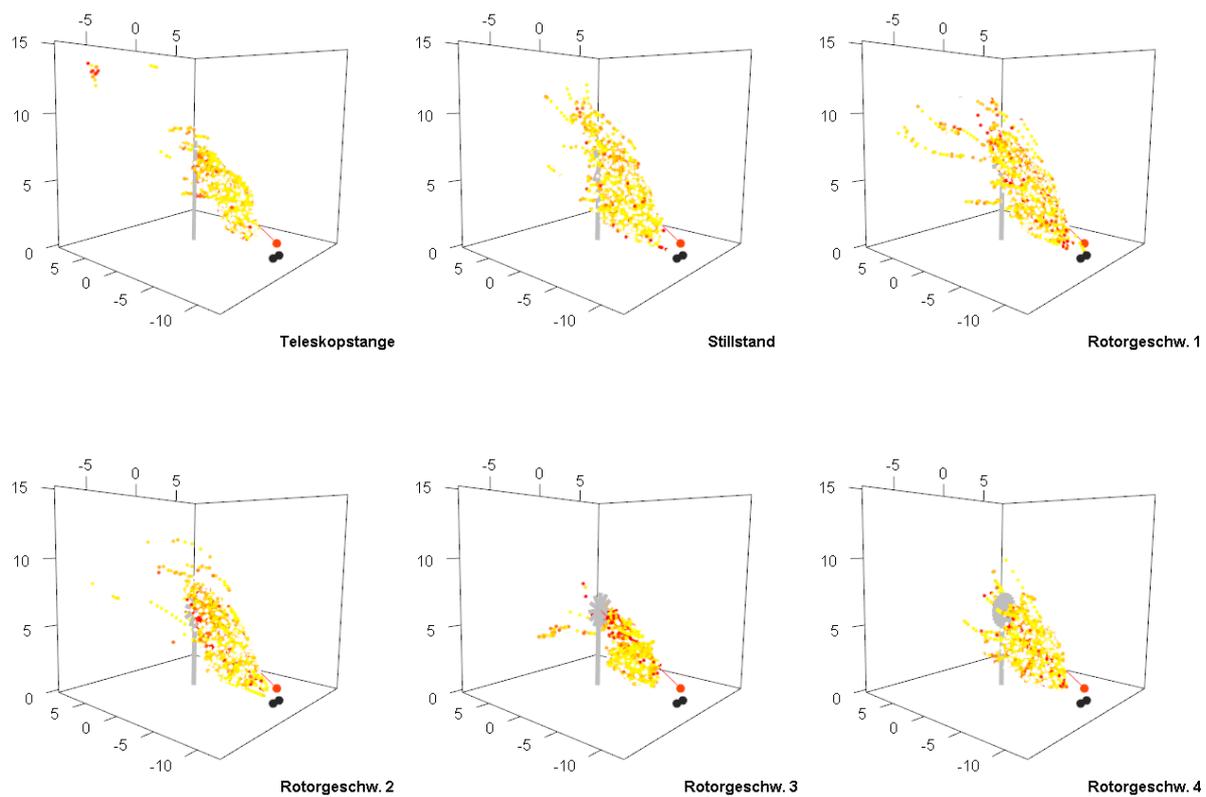


Abb. 29: Darstellung der Richtungsänderungen innerhalb aller Flugbahnen am Standort Wasenweiler. Die Farbcodierung repräsentiert, wie groß der Winkel zwischen An- und Weiterflugrichtung zwischen zwei Flugpunkten ist (von Rot = 180° bis gelb = 0°). Die Kameras sind als schwarze Punkte und der Strahler als roter Punkt dargestellt. Die rote Linie zeigt die Ausrichtung des Strahlers.

## 9.5. Verteilung der Richtungsänderungen über die unterschiedlichen Betriebsmodi

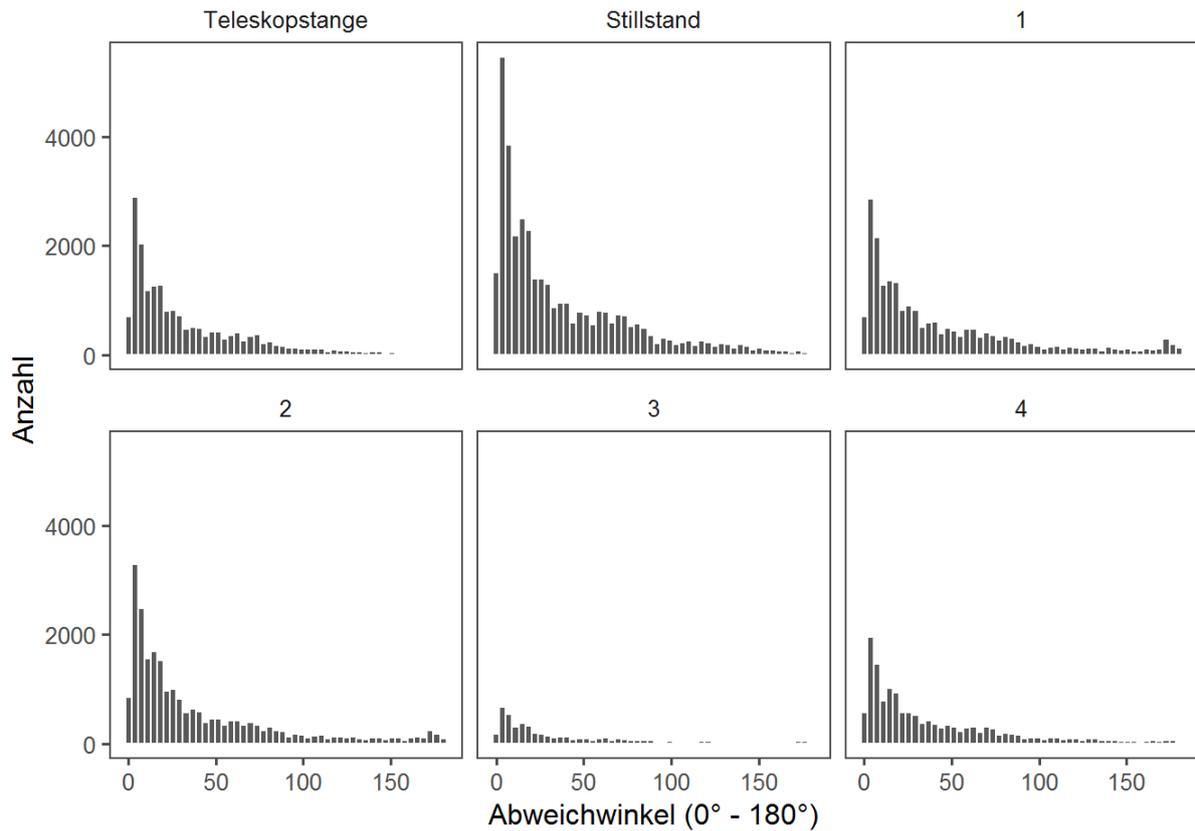


Abb. 30: Häufigkeit der detektierten Richtungsänderungen. Unabhängig vom Betriebsmodus zeigen alle Richtungsänderungs-Winkel eine linksschiefe Poisson-Verteilung, d. h. die Anzahl an scharfen Ausweichmanövern mit hohen Winkeländerungen änderte sich nicht mit der Rotorgeschwindigkeit.