

# **Gutachten**

## **Bewertung der Gefahren durch Wirbelschleppen am Flughafen Friedrichshafen**

Auftraggeber (AG):

Flughafen Friedrichshafen GmbH

– Dresden, 24.02.2015 –



## **Umfang:**

Dieser Bericht umfasst 62 Seiten.

Dokumentenname: GfL\_Friedrichshafen\_Wirbelschleppen\_5.1\_df240215



## **Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH**

Hermann-Prell-Str. 8  
01324 Dresden

Tel.: +49 (0)351/273 26 03

Fax: +49 (0)351/273 26 04

URL: [www.gfl-consult.de](http://www.gfl-consult.de)

Email: [info@gfl-consult.de](mailto:info@gfl-consult.de)



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	5
Kurzfassung.....	7
1 Aufgabenstellung und Leistungsumfang .....	11
2 Eingangsdaten.....	13
2.1 Untersuchungsraum .....	13
2.2 Lagebeschreibung.....	13
2.2.1 Bezugspunkte .....	13
2.2.2 Start- und Landebahnen.....	13
2.3 Flugbewegungen im relevanten Zeitraum.....	14
2.4 Windklimatologie .....	14
2.5 Topografie im Nahbereich des Flughafens Friedrichshafen.....	16
3 Bisherige Wirbelschleppenschadensbilanz am Flughafen Friedrichshafen .....	17
4 Modellierung der Auswirkungen von Wirbelschleppen .....	21
4.1 Modellentwicklung .....	21
4.2 Begriffsbestimmungen.....	22
4.3 Methodik der Wirbelschleppenmodellierung .....	24
4.3.1 Entstehung und Zerfall der Wirbelschleppe .....	24
4.3.2 Bodeneffekt.....	26
4.3.3 Kenngrößen einer Wirbelschleppe .....	28
4.4 Grenzwert für Gebäudegefährdung .....	30
4.5 Grenzwert für Personengefährdung.....	34
4.6 Berechnungsmodell.....	35
5 Berechnung der Einzugsgebiete und Zonen der Gefährdungspotenziale von Wirbelschleppen .....	37
5.1 Berechnungsverfahren .....	37
5.2 Szenario Ist-Situation 2012 .....	37
5.2.1 Analysen zur Gebäudegefährdung .....	37
5.2.2 Analysen zur Personengefährdung .....	40
5.3 Szenario Planungsfall 2020 .....	42
5.3.1 Analysen zur Gebäudegefährdung .....	42
5.3.2 Analysen zur Personengefährdung .....	44
6 Bewertung der Ergebnisse.....	47
6.1 Analyse der Berechnungsergebnisse .....	47
6.2 Anpassung der Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete .....	47
6.3 Risikominderungsempfehlungen bzgl. Vorsorgemaßnahmen von beruflich im Freien tätigen Personen .....	52
Abkürzungsverzeichnis .....	55
Abbildungsverzeichnis .....	56

Tabellenverzeichnis .....	57
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	58
Anhang A.....	61
A1    Wirbelschleppen Vorsorgegebiet Bahn 06.....	61
A2    Wirbelschleppen Vorsorgegebiet Bahn 24.....	62

## Kurzfassung

Das Stuttgarter Verkehrsministerium als Luftfahrtgenehmigungsbehörde des Bundeslandes Baden-Württemberg hatte der Flughafen Friedrichshafen GmbH Ende 2013 auferlegt, die Gefahren durch Wirbelschleppen am Flughafen neu zu bewerten [1]. Anlass dafür war, dass am 15. September 2012 nachweislich ein Wirbelschleppenschaden an einem Hausdach in Flughafennähe durch eine *Boeing 737-800* im Landeanflug verzeichnet wurde. Die letzte Untersuchung datiert aus dem Jahr 1999 [31]. Die seinerzeitigen Analysen dienten der Feststellung, welche Gefahren durch Wirbelschleppen für Gebäude im Nahbereich des Flughafens vorliegen können. Zudem wurden explizite Analysen der vorliegenden Schadensfälle durchgeführt und flugbetriebliche als auch bauliche Maßnahmen zur Reduktion der Gefährdung durch Wirbelschleppen formuliert. Eine durchgängige Modellierung des Zerfalls von Wirbelschleppen unter Berücksichtigung der atmosphärischen Randbedingungen war aufgrund des seinerzeitigen Wissensstandes allerdings noch mit großen Unsicherheiten behaftet.

### Methodisches zur Neubegutachtung

Aufgrund fortgeschrittener Forschungen ist nunmehr eine verbesserte, hier vorliegende Gefährdungsanalyse dieser Thematik gegenüber dem Altgutachten [31] möglich. Hierin werden für anfliegende Luftfahrzeuge – dies ist unverändert die relevante Flugphase für Wirbelschleppenbildung (vgl. Kapitel 4.6) - die möglichen Gefahren von Wirbelschleppen getrennt für Gebäude und Personen im Nahbereich des Flughafens Friedrichshafen ermittelt. Im Detail werden Einzugsgebiete „hinreichend kräftiger“ Wirbelschleppen getrennt nach Gefährdung für Gebäude (Ablösung von Dachziegeln durch resultierenden Windsog) sowie Personen (Sturz-/Verletzungsgefahr durch starke Windböen) ermittelt. Zudem wird für Gebäude das Gefährdungspotenzial als statistische Eintrittswahrscheinlichkeit einer Wirbelschleppe relevanter Stärke (s.u.) pro Jahr ortsbezogen im Flughafennahgebiet ausgewiesen. Diese Eintrittswahrscheinlichkeit ist vom Verkehrsaufkommen abhängig. Insofern wurden den Berechnungen die folgenden zwei Verkehrsszenarien unterlegt:

- Die **Ist-Situation 2012**, basierend auf den Verkehrszahlen des Jahres 2012 (mit 10.440 Landungen) [4] sowie
- der **Planungsfall 2020**, basierend auf der bestehenden Infrastruktur sowie den Verkehrszahlen für das Prognosejahr 2020 (mit 9.568 Landungen) gemäß [5].

Eine Wirbelschleppe zeigt hinsichtlich des tangentialen Geschwindigkeitsverlaufs ausgehend vom Kern atypisch zu Festkörpern gemäß *Lamb-Oseen* Modell bereits am Rand des Kerns (und nicht des Wirbels) die jeweiligen Maxima. Die Wirbelstärke wird dabei durch die *Zirkulation* beschrieben. Der Zerfall einer Wirbelschleppe wird maßgeblich durch die umgebende Temperaturschichtung und Turbulenz der Atmosphäre bestimmt. Aktuelle Forschungen zeigen, dass der Zerfall von Wirbelschleppen mittels eines Zwei-Phasen-Modells (Phase 1: langsame Abnahme der Zirkulation, Phase 2: durch Wechselwirkung mit der Atmosphäre ein starker Zerfall der Wirbelschleppe) gut beschrieben werden kann [13], [14], [16]. Die maximale Lebensdauer einer Wirbelschleppe wird dabei in ruhiger, neutral geschichteter Atmosphäre erreicht [13]. Diese hinsichtlich der Gefährdung als Worst-Case Situation abgebildete Bedingung bildet die Grundlage der hier vorliegenden Untersuchungen. Die *resultierende* lokale Windgeschwindigkeit, die für eine Gefährdungsbeurteilung von Gebäuden und Personen relevant ist, ergibt sich sodann aus der Summe der durch Wirbelschleppen *induzierten* Windgeschwindigkeit (erreichte Tangentialgeschwindigkeit) und dem Umgebungswind.

Besonderes Augenmerk wurde dabei dem hier relevanten Verhalten von Wirbelschleppen bei Annäherung an den Boden über eine Modellierung des Bodeneffektes gewidmet. Gemäß aktuellem Kenntnisstand setzt ca. 1,5 Spannweiten über Grund der Bodeneffekt mit Bildung

sog. Sekundärstrukturen ein [13], [15]. Der Wirbelkern, in dem wie erläutert die maximale Tangentialgeschwindigkeit herrscht, sinkt bis auf den halben anfänglichen Abstand der paarweisen Wirbel zum Boden ab und verdriftet seitlich. Als Sekundärstrukturen treten zusätzliche, kleinere Einzelwirbel auf, die zu einem Wiederaufstieg des Hauptwirbels führen [15] (vgl. Kapitel 4.3.2).

In Bezug auf Gebäudegefährdung erfolgt auf Basis der *resultierenden* Windgeschwindigkeit einer Wirbelschlepe die Berechnung des Windsogs, der als maßgebliche Größe für Dachschädigungen in Frage kommt. Der so ermittelte Windsog wird dem Grenzwert zur Windsogsicherheit von Dachdeckungen, hier für Dachziegeldächer mit einem spezifischen Abhebewiderstand durch Eigengewicht der Deckung von  $0,17 \text{ kN/m}^2$  gegenübergestellt und daraus ein Gefährdungspotenzial als Wahrscheinlichkeit der Grenzwertüberschreitung ausgewiesen.

In Bezug auf Personengefährdung wird die resultierende Windgeschwindigkeit einer Wirbelschlepe einer Böen-Grenzgeschwindigkeit (mindestens  $23 \text{ m/s}$ ) gegenübergestellt. Ab dieser Böen-Grenzgeschwindigkeit wird begründet unterstellt, dass Personen umgestoßen werden und sich folglich verletzen können.

### Ergebnisse und Maßnahmen:

In der Genehmigung des Flughafens mit Änderung vom 1. März 1996 sind Wirbelschleppen-Vorsorgemaßnahmen festgeschrieben. Gemäß Angaben der Flughafen Friedrichshafen GmbH wurden zwischen 1995 – 2001 gezielt Verklammerungsmaßnahmen in festgelegten *Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten* und darüber hinaus vorgenommen. Neben den *Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten* sind *Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete* festgelegt worden, in denen keine expliziten Maßnahmen gelten, die jedoch hauptsächlich der Lokalisierung und Überprüfung etwaiger gemeldeter Vorfälle dienen.

Insofern wurde eingangs die Auslegung dieser Gebiete mittels durch die Flughafen Friedrichshafen GmbH bereitgestellten empirischen Daten zu Wirbelschleppenschäden in der Umgebung des Flughafens verifiziert. Im Ergebnis ist festzustellen, dass ca. 18 Vorfälle mit Wirbelschleppenschäden außerhalb dieser Gebiete zu verzeichnen waren, sodass eine Anpassung der *Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete* zu prüfen ist.

Die Berechnungen zur Gebäudegefährdung zeigen, dass die Zonen mit grenzwertigem Windsog für die Ist-Situation 2012 nahezu vollständig die bisher gemeldeten Schadensfälle gemäß [11] abdecken, somit eine gute Übereinstimmung mit der Empirie vorliegt. Für die hier maßgeblichen Untersuchungshöhen  $10 \text{ m}$  sowie  $25 \text{ m}$  relativ zur Höhenlage des Flughafenbezugspunktes (FBP) sind für beide Anflugrichtungen bebaute Gebiete betroffen. Hierbei tritt aufgrund der unterstellten Zunahme größerer LFZ-Muster im Planungsfall 2020 erwartungsgemäß eine leichte Vergrößerung der Zonen ein, wobei die höchsten Gefährdungspotenziale stets in unmittelbarer Nähe der Anfluggrundlinien liegen. Östlich des Platzes (Anflugrichtung 24) liegen zudem insgesamt höhere Erwartungswerte pro Jahr (Risiken) aufgrund der Nutzungsverteilung der Bahn vor. Die Maximalwerte für die der Schwelle am nächsten liegende Bebauung sind für das Szenario Ist-Situation 2012 mit einem Erwartungswert von ca. 11,4 Jahren (Landebahn 06) sowie ca. 6,9 Jahren (Landebahn 24) sowie für das Szenario Planungsfall 2020 zu einem Erwartungswert von ca. 7,1 Jahren (Landebahn 06) und ca. 3,5 Jahren (Landebahn 24) ermittelt worden.

Weiterhin wurden die Maximalwerte der *resultierenden* Windgeschwindigkeit (Summe aus Wirbelschleppen *induzierter* Windgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 4.3.3) und Umgebungswind) bestimmt. Für die Untersuchungshöhe von  $25 \text{ m}$  sind diese im Bereich der Anfluggrundlinie auf Höhe der Schwelle in der nächstgelegenen Rasterzelle mit bis zu  $37 \text{ m/s}$  (entsprechend Windstärke 12, also orkanartig) ermittelt worden, in der sich grundsätzlich niemand aufhalten darf.

Die derzeit festgelegten *Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete* sind wie ausgeführt in Bezug auf die Empirie zu klein, um alle bisherigen Wirbelschleppenvorfälle abzudecken. Zudem entspricht die Geometrie dieser Gebiete nicht den Ausbreitungscharakteristika von Wirbelschleppen. Eine Anpassung auf jenes Gebiet wird empfohlen, das auf Basis des Gefährdungspotenzial eine Eintrittshäufigkeit für eine hinreichend starke Wirbelschleppe (Windsog Grenzwert) in weniger als 100 Jahren auf Basis des Verkehrsaufkommens gemäß Planungsfall 2020 (Untersuchungshöhe 25 m) umfasst. Es gilt hier der Ansatz, dass bisherige Zonen abgedeckt und bestehende Gebiete nicht verkleinert werden. Zudem sollen alle Wirbelschleppenvorfälle der letzten 5 Jahre abgedeckt sein. Die für dieses Gebiet vorgesehenen Wirbelschleppen-Vorsorgemaßnahmen (insbesondere Klammerung der Ziegel) werden hingegen als ausreichend bewertet.

Mittels überlagerter CAD Pläne erfolgt die hochaufgelöste, straßenbezogene Ausweisung dieser Gebiete (vgl. Kapitel 6.2).

Analog zu den *Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten* wird eine Anpassung der derzeitigen *Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete* in Form und Größe empfohlen, letztere in Bezug auf eine Eintrittshäufigkeit für eine hinreichend starke Wirbelschleppe (Windsog Grenzwert) in weniger als 100 Jahren auf Basis des Verkehrsaufkommens gemäß Planungsfall 2020<sup>1</sup>. Prämisse ist hier, dass in dieser Zone möglichst alle bisher verzeichneten Wirbelschleppenschäden verortet sind, so dass eine flächendeckende Erfassung etwaiger Vorfälle gewährleistet ist. Es wird jedoch empfohlen zu prüfen, ob die bereits angewandte Methode der nachweislich durch den Flughafen EDNY angewiesenen Prüfung gemeldeter Wirbelschleppenvorfälle vor Ort ausreichend ist und die Festlegung eines *Wirbelschleppen-Überprüfungsgebietes* demnach zukünftig entbehrlich wird.

In Bezug auf die Personengefährdung zeigen die Berechnungen, dass in 2 m Untersuchungshöhe (Bezug FBP) keine bewohnten Gebiete, in 5 m hingegen unter Berücksichtigung der Topografie in beiden Anflugrichtungen bewohnte Gebiete (und demnach sich dort aufhaltende Personen) betroffen sind. Der Vergleich der Szenarien zeigt auch hier, dass aufgrund der Zunahme größerer LFZ Muster im Planungsfall 2020 eine leichte Vergrößerung der Zonen eintreten wird<sup>2</sup>. Es ist also zu prüfen, ob sich Personen in diesen Gebieten in 5 m Höhe im Freien aufhalten können und es sind in diesem Falle entsprechende Verhaltensregeln zu erlassen: Hierzu wurde als Risikominderungsmaßnahme speziell für Personen, die sich zu gewerblichen Zwecken in größeren Höhen im Freien aufhalten erkannt, dass das geltende Regelwerk der Bauberufsgenossenschaft [26] zu Arbeiten an hohen Gebäuden sowie das geltende Arbeitsschutzgesetz und die Arbeitsstättenverordnung vorbeugenden Schutzcharakter aufweisen. Bei deren Einhaltung sind tödliche Verletzungen durch Wirbelschleppeneinwirkung quasi ausgeschlossen. Aus privaten Gründen sollte sich in diesem Gebiet (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 15) hingegen niemand oberhalb 5 m Höhe aufhalten.

---

<sup>1</sup> In Landerichtung 24 wurde diese Zone im Endbereich zudem an das gemäß [29] verzeichnete Überprüfungsgebiet angepasst, sodass innerhalb dieser Zone nunmehr nahezu alle bisher verzeichneten Wirbelschleppenschäden enthalten sind.

<sup>2</sup> Die Grenzgeschwindigkeit wird hier insbesondere von der *Boeing 757* erreicht, die jedoch in FDH nur mit einem Anteil von 0,5 % an der Kategorie S5.2 operiert.



# 1 Aufgabenstellung und Leistungsumfang

Das Stuttgarter Verkehrsministerium als Luftfahrtgenehmigungsbehörde des Bundeslandes Baden-Württemberg hatte der Flughafen Friedrichshafen GmbH Ende 2013 auferlegt, die Gefahren durch Wirbelschleppen am Flughafen neu zu bewerten [1]. Anlass dafür war, dass am 15. September 2012 nachweislich ein Wirbelschleppenschaden an einem Hausdach in Flughafennähe durch eine *Boeing 737-800* im Landeanflug verzeichnet wurde. Die letzte Bewertung der Gefahren durch Wirbelschleppen datiert aus dem Jahr 1999 [31]. Ziel der seinerzeitigen Analysen war zu untersuchen, welche Gefahren durch Wirbelschleppen für Gebäude im Nahbereich des Flughafens zu verzeichnen waren. Zudem wurden explizite Analysen der vorliegenden Schadensfälle durchgeführt und flugbetriebliche als auch bauliche Maßnahmen zu Reduktion einer möglichen Gefährdung durch Wirbelschleppen formuliert. Eine durchgängige Modellierung des Zerfalls von Wirbelschleppen unter Berücksichtigung der atmosphärischen Randbedingungen war seinerzeit aufgrund des Wissensstandes mit großen Unsicherheiten behaftet. Nunmehr konnte aufgrund umfangreicher Forschungen ein erheblicher Wissenszuwachs auf diesem Gebiet erzielt werden, der eine dezidierte Neubegutachtung dieser Thematik ermöglicht.

Im Jahr 1996 wurden am Flughafen Friedrichshafen (FDH) sog. Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete festgelegt, in denen Wirbelschleppen-Vorsorgemaßnahmen zu prüfen und umzusetzen sind (vgl. Kapitel 3). Der o.g. Wirbelschleppenvorfall wurde dabei außerhalb des festgelegten Wirbelschleppen-Vorsorgegebietes verzeichnet (vgl. Kapitel 3). Dies veranlasste die Genehmigungsbehörde, diesen Sachverhalt nochmals gutachterlich untersuchen zu lassen.

Ziel des vorliegenden Gutachtens ist es, gemäß aktuellen Wissensstandes diese Neubegutachtung des durch Wirbelschleppen hervorgerufenen Gefährdungspotenzial für Gebäude und am Luftverkehr nicht beteiligter Personen für unterschiedliche Verkehrsszenarien (maßgeblich ist hierin die Landephase, vgl. Kapitel 5) am Flughafen Friedrichshafen (ICAO-Code: EDNY) durchzuführen.

Es werden zur Feststellung der statistisch langfristigen Gefährdungslage zum Eintritt von Wirbelschleppenschäden im Flughafennahbereich und zur Ableitung von diesbezüglichen Trendaussagen zwei Verkehrsszenarien betrachtet, die

- **Ist-Situation 2012**, basierend auf den Verkehrszahlen des Jahres 2012 [4] sowie ein
- **Planungsfall 2020**, basierend auf der bestehenden Infrastruktur sowie den Verkehrszahlen für das Prognosejahr 2020 gemäß [5].

Für beide Verkehrsszenarien (vgl. Kapitel 2.3) werden in Bezug auf Gebäudegefährdung für die Untersuchungshöhen<sup>3</sup> 10 m, 25 m sowie 50 m jene Gebiete ausgewiesen, in denen mit Überschreitungen einer grenzwertigen *Wirbelschleppenstärke* (hier resultierender Windsog) zu rechnen ist (vgl. Kapitel 5).

In Bezug auf Personengefährdung erfolgt für die Untersuchungshöhen 2 m und 5 m die Berechnung jener „Einzugsgebiete“, in denen mit einer Überschreitung einer als kritisch eingestuftes Tangentialgeschwindigkeit eines Wirbels für Personen zu rechnen ist.

Im Falle des Überschreitens dieser noch zu quantifizierenden Grenzwerte in Gebieten, die bisher nicht den derzeit festgelegten Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten entsprechen, erfolgt die Entwicklung einer korrigierenden Anpassung mit Umsetzungsempfehlung. Zudem werden

---

<sup>3</sup> Höhenbezugspunkt ist der Flughafenbezugspunkt gemäß Luftfahrthandbuch (engl. Aeronautical Information Publication, AIP) [6]

Risikominderungsempfehlungen zur Art der Dachausführungen sowie Vorsorgemaßnahmen von Personen<sup>4</sup> (Bezug Arbeitsschutzrichtlinien) aufgezeigt.

---

<sup>4</sup> Aufenthalt auf Dächern zu erforderlichen Wartungsarbeiten etc.

## 2 Eingangsdaten

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt die Darstellung aller notwendigen Eingangsdaten, die für die Berechnung der Gefährdungspotenziale für Gebäude und Menschen sowie die diesbezüglichen Einzugsgebiete von Wirbelschleppen erforderlich sind. Die Methodik der Berechnung wird im Kapitel 4 erläutert.

### 2.1 Untersuchungsraum

Es wurde ein quadratischer Untersuchungsraum von 20 km mal 20 km, zentriert um den Flughafenbezugspunkt (FBP, vgl. Kapitel 2.2) des Flughafens Friedrichshafen festgelegt. In den kartografischen Ergebnisdarstellungen (siehe Kapitel 5) ist dieser Untersuchungsraum stets mit abgebildet. Im Folgenden werden die relevanten geografischen Referenzen zum Untersuchungsraum dargelegt.

### 2.2 Lagebeschreibung

#### 2.2.1 Bezugspunkte

Der Flughafenbezugspunkt (FBP) des Flughafens Friedrichshafen (EDNY), auf den sich das für die Berechnungen verwendete lokale Koordinatensystem bezieht, hat die folgenden Koordinaten [6]:

FBP EDNY	
Östliche geografische Länge	09° 30' 41,350"
Nördliche geografische Breite	47° 40' 16,740"
Gitter-Nord UTM Zone 32T (ETRS89) Landeskoordinate [hoch]	5.279.896,19 m
Gitter-Nord UTM Zone 32T (ETRS89) Landeskoordinate [rechts]	538.396,24 m

Tabelle 1: Koordinaten Flughafenbezugspunkt

Der Bahnbezugspunkt (BBP) der Start- und Landebahn (SLB) 06/24 hat folgende Koordinaten:

BBP 06/24	
Östliche geografische Länge	09° 30' 42,680"
Nördliche geografische Breite	47° 40' 17,254"
Gitter-Nord UTM Zone 32T (ETRS89) Landeskoordinate [hoch]	5.279.912,25 m
Gitter-Nord UTM Zone 32T (ETRS89) Landeskoordinate [rechts]	538.423,87 m

Tabelle 2: Koordinaten Bahnbezugspunkt 06/24

#### 2.2.2 Start- und Landebahnen

Die folgende Tabelle 3 beschreibt die relevanten Parameter der SLB 06/24 getrennt nach Betriebsrichtungen (BR), Bezug BBP gemäß Tabelle 2:

Bezeichnung	BR 06	BR 24
Gitter-Nord UTM Zone 32T (ETRS89) Rechtweisende Richtung	59,7569°	239,7569°
Abmessungen [m]	2.356 x 45	2.356 x 45
Abstand Bahnbeginn zum BBP [m]	1.210	1.146
Abstand Schwelle zum BBP [m]	939,56	939,56

Tabelle 3: Daten der befestigten Start- und Landebahn EDNY

## 2.3 Flugbewegungen im relevanten Zeitraum

Für die Szenarien Ist-Situation 2012 und Planungsfall 2020 gemäß Kapitel 1 liegen die zu verwendenden Verkehrszahlen (hier ausschließlich bezogen auf Landungen) im Datenerfassungssystem (DES)-Format mit folgenden Parametern vor (vgl. [4], [5])<sup>5</sup>:

- genutzte Landebahn,
- Typ des Luftfahrzeuges (LFZ), klassifiziert gemäß Lärmkategorien nach der 2008 novellierten „Anleitung zur Datenerfassung“ [7].

Die folgende Tabelle 4 stellt die Jahresflugbewegungen (Landungen) sowohl absolut als auch prozentual nach BR dar<sup>6</sup>.

Jahresflugbewegungen Landungen	2012	%	2020	%
Landebahn 06	1.825	17,5	1.768	18,5
Landebahn 24	8.615	82,5	7.800	81,5
<b>Summe</b>	<b>10.440</b>		<b>9.568</b>	

Tabelle 4: Jahresflugbewegungen (Landungen) EDNY

## 2.4 Windklimatologie

Die relevanten Daten zur Windklimatologie wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt. Nachfolgende Tabelle 5 zeigt die Häufigkeiten der beobachteten Halbstundenwerte pro Richtungssektor und Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe an<sup>7</sup>. Messdaten in weiteren Höhen liegen nicht vor.

<sup>5</sup> Das Luftfahrzeugmuster *Airbus A300* wird in beiden Szenarien nicht betrachtet, da Monarch Airlines dieses im April 2014 ausgemustert hat und im Jahr 2012 lediglich vereinzelte Flüge am Flughafen Friedrichshafen mit diesem Muster zu verzeichnen waren [30].

<sup>6</sup> Hubschrauber und Luftschiffe sind nicht berücksichtigt.

<sup>7</sup> Standardmäßig erfolgt die Bestimmung der Windklimatologie seitens des DWD an den Messstationen in 10 m Höhe.

Windsektor [°]												
Windgeschwindigkeit [m/s]	350–010	020–040	050–070	080–100	110–130	140–160	170–190	200–220	230–250	260–280	290–310	320–340
0	0,013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1 – 1,0	0,005	0,008	0,008	0,007	0,006	0,006	0,007	0,006	0,006	0,004	0,003	0,003
1,1 – 2,0	0,019	0,057	0,032	0,016	0,011	0,014	0,018	0,022	0,022	0,013	0,009	0,008
2,1 – 3,0	0,022	0,068	0,015	0,009	0,009	0,011	0,01	0,014	0,03	0,018	0,01	0,005
3,1 – 4,0	0,02	0,058	0,005	0,003	0,006	0,006	0,004	0,008	0,019	0,019	0,007	0,002
4,1 – 5,0	0,017	0,036	0,003	0,001	0,003	0,003	0,002	0,007	0,015	0,015	0,003	0,001
5,1 – 6,0	0,009	0,02	0,003	0	0,001	0,001	0,001	0,005	0,016	0,012	0,001	0
6,1 – 7,0	0,003	0,01	0,002	0	0	0	0,001	0,004	0,016	0,01	0	0
7,1 – 8,0	0,001	0,005	0,001	0	0	0	0	0,002	0,014	0,007	0	0
8,1 – 9,0	0	0,002	0,001	0	0	0	0	0,001	0,011	0,005	0	0
9,1 – 10,0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0,008	0,003	0	0
10,1 – 11,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0,002	0	0
11,1 – 12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0,001	0	0
12,1 – 13,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0,001	0	0
13,1 – 14,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0
14,1 – 15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0	0
15,1 – 16,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16,1 – 17,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17,1 – 18,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,1 – 19,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5: Windklimatologie Friedrichshafen 01/2001 bis 12/2010 (Häufigkeiten der beobachteten Halbstundenwerte an der Station 2793 Friedrichshafen [10])<sup>8</sup>

Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit in Untersuchungshöhen oberhalb von 10 m wird das logarithmische Windgesetz angewandt im Rahmen von Kapitel 4 mittels Gleichung (1) [23]:

$$v_{Wind} = v_r \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (1)$$

Mit:  $v_{Wind}$  – Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Höhe über Grund  
 $v_r$  – Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe [m/s]  
 $z_r$  – Referenzhöhe [m]  
 $z$  – Höhe [m]  
 $z_0$  – dynamische Rauigkeitslänge<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Es ist der Mittelwerte der jeweiligen Klasse dargestellt.

<sup>9</sup> Dies ist eine fiktive Höhe über dem Erdboden. Sie charakterisiert zudem die Rauigkeit der Erdoberfläche (z.B. Bewuchs etc.).

Die dynamische Rauigkeitslänge wird zu  $z_0 = 0,5 \text{ m}$  gemäß [23] bestimmt. Als Referenzhöhe wird 10 m über Grund festgelegt, da die Messungen eben in dieser Höhe durch den DWD erfolgen.

## 2.5 Topografie im Nahbereich des Flughafens Friedrichshafen

Das Geländeprofil unterhalb beider Anfluggrundlinien ist in nachfolgender Abbildung 1 dargestellt. Gemäß AIP [6] besteht zwischen den Schwellen ein Höhenversatz von 9 m. Zudem ist ersichtlich, dass das Gelände auf beiden Seiten der SLB im Bereich der Anfluggrundlinien nahezu eben verläuft. In Anflugrichtung 06 ist im Bereich der Anfluggrundlinien ein Höhenversatz von etwa -5 m im Vergleich zum FBP, in Anflugrichtung 24 ein Höhenversatz von etwa +5 m im Vergleich zum FBP festzustellen.

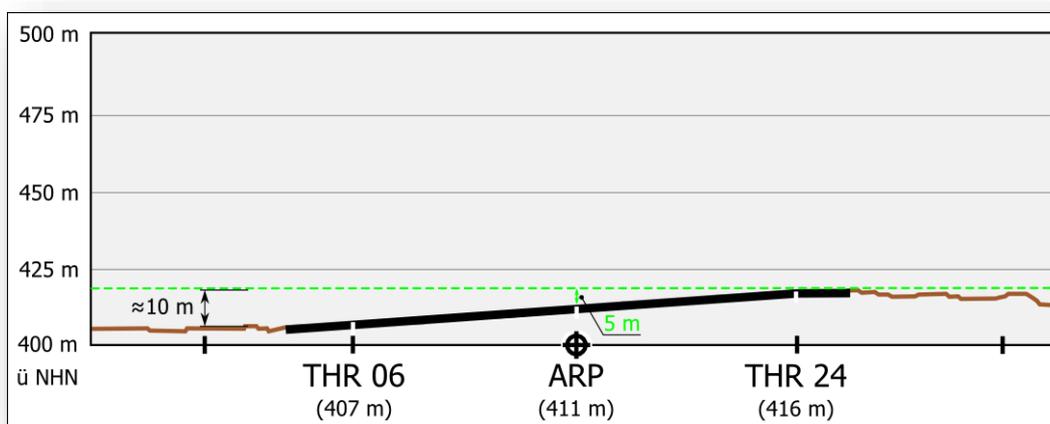


Abbildung 1: Topografie entlang der Start- und Landebahn [6]

### 3 Bisherige Wirbelschleppenschadensbilanz am Flughafen Friedrichshafen

Im Rahmen des nachfolgenden Kapitels werden die durch die Flughafen Friedrichshafen GmbH bereitgestellten Daten zu Wirbelschleppenschäden in der Umgebung des Flughafens [11] analysiert. Die Analyse soll zeigen, ob die derzeit gültigen Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete ausreichend dimensioniert sind, oder nachweisliche Wirbelschleppenschäden in signifikantem Umfang auch außerhalb dieser Gebiete zu verzeichnen waren.

Einführend ist festzustellen, dass in der Genehmigung des Flughafens mit Änderung vom 1. März 1996 explizite Wirbelschleppen-Vorsorgemaßnahmen festgeschrieben sind, hierzu heißt es in [2]:

„[...]

#### 3. Vorsorgemaßnahmen Wirbelschleppen

3.1 Die FFG hat auf Antrag den Grundstückseigentümern, die innerhalb der in den Anlagen 2 und 3 dargestellten Gebiete an Dachteilen eines Gebäudes, das vor dem 01.03.1996 errichtet oder bauaufsichtlich genehmigt wurde, Schneefanggitter über Verkehrsflächen anbringen zu lassen, die hierfür angemessenen Aufwendungen zu erstatten. Als Verkehrsflächen gelten insbesondere Gehwege, Eingänge, Terrassen und Spielflächen für Kinder.

Lässt ein Eigentümer eine Verklammerung von Dachziegeln vornehmen, so hat die FFG auf Antrag diejenigen angemessenen Aufwendungen zu erstatten, die bei einer Neueindeckung zusätzlich dadurch entstehen oder entstehen würden, das eine Verklammerung der Dachziegel vorgesehen ist.

3.2 Stehen Gebäude oder Teile der Gebäude im Eigentum eines Erbbauberechtigten oder Wohnungseigentümers, so tritt dieser an die Stelle des Grundstückseigentümers.

Liegt ein Gebäude nur zum Teil innerhalb des Wirbelschleppenvorsorgegebietes, so gilt es als ganz darin gelegen.

3.3 Bei Streitigkeiten nach Ziff. 3.1, insbesondere über die Angemessenheit der geltend gemachten Aufwendungen, entscheidet ein von der FFG beauftragter, öffentlich bestellter Sachverständiger.

[...]“

Die derzeit gültigen Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete sind dem Anhang A1 und A2 zu entnehmen. Die Gebiete beginnen an der Grenze des Flughafengeländes und erstrecken sich entlang der Anfluggrundlinien.

Neben den Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten wurden seitens des Flughafens Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete definiert. Diese sind in den vom AG bereitgestellten CAD Plänen verzeichnet [29]. Anders als die Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten ergeben sich für diese Gebiete keine expliziten Maßnahmen, sie dienen hauptsächlich der Lokalisierung und Überprüfung etwaiger gemeldeter Vorfälle. Die Zone weist eine Breite von ca. 160 m sowie eine Länge entlang der verlängerten Anfluggrundlinie von ca. 2.700 m auf [29].

Im Rahmen des Wirbelschleppengutachtens aus dem Jahr 1999 [31] wurden umfangreiche Analysen zu Wirbelschleppenschäden durchgeführt. Im Ergebnis zeigte sich, dass

- über 90 % der im Nahbereich des Flughafens befindlichen Gebäude mit Dachziegeln und Dachsteinen gedeckt sind,

- bisher nachgewiesene Wirbelschleppenschäden bis auf eine Ausnahme ausschließlich bei derartigen Eindeckungen festzustellen waren,
- Wirbelschleppenschäden durch unterschiedliche Anzahl loser Dachziegel zu verzeichnen waren, die teilweise auch zu Boden fielen, Beschädigungen der Unterkonstruktion jedoch nicht festzustellen waren,
- Wirbelschleppenschäden fast ausnahmslos an Satteldächern mit einer Dachneigung von 40-45° zu verzeichnen waren (vgl. hierzu auch Kapitel 4.4) sowie
- mehr als 75 % der in den Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten erfassten Gebäude mit Dachklammern versehen worden sind.

Gemäß Angaben der Flughafen Friedrichshafen GmbH wurden aufgrund der Änderungsgenehmigung zwischen 1995 – 2001 gezielt o.g. Verklammerungsmaßnahmen in den Vorsorgegebieten gemäß den Vorgaben der Dachdeckerrichtlinien (mit erfolgten Abnahmen durch Externe [31]) vorgenommen. Zudem wurden bis zum Jahr 2010 vereinzelt auch Verklammerungen außerhalb dieser Zonen vorgenommen, wenn Schäden nachgewiesen wurden.

In den bereitgestellten Daten ist verzeichnet, an welchen Orten Wirbelschleppenschäden aufgetreten sind. Angaben zu spezifischen Dachausführungen sowie etwaige externe Gutachten zu Schäden an Gebäuden nach 1999 (dezidierte Analyse der Schäden bis 1999 gemäß [31]) lagen nicht vor. Im Ergebnis der Analysen zeigt sich nun als Aktualisierung der bereits erfolgten Analysen aus dem Jahr 1999:

- Die gemeldeten Wirbelschleppenvorfälle sind nahezu ausschließlich im unmittelbaren Umfeld der Anfluggrundlinien verortet (vgl. Abbildung 2).
- Für die Bahn 06 beträgt hinsichtlich der gemeldeten Vorfälle
  - die maximale Entfernung in longitudinaler Richtung ca. 2.375 m vor der Schwelle (Friedrichshafen, Maybachstr. 45).
  - Lateral beträgt sie maximal ca. 136 m Abstand zur Bahnmittellinie (Friedrichshafen, Ailingenstr. 49).
- Für die Bahn 24 liegen die Werte bei:
  - maximale Entfernung in longitudinaler Richtung ca. 3.315 m vor der Schwelle (Meckenbeuren, Wieselstr. 16).
  - Lateral beträgt sie maximal ca. 230 m Abstand zur Bahnmittellinie (Meckenbeuren, Haupstr. 152).

Für die Landerichtung 06 ist in Bezug auf die auslösenden Luftfahrzeugmuster nach [11] festgehalten, dass der am weitesten von der Bahn entfernte Schaden (Friedrichshafen, Maybachstr. 45) durch ein LFZ vom Typ Boeing 757 ausgelöst wurde. Zudem führten insbesondere durch LFZ vom Typ Boeing 737 und British Aerospace BAe 146 induzierte Wirbelschleppen zu Vorfällen.

Nachfolgende Abbildung 2 zeigt eine Verortung der gemeldeten und nachweislich durch den Flughafen Friedrichshafen geprüften Wirbelschleppenschäden relativ zu den *Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten*. Es zeigt sich, dass ca. 18 Vorfälle mit Wirbelschleppenschäden außerhalb dieser Gebiete eintraten, sodass eine Anpassung der Gebiete geboten scheint. Dieser Sachverhalt wird im Rahmen der Handlungsempfehlungen nochmals aufgegriffen.

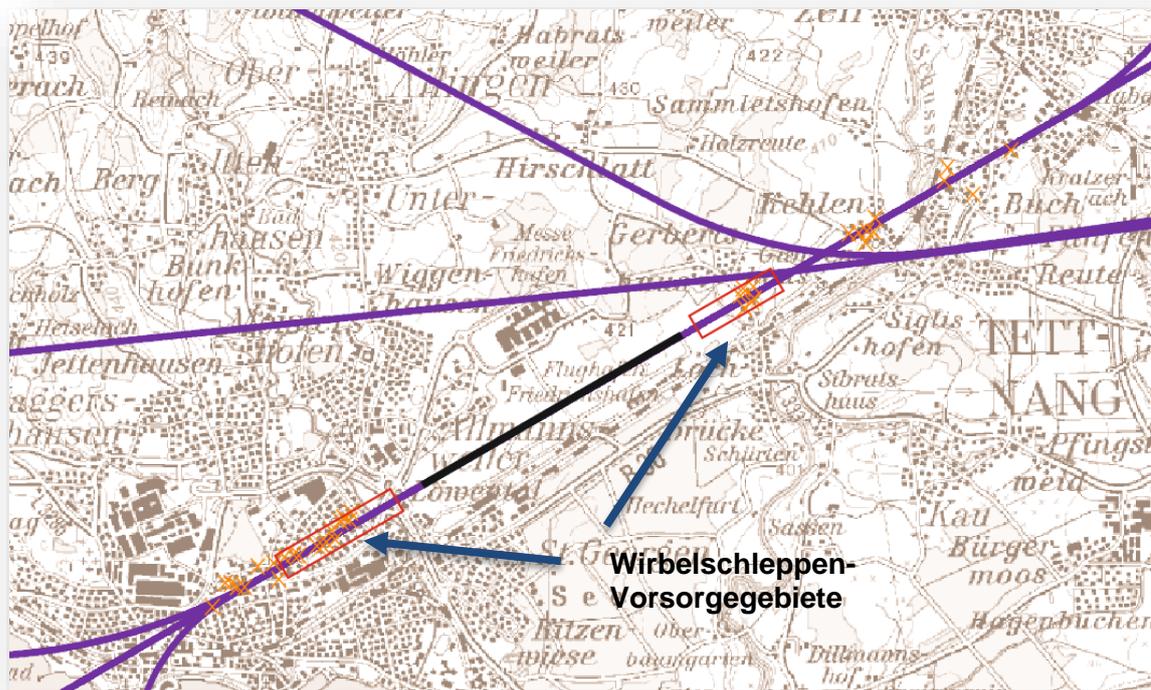


Abbildung 2: Verzeichnete Wirbelschleppenschäden (orangefarbige Kreuze) in Bezug zu den Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten (rote Rechtecke)

Seitens der Flughafen Friedrichshafen GmbH wurden zudem o.g. Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete festgelegt, in denen eine Prüfung etwaiger gemeldeter Vorfälle veranlasst wird (vgl. Abbildung 3). Auch hier zeigt sich, dass vereinzelte Wirbelschleppenschäden außerhalb dieser Zonen auftraten.

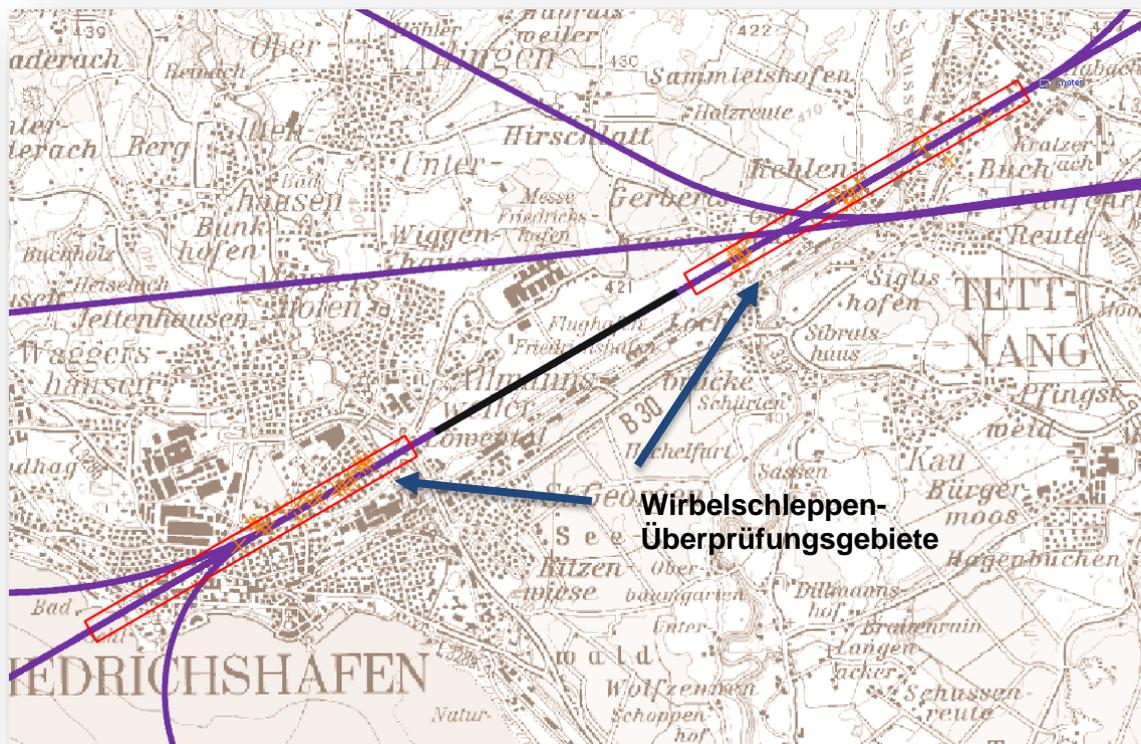


Abbildung 3: Verzeichnete Wirbelschleppenschäden in Bezug zu den Wirbelschleppen-Überprüfungsgebieten (rote Rechtecke)

## 4 Modellierung der Auswirkungen von Wirbelschleppen

### 4.1 Modellentwicklung

GfL hat zur Untersuchung der auftretenden Wirbelschleppen bereits in 2006 im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zum Ausbau des Flughafens Frankfurt/Main (4. Bahn) in Kooperation mit *Dziomba Aeronautical Consultant* ein Modell entwickelt und angewandt, das mögliche Gefährdungen von Personen und Gebäuden bedingt durch Wirbelschleppen gemäß der eingeführten Kennziffern (siehe Abschnitt 1) landender LFZ zu ermitteln gestattet [9].

Die Gefährdungsanalyse basiert auf einem wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz, ist also ein statistisch-stochastisches Verfahren der Risikoanalyse. Empirische Grundlage des Ausbreitungsverhaltens der Wirbelschleppen sind umfangreiche Wassertankversuche der Firma Airbus an Flugzeugmodellen (hier Messungen von Geschwindigkeitsfeldern in definierten Zeitintervallen) aus dem Jahr 2003 [9]. Im Ergebnis der Analysen wurden zur Beurteilung der Gefährdung für Gebäudedächer (hier das mögliche Ablösen von Dachziegeln als repräsentativer Schaden) klassenspezifische Funktionen zum Unterdruck in einer Wirbelschlepe (Klassen MEDIUM und HEAVY sowie das bekanntermaßen diesbezüglich kritische LFZ-Muster *Boeing 757*) aufgestellt [9]. Der Unterdruck wurde als maßgebliche physikalische Größe gewählt, da er für Dachschäden ursächlich sein kann. Den so errechneten Druckwerten lassen sich geltende Grenzwerte (Vorschriften des Dachdeckerhandwerks bezüglich der Windsogsicherheit von Dachdeckungen) gegenüberstellen und so hinsichtlich des resultierenden Gefährdungspotenzials bewerten [9].

Neben der Gefährdung von Gebäuden lässt sich mit diesem Modell auch das Gefährdungspotenzial von Personen über ein auf Personen wirkendes Kippmoment ableiten [9].

Die Annäherung der Wirbelschlepe an den Boden wird im Modell als Bodeneffekt abgebildet, der gemäß Sachstand 2006 [9] angenähert ab „einer Spannweite Flughöhe“ über dem Boden einsetzt. Durch die unterschiedlichen Spannweiten der Luftfahrzeuge (LFZ) erreichen die Wirbelschleppen den Boden folglich mit unterschiedlichen Wirbelstärken.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Wirbelschleppenforschung ein sehr dynamisches Forschungsgebiet ist. Vielfältige Forschungsergebnisse zeigen auf, dass neueste Messverfahren (z. B. hochauflösende *Light detection and ranging* Systeme, LIDAR) auch zu neuen, erweiterten Erkenntnissen zum Ausbreitungsverhalten von Wirbelschleppen in unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen führen können. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen demnach folgende wesentliche Erkenntnisse [12], [13], [14], [15], [16], wie sie in vorliegender Modellierung nunmehr auch Berücksichtigung finden:

- Der Transport und Zerfall der Wirbelschlepe wird maßgeblich von den atmosphärischen Randbedingungen (Turbulenzgrad und Schichtung der Atmosphäre) bestimmt.
- Der Zerfall der Wirbelschlepe lässt sich mittels eines 2 Phasen Modells (vgl. Kapitel 4.3.1) beschreiben.
- Es ist eine Deformation der Wirbelachsen im Zerfallsprozess festzustellen, die Wirbel verlieren ihre vorherige Struktur.
- Die Annäherung der Wirbelkerne an den Boden lässt durch Wechselwirkung mit dem Boden zusätzliche kleine Wirbel entstehen.
- Es kann nachweislich vereinzelt zu einem Wiederaufstieg der Wirbelschleppen nach Bodenannäherung kommen.

## 4.2 Begriffsbestimmungen

Folgende Begriffe werden im Gutachten verwendet und wie folgt festgelegt:

- Die **Tangentialgeschwindigkeit** [m/s] ist jene Geschwindigkeit, die bei Rotation eines Teilchens mit gegebener Winkelgeschwindigkeit bzw. Zirkulation und gegebenem Abstand zur Rotationsachse tangential zur Kreisbahn (senkrecht zur radialen Richtung) wirkt.
- Die **Zirkulation** [m<sup>2</sup>/s] bestimmt die Wirbelstärke einer Wirbelschleppe als Integral über die Fläche des Wirbelstärkefeldes. Die Zirkulation ist ein Begriff aus der theoretischen Aerodynamik. Zwischen der Zirkulation und der Auftriebskraft und damit Größe eines LFZ besteht ein direkter Zusammenhang (vgl. Kapitel 4.3.3).
- Der **Windsog** [kN/m<sup>2</sup>] wird definiert als flächenbezogene Sogkraft bedingt durch Windlasten auf Bauwerke oder Bauteile, hier speziell auf die Dachflächen (speziell Dachziegel). Die Sogwirkung (Unterdruck)<sup>10</sup> entsteht dabei durch die Anströmung der Dachfläche und deren Bauteile (bspw. Dachziegel und Dachsteine) und wird im Wesentlichen von den Gebäude- bzw. Dacheigenschaften (z. B. Dachneigung, Dachform etc.) bestimmt. Der Windsog errechnet sich dabei aus dem dynamischen Druck über die Angriffs-/ Dachziegelfläche, die aus der Wirbelschleppen Anströmung resultiert. So dient der Windsog auch zur Beurteilung der Lagesicherung von Dachdeckungen [20].
- Das **Gefährdungspotenzial** wird als Eintrittswahrscheinlichkeit pro Jahr einer *hinreichend kräftigen* Wirbelschleppe an einem bestimmten Ort unter Beachtung der signifikanten Einflussgrößen „vorherrschende Windgeschwindigkeiten“ und „Windrichtungen“ am Flughafen Friedrichshafen sowie unter der Randbedingung der Überschreitung eines Windsog Grenzwertes (Minimums) definiert. Es bestimmt sich als Produkt der Windwahrscheinlichkeit pro Jahr mal Flugbewegungen pro Jahr für alle Rasterpunkte, an denen der Grenzwert erreicht bzw. überschritten werden kann.<sup>11</sup>

Interpretation: Ein Gebäude-Gefährdungspotenzial von  $1 \times 10^{-5}$  pro Jahr an einem Ort (hier Rasterzelle) kann vereinfacht dahingehend interpretiert werden, dass rechnerisch an dieser Position alle 100.000 Jahre eine Wirbelschleppe auftritt, die zu einem Ablösen von Dachziegeln aufgrund der Überschreitung eines als kritisch eingestuften Windsoges führen kann. Voraussetzung ist natürlich, dass sich an diesem Ort Bebauung befindet. Den Grundlagen der Statistik folgend liefern derartige Erwartungswerte jedoch keine Gewissheit darüber, wann und ob dieses Ereignis tatsächlich eintritt. Die folgende Tabelle 6 stellt als weitere Interpretationshilfe Einzel- und Erwartungswerte gegenüber:

<sup>10</sup> Die darüber hinaus entstehende Druckwirkung wird in vorliegendem Gutachten nicht thematisiert, da diese für den Untersuchungsgegenstand als weniger kritisch zu beurteilen ist (vgl. Kapitel 4.4).

<sup>11</sup> vgl. Kapitel 2.3

Einzelwert pro Jahr (Gefährdungspotenzial)	Erwartungswert (Eintrittshäufigkeit)
$1 \times 10^{-7}$	alle 10.000.000 Jahre
$1 \times 10^{-6}$	alle 1.000.000 Jahre
$1 \times 10^{-5}$	alle 100.000 Jahre
$1 \times 10^{-4}$	alle 10.000 Jahre
$1 \times 10^{-3}$	alle 1.000 Jahre
$1 \times 10^{-2}$	alle 100 Jahre
$1 \times 10^{-1}$	alle 10 Jahre
$1 \times 10^0$	jedes Jahr

Tabelle 6: Zusammenhang zwischen Einzelwert und Erwartungswert

Folgende Größen werden im Rahmen des Gutachtens verwendet:

Größe	Definition	Einheit
$b_0$	Anfänglicher Abstand der Wirbelachsen	[m]
$\Gamma$	Zirkulation	[m <sup>2</sup> /s]
$\Gamma_0$	Anfängliche Zirkulation einer Wirbelschlepe	[m <sup>2</sup> /s]
$\omega$	Sinkgeschwindigkeit einer Wirbelschlepe	[m/s]
$B$	Spannweite des auslösenden LFZ	[m]
$\Theta$	Potentielle Temperatur	[K]
$m$	Masse des LFZ	[kg]
$N^*$	Normierte Brunt-Väisälä-Frequenz	[-]
$\nu_1$	Effektive Viskosität in Phase 1 (2-Phasen Modell)	[m <sup>2</sup> /s]
$\nu_2$	Effektive Viskosität in Phase 2 (2-Phasen Modell)	[m <sup>2</sup> /s]
$r_c$	Kernradius der Wirbelschlepe	[m]
$r$	Radius der Wirbelschlepe	[m]
$v_{LFZ}$	Anfluggeschwindigkeit des LFZ	[m/s]
$v_{tan}$	(Induzierte) Tangentialgeschwindigkeit des Wirbels	[m/s]
$v_{Wind}$	Windgeschwindigkeit am Untersuchungsort/-höhe	[m/s]
$v_{res}$	Resultierende (tangentiale) Windgeschwindigkeit einer Wirbelschlepe	[m/s]
$w_{de}$	Windsog	[kN/m <sup>2</sup> ]

Tabelle 7: Verwendete Größen in der Wirbelschleppenmodellierung

## 4.3 Methodik der Wirbelschleppenmodellierung

### 4.3.1 Entstehung und Zerfall der Wirbelschleppe

LFZ, die sich im Flug befinden, erzeugen fortwährend Wirbel. Ursache hierfür sind die Strömungsverhältnisse am Tragflügel, die konstruktiv vorgegeben sind und prinzipiell für alle am Flughafen FDH verkehrenden LFZ gleichermaßen gelten.

Typisches Merkmal der Tragflächenströmung sind Ausgleichströmungen als Folge der nicht gleichförmig entlang der Tragflächen Spannweite verteilten aerodynamischen Last (große Last an Tragflächenwurzel, kleine Last an der Tragflächenspitze). Daraus resultiert eine Wirbelschicht entlang der gesamten Hinterkante der Tragflächen, die aus zahlreichen kleinen Einzelwirbeln besteht und fortwährend gebildet wird (vgl. Abbildung 4, rechts). Diese Wirbelschicht rollt sich zu einem stabilen Wirbelpaar auf, das aus zwei gegensinnig rotierenden Wirbeln besteht. Die Wirbelbildung tritt nicht nur an den Tragflügelenden (als Ausgleichströmung um den äußeren Tragflächenrand) auf, sondern entlang der gesamten Spannweite des Tragflügels.

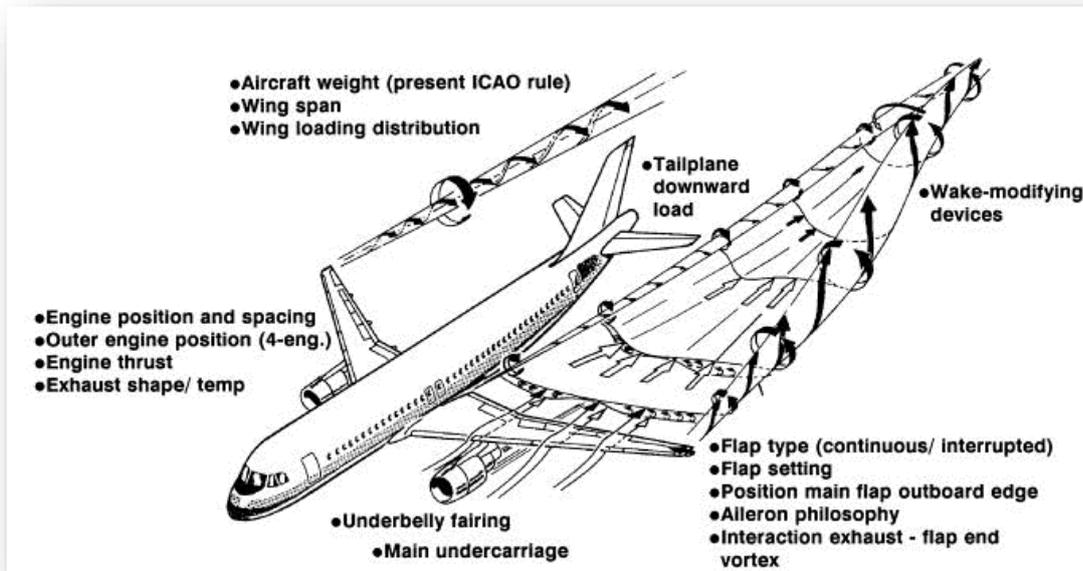


Abbildung 4: Nachlauf-Wirbelmodell [9]

Die Wirbelschleppe lässt sich wie ausgeführt u. a. mittels des Geschwindigkeitsverlaufs über den Radius beschreiben (vgl. Abbildung 5). Die Geschwindigkeitsmaxima über das Wirbelprofil definieren den Wirbelkernrand: Im Zentrum des Wirbelkerns ist die Tangentialgeschwindigkeit der Physik folgend null. Bis zum Kernrand nimmt die Geschwindigkeit mit wachsendem Abstand zum Zentrum gemäß klassischen Starrkörpergesetzen zu. Außerhalb des Wirbelkerns nimmt allerdings die Tangentialgeschwindigkeit mit der Kohäsion wieder ab. Abbildung 5 zeigt auf der linken Seite den Schnitt (Geschwindigkeitsverlauf) durch eine Wirbelschleppe einer Tragfläche. Auf der rechten Seite sind Wirbelschleppen beider Tragflächen (grüne und blaue Kurve) dargestellt. Die rote Kurve gemäß Abbildung 5 zeigt den resultierenden Tangentialgeschwindigkeitsverlauf für zwei zur Flugzeuglängsachse symmetrische Wirbel im Abstand  $b_0$  an beiden Tragflächenenden (nach Abschluss des sog. Aufrollvorganges). Es wird ersichtlich, dass durch die Überlagerung der Wirbel ein Absinken der Kerne mit der Geschwindigkeit  $w$  erfolgt (resultierende rote Kurve). Diese Geschwindigkeit wächst mit der Wirbelstärke (abgebildet durch die Zirkulation  $\Gamma$ , vgl. Kapitel 4.3.3). Hingegen

wird sie umso kleiner, je größer der Abstand der Wirbelschleppen  $b_0$  (also auch die Spannweite  $B$ ) des LFZ ist.

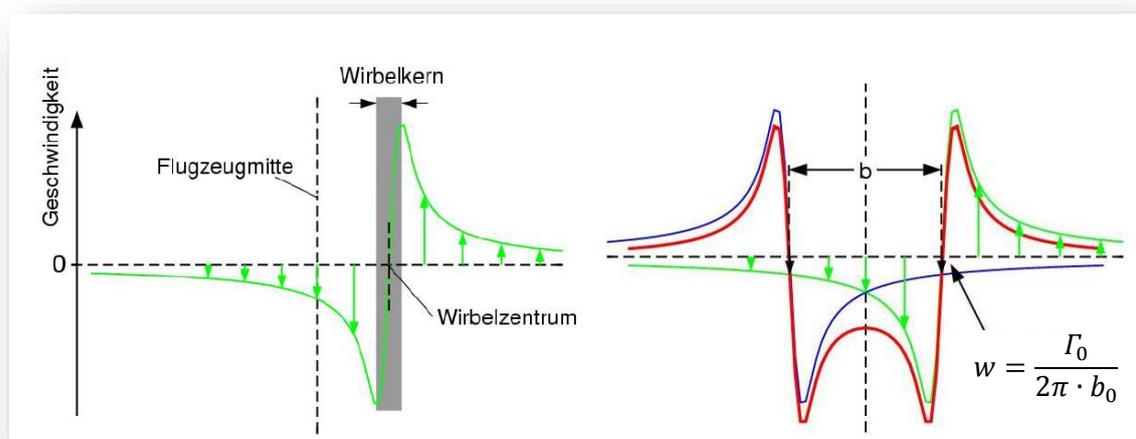


Abbildung 5: Radialer Geschwindigkeitsverlauf in einer Wirbelschleppe [3]

Grundsätzlich lässt sich die Wirbelschleppe in zwei Bereiche unterteilen<sup>12</sup>:

1. Aufrollvorgang, der auf jeder Tragflächenseite zur Bildung eines konsolidierten Wirbels führt [9].
2. Zerfallsprozess, in dem voll ausgebildete Wirbelschleppen aufgrund der Wechselwirkung mit der Atmosphäre zerfallen. Dieser Zerfallsprozess wird in 2 Phasen abgebildet („Zwei-Phasen-Modell“), wie nachfolgend detailliert erläutert:

Die Wirbelschleppe sinkt wie erwähnt über den gesamten Zerfallsprozess ab. Der sog. Bodeneffekt (vgl. Kapitel 4.3.2) hat hierbei signifikanten Einfluss auf den Zerfallsprozess in Bodennähe.

Der Zerfall einer Wirbelschleppe wird maßgeblich durch die umgebende Atmosphäre, speziell durch die Parameter Temperaturschichtung und Turbulenz bestimmt [12], [13].

Die Temperaturschichtung bezeichnet hierbei die Zunahme der *potentiellen* Temperatur  $\theta$  mit der Höhe. Sie wird über die normierte Brunt-Väisälä-Frequenz  $N^*$  charakterisiert [12], [13]. Forschungen zeigen, dass die Temperaturschichtung insbesondere durch hervorgerufene Sekundärstrukturen in den Wirbeln zum Zerfall der Wirbelschleppe beiträgt [13], [14], [12].

Turbulenz, d. h. meist dreidimensionale, scheinbar zufällige, instationäre Bewegungen der Luftteilchen, ist ein weiterer Parameter zur Beschreibung der Atmosphäre. Sie tritt grundsätzlich auf, wenn Trägheitskräfte gegenüber Reibungskräften dominieren [12].

Der Zerfall von Wirbelschleppen kann infolge mittels eines Zwei-Phasen-Modells beschrieben werden, sofern Turbulenz und Temperaturschichtung nicht dominieren [13], [14], [16]:

1. In der ersten Phase erfolgt eine langsame Abnahme der Zirkulation (demnach auch der Tangentialgeschwindigkeit, vgl. Kapitel 4.2).
2. In der zweiten Phase erfolgt durch Wechselwirkung mit der Atmosphäre ein starker Zerfall der Wirbelschleppe und hiermit ein starker Rückgang der Zirkulation [13], [14], [16].

<sup>12</sup> Im Rahmen dieses Gutachtens wird ausschließlich auf den Zerfallsprozess fokussiert.

Zum Ende der Lebensdauer des Wirbels geht die geordnete Turbulenz der Wirbelkerne in die untergeordnete Turbulenz der Umgebungsluft über. Ab diesem Zeitpunkt ist eine Identifikation einzelner Wirbel nicht mehr möglich. Die Zirkulationsabnahme wird in den jeweiligen Phasen durch die effektive Viskosität (also der Widerstand, den die Rotation in der Strömung überwinden muss, ermittelt aus Messwerten)  $\nu_1$  und  $\nu_2$  modelliert [13], [32].

Weiterhin zeigen Messungen [13], dass Wirbelschleppen durch umgebenden Wind verdriftet werden können, bei fehlendem Seitenwind ist der seitliche Versatz gering. Zudem treten mit dem Zerfallsprozess Verformungen der Wirbelstruktur auf. Dies führt zu einer Veränderung der Wirbelachsen im Raum [3], die für die Gebäudegefährdung in Bezug auf den wirkenden Windsog von Bedeutung sind.

Meteorologische Daten über den jeweiligen Atmosphärenzustand liegen immer nur für vereinzelte Messpunkte, ggf. als statistische Mittel vor. Demnach unterliegt der Zerfall der Wirbelschleppe bis zu einem gewissen Grad zufälligen Prozessen [12], [16]. Abhilfe können hier probabilistische Verhaltensmuster (Beschreibung als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) schaffen, die jedoch mittels umfangreicher Messkampagnen zunächst parametrisiert werden müssen.

Allgemein nachgewiesen ist, dass maximale Lebensdauern von Wirbelschleppen in ruhiger, neutral geschichteter Atmosphäre aufgrund dann geringer energetischer Wechselwirkung mit der Atmosphäre erreicht werden [13]. Diesem Ansatz wird im Rahmen des Gutachtens gefolgt und nachfolgende Berechnungen (vgl. Kapitel 5) werden im Sinne eines Worst-Case-Ansatzes aus Gefährdungssicht basierend auf einem derartigen Atmosphärenzustand durchgeführt.

#### 4.3.2 Bodeneffekt

In Kapitel 4.3.1 wird ausgeführt, wie die Wirbelschleppe im Zerfallsprozess absinkt. Gemäß aktuellem Forschungsstand setzt ca. 1,5 Spannweiten über dem Boden der Bodeneffekt auch bedingt durch die Bildung sog. Sekundärstrukturen ein [13], [15]. Der Wirbelkern als maßgeblicher Bereich für die Ermittlung maximal auftretender Tangentialgeschwindigkeiten sinkt den Erkenntnissen folgend bis auf den halben Abstand der Wirbel  $b_0$  zum Boden ab und verdriftet seitlich [15] (vgl. Abbildung 6). Als Sekundärstrukturen treten zusätzliche, kleinere Einzelwirbel auf, die zu einem Wiederaufstieg des Hauptwirbels führen [15] (vgl. Abbildung 7). Analysen zeigen, dass in Abhängigkeit der atmosphärischen Randbedingungen unterschiedliche Wiederaufstiegshöhen bis hin zu einem Verbleib in der minimalen Höhe erreicht werden können [15]. In [15] konnte zudem gezeigt werden, dass bei Seitenwind ein asymmetrisches Aufstiegsverhalten eintritt. Der dem Wind abgewandte Wirbel (Leewirbel) kann hiernach größere Höhen erreichen, hat jedoch im Vergleich zum Wind zugewandten Wirbel (Luvwirbel) eine geringere verbleibende Zirkulation [15].

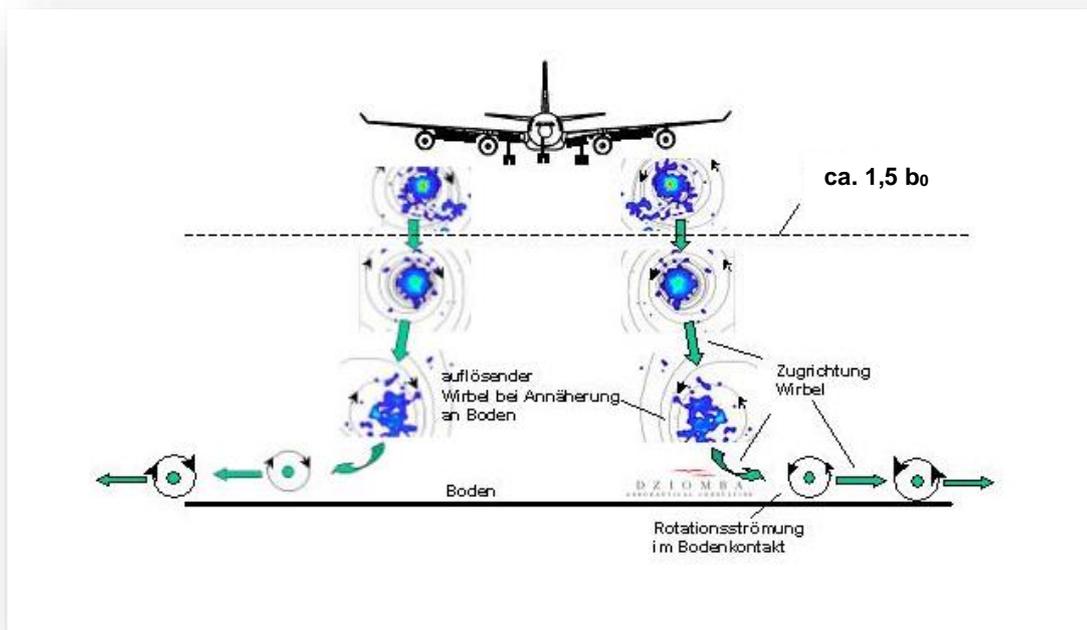


Abbildung 6: Wirbelschlepe im Bodeneffekt [9]

Nachfolgende Abbildung 7 zeigt die durch einen Wirbel in Bodennähe induzierte Strömung und das Entstehen von Sekundärwirbeln [32]. Der gegenläufig rotierende Sekundärwirbel steigt mit dem Hauptwirbel durch gegenseitige Induktion auf [32].

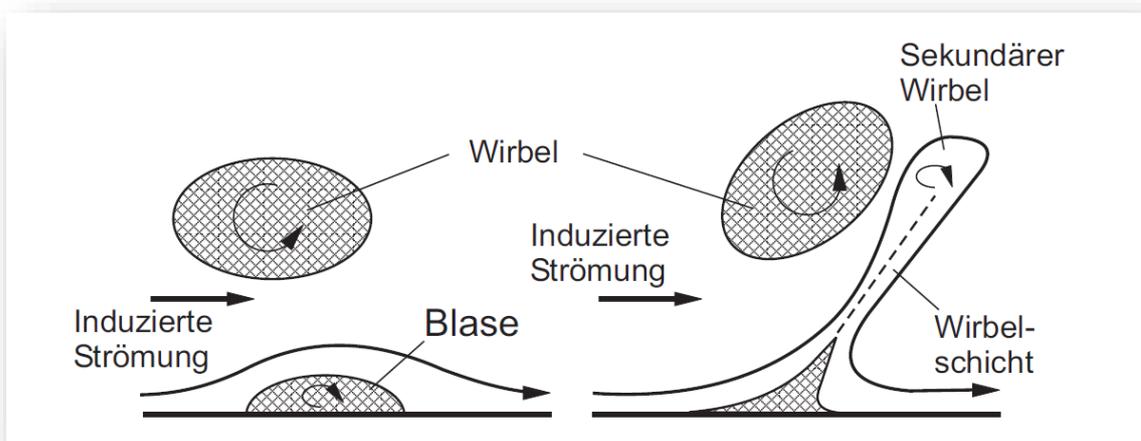


Abbildung 7: Effekt des Wiederaufstiegs eines Wirbels im Bodeneffekt [32]

Der Zerfallsprozess im Bodeneffekt wird gemäß [15] modellseitig über die effektive Viskosität der Luft  $\nu_2$  in Funktion des Seitenwindes bestimmt. Mit zunehmendem Seitenwind ergibt sich hierbei eine Beschleunigung des Zerfalls [15]. Der Verlauf des Wiederaufstiegs wird im Modell gemäß [15] über den Luv Wirbel (dem Wind zugewandten Wirbel des ursprünglich am Ende des Aufrollvorganges erzeugten Wirbelpaars) ausgehend von der minimalen Absinkhöhe linear approximiert (hier Steigung = 0,484), da dieser zwar geringere Wiederaufstiegshöhen, jedoch eine größere Wirbelstärke aufweist.

### 4.3.3 Kenngrößen einer Wirbelschleppe

#### Zirkulation

Die Wirbelstärke einer Wirbelschleppe wird durch die Zirkulation beschrieben (vgl. Gleichung (2) hier definiert als die Anfangszirkulation  $\Gamma_o$  )

$$\Gamma_o = \frac{m g}{\rho b_o v_{LFZ}} \quad (2)$$

Mit: m – Masse des LFZ [kg]  
 g – Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]  
 ρ – Luftdichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 b<sub>0</sub> – anfänglicher Abstand der Wirbelachsen [m]  
 v<sub>LFZ</sub> – Geschwindigkeit des LFZ [m/s]

Der Wirbelabstand b<sub>0</sub> beträgt hierbei  $\pi/4$  (ca. 78%) der Spannweite B. Dies gilt für alle Luftfahrzeugmuster auch mit voll ausgefahrenen Klappen [33]. Die Zirkulation ist gemäß Gleichung (2) definiert. Allerdings muss hierbei vermieden werden, dass eine Kompensation der Wirbelstärke durch den gegensinnig rotierenden Parallelwirbel eintritt, wenn die Radien zu groß werden, zudem ist eine Zirkulationsabnahme über die Zeit zu bestimmen [13]. Dementsprechend wird im Rahmen des Gutachtens die international anerkannte Definition von  $\Gamma_{5-15}^*$  angewandt, vgl. [13], [14], [16], die Radien von 5 m bis 15 m repräsentiert<sup>13</sup>.  $\Gamma_{5-15}^*$  beschreibt hierbei die Zirkulationsabnahme über die Zeit als normierte Größe. Normiert wird sie auf die gemäß Gleichung (2) ermittelte Anfangszirkulation  $\Gamma_o$ . Die resultierende Zirkulation ergibt sich zu:

$$\Gamma_{5-15}(t) = \Gamma_{5-15}^* \cdot \Gamma_o \quad (3)$$

$\Gamma_{5-15}^*$  liefert Werte zwischen 0 und 1 und bestimmt somit die Zirkulationsabnahme über die Zeit. Nachfolgende Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Verlauf der normierten Wirbelstärke über der normierte Zeit für unterschiedliche Atmosphärenzustände.

<sup>13</sup> Dieser Ansatz ermittelt die Zirkulation senkrecht zur Wirbelkernlinie. Auf dieser Ebene kann über den gesamten Zerfallsprozess die maximale Zirkulation erwartet werden.

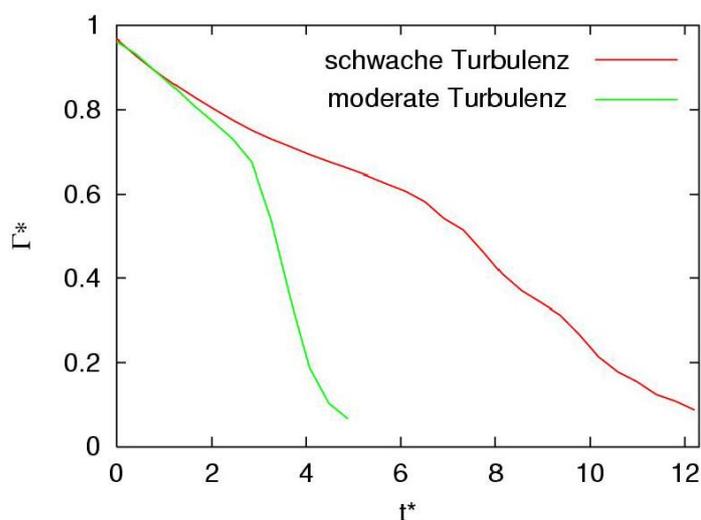


Abbildung 8: Abnahme der normierten Wirbelstärke  $\Gamma_{5-15}^*$  über die normierte Zeit  $t^*$  für unterschiedliche Atmosphärenzustände gemäß [3]

Nachfolgende Tabelle 9 liefert exemplarisch die Kenngrößen von Wirbelschleppen für ausgewählte, am Flughafen Friedrichshafen operierende Luftfahrzeugmuster (Zirkulation berechnet nach Gleichung (2)).

LFZ	Lande- masse [kg]	Spannweite B [m]	Anflug- geschwindig- keit v [m/s]	Abstand der Wirbelachsen $b_0$ [m]	Zirkulation $\Gamma_0$ [m <sup>2</sup> /s]	Sink- geschwindig- keit im Zerfalls- prozess [m/s]
CRJ 700	30,4	23,2	63	18,2	222	1,94
A320-200	66,0	34,1	69	26,8	299	1,78
B737-800	65,3	34,4	75	27,0	270	1,59
B757-300	102,0	38,1	71	29,9	403	2,14

Tabelle 8: Kenngrößen von Wirbelschleppen für in EDNY typische Luftfahrzeugmuster (bei Standardatmosphäre in 500 m NHN: Luftdichte = 1,17 kg/m<sup>3</sup> Temperatur = 11,5°C)

Sinkgeschwindigkeit

Die Sinkgeschwindigkeit bestimmt sich gemäß Gleichung (4) [13] wie folgt:

$$\omega = \frac{\Gamma_0}{2\pi * b_0} \quad (4)$$

Mit:  $\Gamma_0$  – Zirkulation [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $b_0$  – anfänglicher Abstand der Wirbelachsen [m]

Es ist ersichtlich, dass eine Zunahme der Sinkgeschwindigkeit mit zunehmender Zirkulation zu verzeichnen ist. Zudem fällt die Sinkgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand der Wirbelachsen zueinander.

Tangentialgeschwindigkeit

Die Tangentialgeschwindigkeit einer Wirbelschleppe als Funktion des Radius  $r$  zum Wirbelzentrum wird mittels des Lamb-Oseen Modells ermittelt (vgl. Gleichung (5)).

$$v_{\text{tan}}(r) = \frac{\Gamma_{5-15}}{2\pi r} \left( 1 - \exp\left(-\frac{1.257 r^2}{r_c^2}\right) \right) \quad (5)$$

Mit:  $\Gamma$  – Zirkulation [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $r$  – Radius [m]  
 $r_c$  – Kernradius [m]

Gemäß Gleichung (5) spielt neben der Zirkulation der Kernradius  $r_c$  eine Rolle, da am dortigen Rand die maximale Tangentialgeschwindigkeit anliegt: Messungen zeigen weiterhin, dass bei einem Kernradius von 3,5 %  $b_0$  maximale Tangentialgeschwindigkeiten auftreten [17]. Demnach ergeben sich gemäß Tabelle 8 Kernradien zwischen 0,8 m und 1,3 m. Der Kernradius wächst mit zunehmendem Wirbelalter, wird hier jedoch hinsichtlich einer konservativen Abschätzung (maximal resultierende Wirbelstärke) konstant belassen.

Die *resultierende* Windgeschwindigkeit, die für eine Gefährdungsbeurteilung von Gebäuden und Personen im Weiteren herangezogen werden soll, ergibt sich aus der Summe der durch Wirbelschleppen *induzierten* Windgeschwindigkeit (hier der o. g. Tangentialgeschwindigkeit am Kernrand des Wirbels sowie der durch Sekundärwirbel induzierten Geschwindigkeiten) und dem Umgebungswind [13], [3].

Windsog

Der Windsog als maßgebliche Größe zur Beurteilung einer Gebäudegefährdung wird gemäß Gleichung (7) (vgl. Kapitel 4.4) als Unterdruck, der sich aus der *resultierenden* Windgeschwindigkeit der Wirbelschleppe bestimmt, als flächenbezogene Kraft ermittelt.

**4.4 Grenzwert für Gebäudegefährdung**

Die von anfliegenden LFZ verursachten Wirbelschleppen können wie berichtet zu Schäden an Gebäuden führen, die im Fokus der vorliegenden Studie stehen. Hierbei handelt es sich i. d. R. um Dachabdeckungen bzw. Dachziegelablösungen (vgl. Abbildung 10).

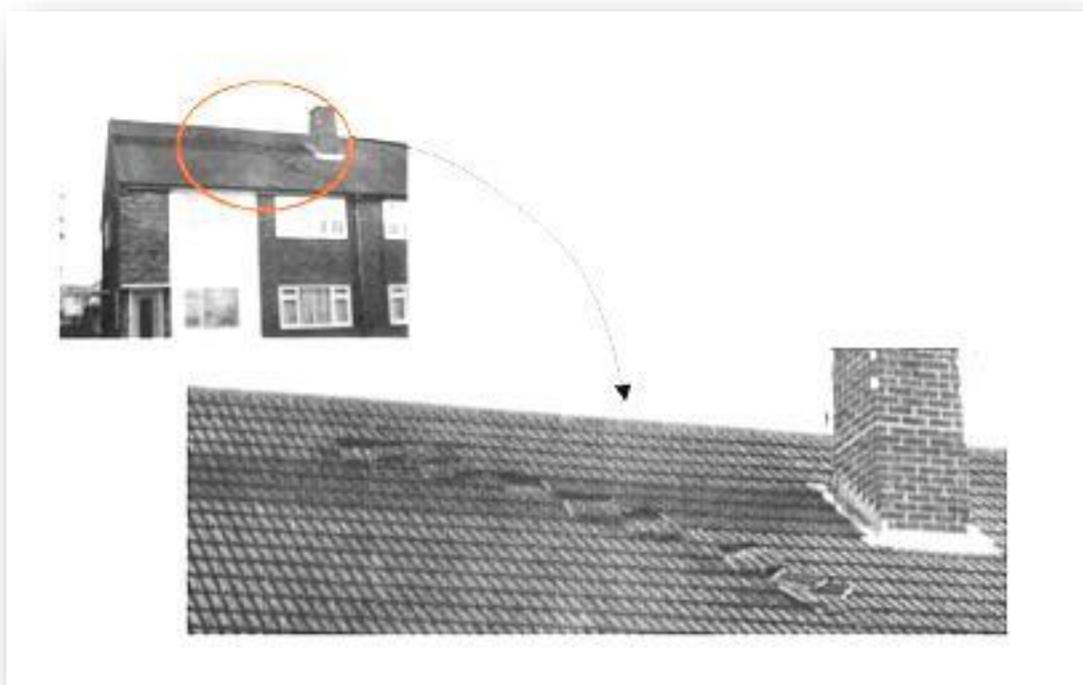


Abbildung 9: Von einer Wirbelschleppe verursachte Dachschäden, Nahbereich Flughafen London-Heathrow, aus [18]

Während großflächige Dachabdeckungen grundsätzlich relativ lange Einwirkzeiten (mehrere Minuten bis Stunden während eines Sturms) und hohe Windstärken voraussetzen (> Windstärke 8 bzw. Windgeschwindigkeiten von über 20 m/s), können bei typischen Einwirkzeiten durch Wirbelschleppen von nur 1 bis 2 Sekunden aufgrund ihrer kontinuierlichen Sinkbewegung (nach dem Aufrollaufgang) i.d.R. nur punktartige Dachschäden auftreten.

Als repräsentative physikalische Größe, die mit derartigen Schäden korreliert, wurde insofern der durch einen Wirbel hervorgerufene Windsog erkannt.

Für die Berechnung dieses Gefährdungspotenzials muss zunächst Kenntnis über die maximale Belastbarkeit der Dachdeckung gegeben sein. Der Windsog wird dabei aus dem vorherrschenden dynamischen Druck der Strömung (Wirbel und ggf. Windfeld) nach Bernoulli ermittelt. So wirkt auf die Dachziegel eine Unterdruckkraft, welche der Abhebekraft der Deckung durch Eigengewicht bzw. der ggf. vorhandenen mechanischen Befestigung entgegenwirkt. Der dynamische Druck  $q$  wird gemäß Gleichung (6) ermittelt:

$$q = \frac{1}{2} * \rho * v_{res}^2 \quad (6)$$

Mit:  $q$  – dynamischer Druck (Geschwindigkeitsdruck) [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\rho$  – Luftdichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 $v_{res}$  – Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Der Strömungsgeschwindigkeit  $v_{res}$  entspricht hierbei der *resultierenden* Windgeschwindigkeit einer Wirbelschleppe (vgl. Kapitel 4.6).

Die prinzipielle Wirkung des Windsoges ist in nachfolgender Abbildung 10 dargestellt:

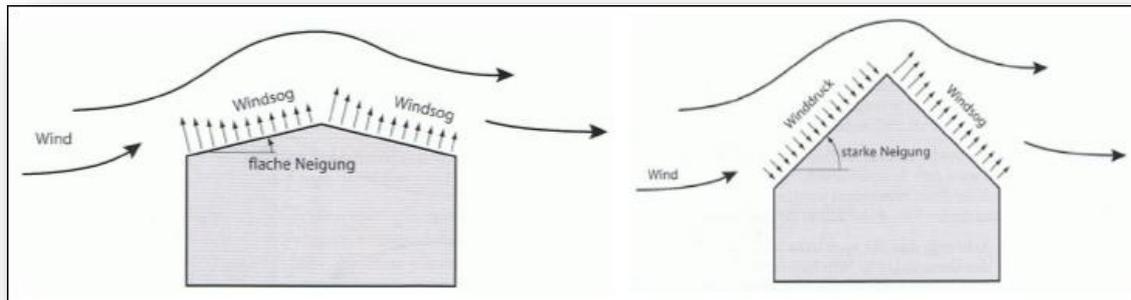


Abbildung 10: Windsogwirkung bei Dächern mit flacher (links) und starker Neigung (rechts) nach [20]

Die Druckverteilung auf dem Dach ist in starkem Maße von der Dachform und Dachneigung sowie der Anströmrichtung abhängig. Geneigte Dächer liegen im Regelfall nicht rechtwinklig zur Windrichtung (die Windrichtung wird als horizontal wirkend angenommen, dies gilt auch für die resultierende Windgeschwindigkeit einer Wirbelschleppe). Hinsichtlich der Dachneigungen ist festzustellen [20]:

- Bei Dachneigungen über ca. 30° tritt windzugewandt (luv) überwiegend Druck, windabgewandt (lee) Sog auf.
- Bei Dachneigungen unter ca. 15° wirkt windzugewandt überwiegend, windabgewandt immer Sog.
- Bei Dachneigungen von ca. 15° bis ca. 30° wirkt windzugewandt entweder Druck oder Sog, windabgewandt immer Sog.

Winddruck- und -sogkräfte wirken stets rechtwinklig zur Dachfläche. Gemäß [20] ist der Sog maßgebend für die Lagesicherung von Dachdeckungen. Die Ermittlung des Windsoges erfolgt in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden Dachform (Sattel-, Trog-, Walm- oder Pultdach) und Dachneigung für verschiedene Dachbereiche (u. a. bspw. Organg, Traufe und First) [19], [20]. Der maßgebende Windsog berechnet sich gemäß Gleichung (7) nach [20]:

$$w_{de} = g_Q \cdot q \cdot c_{pe} \cdot c_{eq} \quad (7)$$

Mit:  $w_{de}$  – Windsog [kN/m<sup>2</sup>]  
 $g_Q$  – Sicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten (DIN EN 1990) = 1,35 [-]  
 $q$  – Geschwindigkeitsdruck, gemäß Gleichung (6) [kN/m<sup>2</sup>]  
 $c_{pe}$  – Außendruckbeiwert [-]  
 $c_{eq}$  – Faktor für Druckausgleich (in Abhängigkeit des Gebäudes und der Deckunterlage, nachfolgend angenommen  $c_{eq} = 1$ ) [-]

Der Außendruckbeiwert wird je nach Dachform, Dachbereich und Dachneigung (DN)  $\alpha$  gemäß nachfolgender Tabelle 9 bestimmt:

Dachbereich	O, G	I	T	F
<b>DN <math>\alpha</math> [°]</b>	Sattel-/Walmdach			
<b>10</b>	-2,1	-0,6	-1,7	-0,8
<b>15</b>	-2	-0,5	-1,5	-1,5
<b>30</b>	-2	-0,5	-1,5	-0,5
<b>45 – 65</b>	-2	-0,5	-0,5	-0,5
	Pulldach			
<b>10</b>	-2,7	-1,2	-1,7	-2
<b>15</b>	-2,9	-1,2	-1,5	-2
<b>30</b>	-2,9	-1,2	-1,5	-1,5
<b>45</b>	-2,4	-1,2	-1,2	-1,2
<b>60</b>	-2	-1,2	-1,2	-1,2
<b>65</b>	-2	-0,5	-0,5	-0,5
	Trogdach (Innengefälle)			
<b>10</b>	-2,5	-1,2	-2	-1,2
<b>15</b>	-2,5	-1,2	-2	-1,2
<b>30</b>	-2,1	-1,2	-1,5	-1,4
<b>45</b>	-2	-1,2	-1,2	-1,5

Tabelle 9: Außendruckbeiwerte, Sog, verschiedene Dachformen, Dachbereiche und Dachneigungen (nach [20])

Die einzelnen Dachbereiche sind in folgender Abbildung 11 am Beispiel eines Sattel- sowie Walmdachs dargestellt:

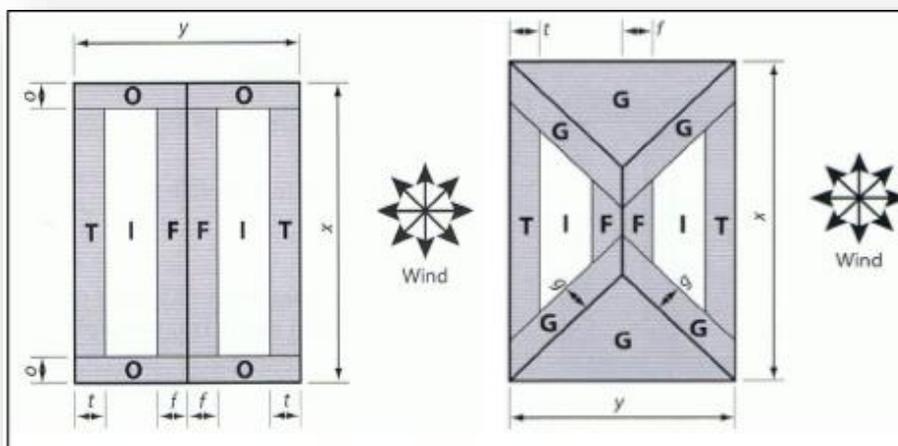


Abbildung 11: Dachbereiche für Sattel- (links) und Walmdach (rechts) gemäß [20]

Für vorliegende Untersuchung wird die weit verbreitete Bauform eines **Sattel- bzw. Walmdachs mit einer Dachneigung von 45° – 65°** angenommen (häufigste Dachart und Dachneigung im Bereich des Flughafens Friedrichshafen, vgl. hierzu auch Kapitel 3). Darüber hinaus wird im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung (minimal erforderliche Abhebekraft) der **Dachbereich I** (Innen, Bereich 2 gemäß Fachregeln [20]) **und somit ein Außendruckbeiwert von -0,5** zugrunde gelegt. Zur Bewertung des Kritikalität des resultierenden Windsoges bedarf es – wie eingangs erläutert – dessen Gegenüberstellung mit den Belastungsgrenzen der Dachdeckung: In [20] wird hierzu der sog. spezifische *Abhebewiderstand durch Eigengewicht*

eingeführt, der sich für die unbefestigte Deckung aus Flächengewicht und Dachneigung ergibt und gemäß nachstehender Gleichung (8) bestimmt wird [20]:

$$R_{d,\alpha,0} = g_{d,\perp} \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

Mit:  $R_{d,\alpha,0}$  – spezifischer Abhebewiderstand durch Eigengewicht der Deckung<sup>14</sup> [kN/m<sup>2</sup>]  
 $g_{d,\perp}$  – Flächengewicht (spezifisches Gewicht pro Fläche) der Dachdeckung [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\alpha$  – Dachneigung [°]

In diesem Zusammenhang wird das Flächengewicht aus Masse und Anzahl der Dachziegel/-steine bestimmt, die zur Deckung pro m<sup>2</sup> benötigt werden. Diese spezifischen Eigenschaften variieren dabei stark hinsichtlich Hersteller und Modell. Für die hierin durchgeführten Berechnungen wird wiederum im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung ein verhältnismäßig geringes spezifisches **Gewicht von 0,3 kN/m<sup>2</sup>** (entsprechend 30 kg/m<sup>2</sup> ohne Lattung) unterstellt. Unter diesen Annahmen resultiert ein **spezifischer Abhebewiderstand durch Eigengewicht von 0,17 kN/m<sup>2</sup>** (entsprechend 17 kg/m<sup>2</sup>)<sup>15</sup>.

Zur Beurteilung der Lagesicherheit der Deckung muss für den angenommenen Dachbereich sichergestellt sein, dass der Abhebewiderstand  $R_{d,\alpha,0}$  mindestens dem Betrag der Bemessungslast des Windsoges  $w_{de}$  entspricht, sodass als **Grenzwert für Gebäudegefährdung** gilt (vgl. [20]):

$$R_{d,\alpha,0} \geq |w_{de}|$$

## 4.5 Grenzwert für Personengefährdung

Im Allgemeinen ist das menschliche Empfinden von Windbewegungen (Böen) individuell und bspw. vom Aktivitätsgrad (Sitzen, Laufen, Rennen etc.) und der Umgebung abhängig, in der sich eine Person aufhält. Zu Beurteilung der Wirkung von Böen auf Personen werden generell zwei wesentliche Kriterien unterschieden: *Windkomfort* und *Windgefahr* [22]. Für beide Kriterien existieren Grenzwerte, die im Wesentlichen auf empirischen Erfahrungen beruhen<sup>16</sup> und sich jeweils aus maximaler Windgeschwindigkeit und deren maximal zulässiger Überschreitungswahrscheinlichkeit (bspw. pro Jahr) ergeben.

Für die vorliegende Bewertung der Personengefährdung wird im Folgenden folgeschlüssig ausschließlich auf das Kriterium *Windgefahr* abgestellt. Demnach bleiben etwaige Komforteinbußen ausgehend von Wirbelschleppen unberücksichtigt, allein deren Gefährdungspotenzial auf sich im Einwirkungsbereich aufhaltende Personen (Fußgänger, Radfahrer etc.) wird erfasst. Der gewählte Grenzwert bezieht sich dabei auf die maximale Geschwindigkeit einer Böen, da es sich bei Wirbelschleppen um kurzzeitige, hochdynamische Windfelder handelt. Zudem sei erwähnt, dass die hier untersuchte Personengefährdung ausschließlich auf die direkte Einwirkung von Wirbelschleppen abstellt. Sekundärgefahren z. B. durch herabfallende Dachelemente oder Geäst finden keine Berücksichtigung, da nicht Untersuchungsgegenstand.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wird für vorliegende Studie der Grenzwert gemäß „*Criteria for Environmental Wind Conditions*“ nach [21] herangezogen. Demnach ist die temporäre Windeinwirkung auf Personen als gefährlich zu bewerten, wenn die jährlich auftretende, maximale **Böengeschwindigkeit 23 m/s** überschreitet. Diese

<sup>14</sup> ohne mechanische Befestigung, bspw. in Form von Klammern, Nägeln oder Schrauben

<sup>15</sup> Die Dachneigung wird hierin als Mittelwert von 45° und 65° = 55° angenommen.

<sup>16</sup> Eine ausführliche Gegenüberstellung der Grenzwerte zur Beurteilung von Windkomfort und -gefahr ist der Publikation „*Pedestrian Wind Comfort Around Buildings: Comparison of Wind Comfort Criteria Based on Whole-Flow Field Data for a Complex Case Study*“ nach [22] zu entnehmen.

Windgeschwindigkeit entspricht Windstärke 9 und damit Sturm auf der Beaufort Skala. Aufgrund der hierbei zu unterstellenden Böigkeit kann dies bewirken, dass Personen umgestoßen werden und sich folglich verletzen. Insofern gilt als **Grenzwert für Personengefährdung** folgende minimale resultierende Tangentialgeschwindigkeit:

$$v_{\text{res}} > 23 \text{ m/s.}$$

## 4.6 Berechnungsmodell

Die Ermittlung der ggf. gefährdenden Auswirkungen von Wirbelschleppen auf Menschen und Gebäude<sup>17</sup> ist Gegenstand der nachfolgend beschriebenen Modellierung.

Die Modellierung der Einzugsgebiete von Wirbelschleppen hinreichender Stärke und daraus folgend der statistischen Gefährdungspotenziale berücksichtigt hierbei ausschließlich die Landephase, da LFZ in der Startphase weniger widerstandsintensiv sind und damit durch geringere Klappenstellung schwächere Wirbel erzeugen. Startende LFZ bewirken weiterhin durch ihr steileres Flugprofil bereits kurz nach dem Start eine methodisch geringere Gefährdung. Es ist zudem festzustellen, dass die Wirbelschleppen beim Start wegen der intensiven Wechselwirkungen mit den starken Schubstrahlen relativ schnell zerstört werden. Belastbare Ausbreitungsmodelle für Wirbelschleppen für startende Luftfahrzeuge sind derzeit noch nicht verfügbar. Die Auswirkungen von startenden LFZ auf das nachfolgend zu ermittelnde Gefährdungspotenzial von Wirbelschleppen werden jedoch als vernachlässigbar gering bewertet.

Die Untersuchungen werden in dem gemäß Kapitel 2.1 festgelegten Untersuchungsraum durchgeführt. Dieser wurde so dimensioniert, dass alle möglichen Gefahrengebiete räumlich erfasst sind.

Es werden gemäß methodischer Erläuterungen Berechnungen zum:

- *Gefährdungspotenzial für Gebäude* mittels Bestimmung eines wirkenden Windsogs unter Berücksichtigung der Verkehrsmenge und des Verkehrsmixes und zum
- *Einzugsgebiet* von Wirbelschleppen für Personengefährdung mittels Bestimmung der maximal resultierenden Windgeschwindigkeit in Bodennähe

durchgeführt.

Im Einzelnen wird die Gefährdung durch eine Wirbelschlepe mittels erläuterter Einflussgrößen (Windfeld um den Flughafen Friedrichshafen, atmosphärische Randbedingungen etc.) an einem Ort (pro Raster der Dimension 50 m x 50 m) im Untersuchungsraum wie folgt bestimmt:

Für jede Rasterzelle erfolgt die Berechnung sequenziell je Landerichtung sowie Luftfahrzeugtyp gemäß DES (vgl. Kapitel 2.3). Des Weiteren wird für alle Anflüge unterstellt, dass sich die LFZ auf den vorgeschriebenen Anflugrouten im Endanflug mit einem Gleitwinkel gemäß AIP [6] bewegen. Interne Analysen von GfL hinsichtlich der Navigationsgenauigkeit von Luftfahrzeugen nach Instrumentenflugregeln im Endanflug zeigen, dass Standardabweichungen von lateral weniger als 20 m und vertikal weniger als 10 m zu verzeichnen sind. Hinsichtlich der atmosphärischen Randbedingungen wird dem konservativen Sicherheitsgedanken folgend eine ruhige, neutral geschichtete Atmosphäre und damit eine maximale Lebensdauer der Wirbelschleppen unterstellt (vgl. Kapitel 4.3.1).

In einem ersten Schritt wird entlang der Flugroute am jeweiligen Wegpunkt die Differenz zwischen Untersuchungshöhe (Immissionsort) und der jeweiligen Überflughöhe des LFZ

<sup>17</sup> Gefährdungen anderer Objekte (z. B. Antennen auf Gebäuden etc.) werden nicht untersucht.

(Emissionsort) bestimmt. Sodann erfolgt die Bestimmung der Anfangszirkulation je Luftfahrzeugmuster sowie die zugehörige Sinkgeschwindigkeit. Nachfolgend erfolgt die Ermittlung der Zirkulation  $\Gamma_{5-15}$  und hieraus folgend der resultierenden Tangentialgeschwindigkeit. Hierbei wird geprüft, ob sich die Wirbelschleppe bereits im Bodeneffekt befindet bzw. die Wirbelkerne auf ihre minimale Absinkhöhe abgesunken sind. Zudem werden die Sekundärwirbel bedingt durch den Wiederaufstieg in Ihrer Position und Wirbelstärke berücksichtigt. Im Ergebnis wird die Summe der durch die Wirbelschleppe *induzierten* Windgeschwindigkeit ermittelt.

Die laterale und vertikale Position der Wirbelschleppe (Verdriften der Wirbelschleppe) wird nunmehr unter Berücksichtigung des Umgebungswindes gemäß Kapitel 2.4 ermittelt. Zudem erfolgt die Ermittlung der *resultierenden* Windgeschwindigkeit einer Wirbelschleppe unter Beachtung des Umgebungswindes. Im Hinblick auf die Gebäudegefährdung erfolgt weiterführend die Berechnung des Windsogs auf Basis der ermittelten *resultierenden* Windgeschwindigkeit. Der ermittelte Windsog wird dem festgelegten Grenzwert gemäß Kapitel 4.4 gegenübergestellt. Soweit eine Überschreitung des Grenzwertes erkannt wird, erfolgen die weiteren folgenden Berechnungsschritte.

Die Berechnung des Gefährdungspotenzials beruht auf meteorologischen Daten des DWD gemäß Kapitel 2.4. Es wird somit jene Wahrscheinlichkeit ermittelt, mit der eine Windstärke vorherrscht, die die Wirbelschleppe seitwärts über eine vorgegebene Entfernung ausgehend vom Immissionsort zur Anfluggrundlinie fortbewegen kann (in Abhängigkeit von der Querentfernung – für jede Rasterzelle). Zur Ermittlung des Gefährdungspotenzials für Gebäude je Raster erfolgt andererseits die Produktbildung der o.g. Wahrscheinlichkeit mit der Anzahl an Flugbewegungen pro Jahr, summiert über alle Luftfahrzeugtypen.

Für die Ermittlung der Einzugsgebiete von Wirbelschleppen für Personengefährdung wird die *resultierende* Windgeschwindigkeit genutzt. Diese wird dem festgelegten Grenzwert nach Kapitel 4.5 gegenübergestellt. Soweit eine Überschreitung des Grenzwertes festzustellen ist, wird als Superposition über alle Luftfahrzeugtypen der Maximalwert je Rasterzelle ermittelt.

Eingangsparameter der Berechnung sind:

- Geografische Koordinaten (FBP und Schwellenkoordinaten, vgl. Kapitel 2.2),
- Verkehrszahlen (Landungen) im DES-Format (vgl. Kapitel 2.3),
- Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Flughafen Friedrichshafen (vgl. Kapitel 2.4),
- LFZ-Parameter gemäß Kapitel 4.3.3 und
- Umgebungsparameter gemäß Kapitel 4.3.3.

## 5 Berechnung der Einzugsgebiete und Zonen der Gefährdungspotenziale von Wirbelschleppen

### 5.1 Berechnungsverfahren

Die Untersuchungen zur Ermittlung des Gefährdungspotenzials für Gebäude wurden für die lokalen Untersuchungshöhen 10 m, 25 m sowie 50 m als typisches Bauhöhenpektrum bezogen auf den FBP durchgeführt (vgl. Kapitel 4.6). Für die Einzugsgebiete von Wirbelschleppen in Bezug auf Personengefährdung wurden Berechnungen in 2 m und 5 m Untersuchungshöhe durchgeführt.

Die Untersuchungshöhe von 25 m wird hinsichtlich der Gebäudegefährdung (Ablösen der Dachdeckung) als die relevante Untersuchungshöhe angesehen, da Wohngebäude, die in der Regel eine Dachziegeldeckung aufweisen, maximal entsprechende Gebäudehöhen aufweisen. Dementsprechend wird aus Gründen der Übersichtlichkeit bei den folgenden grafischen Darstellungen nur diese Untersuchungshöhe ausgewiesen. Die Ergebnisse der Untersuchungen für 10 m sowie 50 m werden ergänzend tabellarisch dargestellt (vgl. Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3).

### 5.2 Szenario Ist-Situation 2012

#### 5.2.1 Analysen zur Gebäudegefährdung

Nachfolgende Abbildung 12 zeigt die Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude in 25 m Höhe auf Basis des Verkehrsaufkommens sowie des Verkehrsmixes des Bezugsjahres 2012. Sie zeigen jene Gebiete, in denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hinreichend starker Wirbelschleppen je Rasterzelle unter der Bedingung des festgelegten Windsog Grenzwertes gemäß Kapitel 4.4 zu erwarten ist. Die höchsten Gefährdungspotenziale sind in unmittelbarer Nähe der Anfluggrundlinien zu verzeichnen. Zudem wird ersichtlich, dass in Anflugrichtung 24 aufgrund der höheren Verkehrslast auf der Bahn 24 auch höhere Erwartungswerte pro Jahr zu verzeichnen sind.

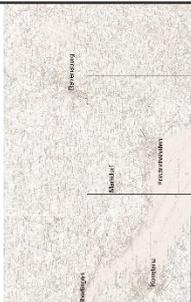
Es ist ersichtlich, dass aufgrund der vorherrschenden Umgebungsbedingungen (hier vornehmlich Seitenwind) als auch der gegebenen Routenstruktur (gekrümmte Anflugrouten) sowie des Ausbreitungsverhaltens der Wirbelschleppen im Bodeneffekt keine symmetrische Ausprägung der Zonen vorliegt. Weiterhin zeigt sich, dass die Zonen des Gefährdungspotenzials nahezu vollständig die bisher gemeldeten Schadensfälle gemäß [11] abdecken, somit eine soweit gute Übereinstimmung mit den empirischen Vorkommnissen gegeben ist. Für alle hier untersuchten Höhen zeigt sich, dass für beide Anflugrichtungen bewohnte Gebiete betroffen sind.

Gemäß nachfolgender Tabelle 10 wird ersichtlich, dass mit zunehmender Höhe eine Vergrößerung der Zonen des Gefährdungspotenzials eintritt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in 10 m sowie 25 m Höhe vereinzelt Wirbelschleppen bereits im Bodeneffekt befinden. Zudem ist mit zunehmender Höhe bedingt durch die Höhenwindanpassung (vgl. Kapitel 2.4) ein größerer seitlicher Drift der Wirbelschleppen zu erwarten.

Untersuchungshöhe	10 m	25 m	50 m
Fläche [km <sup>2</sup> ]	9,5	10,6	11,8
Max. Einzelwert des Gefährdungspotenzials [pro Jahr]	1,156	0,962	0,976
Max. Erwartungswert des Gefährdungspotenzials [Jahren]	0,87	1,04	1,02

Tabelle 10: Ergebnisse der Gefährdungsanalyse Szenario Ist-Situation 2012

Die Maximalwerte des Gefährdungspotenzials in einer Rasterzelle sowie deren Erwartungswerte sind in Tabelle 10 ausgewiesen und liegen in unmittelbarer Schwellennähe. Mit zunehmender Entfernung sowohl von der Schwelle als auch der Anfluggrundlinie werden die Gefährdungspotenziale kleiner. Die Maximalwerte für die der Schwelle am nächsten liegende Bebauung sind für die Landebahn 06 mit einem Erwartungswert von ca. 11,4 Jahren und Landebahn 24 mit einem Erwartungswert von ca. 6,9 Jahren ermittelt worden.

<p><b>Gefährdungspotenzial</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 10<sup>-4</sup></li> <li>10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-3</sup></li> <li>10<sup>-3</sup> bis 10<sup>-2</sup></li> <li>10<sup>-2</sup> bis 10<sup>-1</sup></li> <li>10<sup>-1</sup> bis 10<sup>0</sup></li> <li>10<sup>0</sup> bis 10<sup>1</sup></li> <li>10<sup>1</sup> bis 10<sup>2</sup></li> <li>10<sup>2</sup> bis 10<sup>3</sup></li> <li>10<sup>3</sup> bis 10<sup>4</sup></li> <li>&gt; 10<sup>4</sup></li> </ul> <p> <span style="color: blue;">—</span> Aufzugseile (88294)  <span style="color: black;">—</span> Start- und Landebahn                 </p>		<p><b>Übersicht</b></p> 
<p><b>Projekt</b> Neubegutachtung der Gefahren durch Wirbelschleppen am Flughafen Friedrichshafen</p>		
<p><b>Plan</b> Zonen des Gefährdungspotenzials von Wirbelschleppen</p>		
<p><b>Planvorhaben</b> Szenario Ist-Situation 2012 Untersuchungshöhe 25 m</p>		
<p><b>Plan-Nr.</b> Kartengrundlage: DTN50 Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, Baden-Württemberg Projektion: UTM Zone 32, Ellipsoid: GRS80, Datum: ETRS89</p>		
<p><b>Format</b> bearbeitet: 16.07.2014 geprüft: 16.07.2014</p>		
		
<p><b>Auftraggeber</b> Flughafen Friedrichshafen GmbH</p>		
<p><b>Gliederungs-Nr.</b></p>		

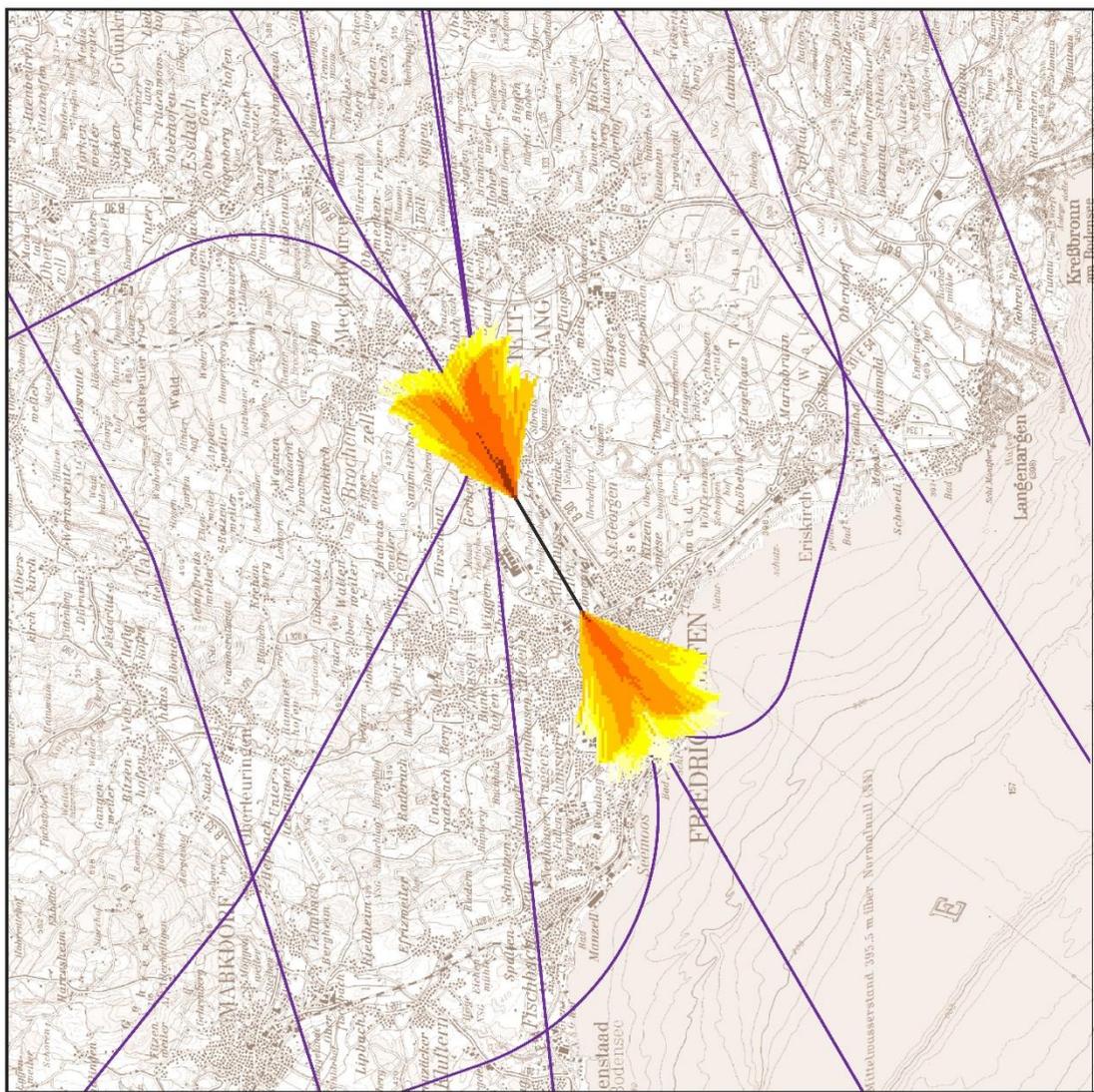


Abbildung 12: Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude, Untersuchungshöhe 25 m, Szenario Ist-Situation 2012

## 5.2.2 Analysen zur Personengefährdung

Nachfolgende Abbildung 13 zeigt die ermittelten Einzugsgebiete von Wirbelschleppen, in denen Überschreitungen des Grenzwertes für Personengefährdung (vgl. Kapitel 4.5) auf Basis des Verkehrsaufkommens sowie des Verkehrsmixes des Bezugsjahres 2012 zu verzeichnen sind.

Im Ergebnis der Untersuchungen ist festzustellen, dass in einer Untersuchungshöhe von 2 m (Bezug FBP) keine bewohnten Gebiete betroffen sind, in 5 m Untersuchungshöhe sind unter Berücksichtigung der Topografie (vgl. Abbildung 1) in beiden Anflugrichtungen bewohnte Gebiete (und demnach sich dort aufhaltende Personen) betroffen. Gemäß Kapitel 4.5 kann die hier ermittelte Böen-Windgeschwindigkeit bewirken, dass Personen u. U. umgestoßen werden können.

Die Überschreitungen der Grenzgeschwindigkeit werden hier vornehmlich vom LFZ-Muster *Boeing 757* verursacht, das jedoch selten in Friedrichshafen<sup>18</sup> operiert. Weiterhin wird darin erinnert, dass gemäß Kapitel 4.1 konservativ eine ruhige, neutral geschichtete Atmosphäre unterstellt wurde. Die Maximalwerte für die der Schwelle am nächsten liegende Bebauung sind für die Landebahn 06 mit einer Böen-Windgeschwindigkeit von ca. 36,5 m/s und Landebahn 24 mit einer Böen-Windgeschwindigkeit von ca. 35 m/s ermittelt worden.

Es ist unbenommen zu prüfen, ob sich Personen in dieser Höhe innerhalb der ausgewiesenen Zonen gemäß Abbildung 13 grundsätzlich ungeschützt aufhalten können.

---

<sup>18</sup> Anteil von 0,5 % an der Kategorie S5.2

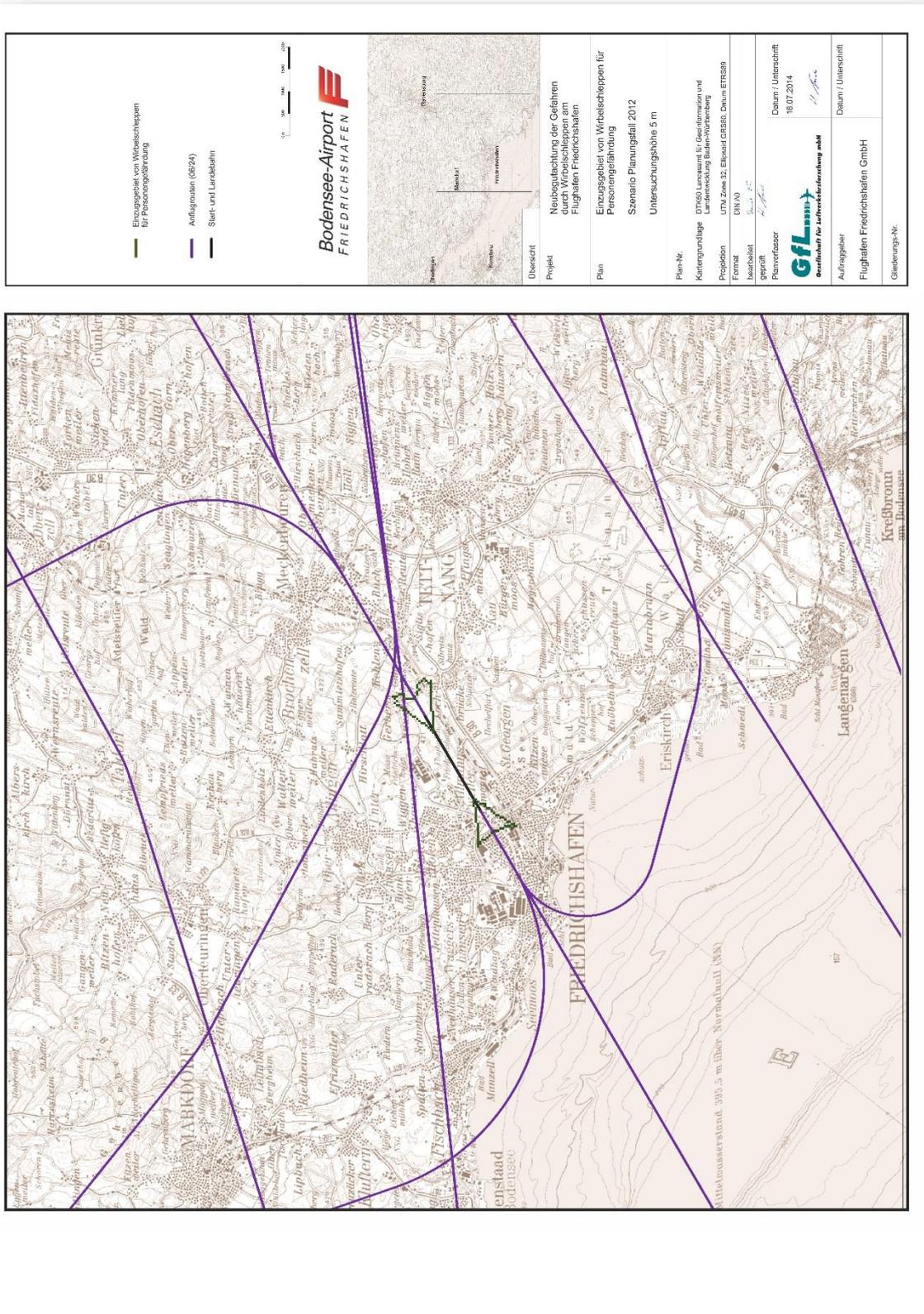


Abbildung 13: Einzugsgebiet von Wirbelschleppen für Personengefährdung Untersuchungshöhe 5 m, Szenario Ist-Situation 2012

## 5.3 Szenario Planungsfall 2020

### 5.3.1 Analysen zur Gebäudegefährdung

Nachfolgende Abbildung 14 zeigt die Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude auf Basis des Verkehrsaufkommens sowie des Verkehrsmixes nun des Prognosejahres 2020. Sie liefert erneut die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten hinreichend starker Wirbelschleppen je Rasterzelle unter der Bedingung des festgelegten Windsog Grenzwertes gemäß Kapitel 4.4. Erneut liegen die maximalen Gefährdungspotenziale in unmittelbarer Nähe der Anfluggrundlinien, speziell Landerichtung 24.

Analog zum Szenario Ist-Situation 2012 (vgl. Kapitel 5.2.1) wird ersichtlich, dass aufgrund der vorherrschenden Umgebungsbedingungen (hier vornehmlich Seitenwind) als auch als unverändert unterstellten Routenstruktur (gekrümmte Anflugrouten) sowie des Ausbreitungsverhaltens der Wirbelschleppen im Bodeneffekt keine symmetrische Kontur resultiert<sup>19</sup>. Für alle hier untersuchten Höhen ist zudem festzustellen, dass für beide Anflugrichtungen bewohnte Gebiete betroffen sind.

Ebenfalls wird gemäß nachfolgender Tabelle 11 ersichtlich, dass mit zunehmender Höhe eine Vergrößerung der Zonen des Gefährdungspotenzials zu verzeichnen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in 10 m sowie 25 m Höhe vereinzelt Wirbelschleppen bereits im Bodeneffekt befinden. Zudem ist mit zunehmender Höhe bedingt durch die Höhenwindanpassung (vgl. Kapitel 2.4) ein größerer seitlicher Drift der Wirbelschleppen zu erwarten.

Untersuchungshöhe	10 m	25 m	50 m
Fläche [km <sup>2</sup> ]	9,5	10,6	11,7
Max. Einzelwert des Gefährdungspotenzial [pro Jahr]	1,638	1,376	1,379
Max. Erwartungswert des Gefährdungspotenzial [Jahren]	0,61	0,73	0,72

Tabelle 11: Ergebnisse der Gefährdungsanalyse Szenario Planungsfall 2020

Die Maximalwerte des Gefährdungspotenzials in einer Rasterzelle als auch die Erwartungswerte sind in Tabelle 11 ausgewiesen und liegen hier in unmittelbarer Schwellennähe. Mit zunehmender Entfernung zur Schwelle als auch zur Anfluggrundlinie werden die Gefährdungspotenziale kleiner. Die Maximalwerte für die der Schwelle am nächsten liegende Bebauung sind für die Landebahn 06 mit einem Erwartungswert von ca. 7,1 Jahren und Landebahn 24 mit einem Erwartungswert von ca. 3,5 Jahren ermittelt worden.

<sup>19</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass eine lineare Extrapolation der Flächengröße mit dem Verkehrsaufkommen nicht zulässig ist. Veränderte Randbedingungen (hier auch das Verkehrsaufkommen) bedingen grundsätzlich eine nochmalige vollständige Berechnung der Gefährdungspotenziale.

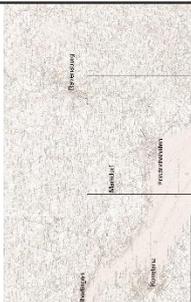
<p><b>Gefährdungspotenzial</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 10<sup>-4</sup></li> <li>10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-2</sup></li> <li>10<sup>-3</sup> bis 10<sup>-1</sup></li> <li>10<sup>-2</sup> bis 10<sup>0</sup></li> <li>10<sup>-1</sup> bis 10<sup>1</sup></li> <li>10<sup>0</sup> bis 10<sup>2</sup></li> <li>10<sup>1</sup> bis 10<sup>3</sup></li> <li>10<sup>2</sup> bis 10<sup>4</sup></li> <li>&gt; 10<sup>4</sup></li> </ul> <p> <span style="color: blue;">—</span> Aufzugseile (88294)  <span style="color: black;">—</span> Stadt- und Landbahn                 </p>		<p><b>Übersicht</b></p> 
<p><b>Projekt</b> Neubegutachtung der Gefahren durch Wirbelschleppen am Flughafen Friedrichshafen</p>		
<p><b>Plan</b> Zonen des Gefährdungspotenzials von Wirbelschleppen</p>		
<p><b>Planvorfall</b> Szenario Planungsfall 2020</p>		
<p><b>Untersuchungshöhe</b> 25 m</p>		
<p><b>Plan-Nr.</b> DTM50 Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg</p>		
<p><b>Projektion</b> UTM Zone 32, Ellipsoid GRS80, Datum ETRS89</p>		
<p><b>Format</b> DIN A3</p>		
<p><b>bearbeitet</b> 18.07.2014</p>		
<p><b>geprüft</b> 18.07.2014</p>		
<p><b>Planverfasser</b> GfL</p>		
<p><b>Datum / Unterschift</b> 18.07.2014</p>		
<p><b>Auftraggeber</b> Flughafen Friedrichshafen GmbH</p>		
<p><b>Gliederungs-Nr.</b></p>		



Abbildung 14: Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude, Untersuchungshöhe 25 m, Szenario Planungsfall 2020

### 5.3.2 Analysen zur Personengefährdung

Nachfolgende Abbildung 15 zeigt die ermittelten Einzugsgebiete von Wirbelschleppen, in denen Überschreitungen des Grenzwertes für Personengefährdung (vgl. Kapitel 4.5) auf Basis des Verkehrsaufkommens sowie des Verkehrsmixes des Bezugsjahres 2020 zu verzeichnen sind.

Im Ergebnis der Untersuchungen ist analog zum Szenario Ist-Situation 2012 (vgl. Kapitel 5.2.2) festzustellen, dass in einer Untersuchungshöhe von 2 m (Bezug FBP) keine bewohnten Gebiete betroffen sind, in 5 m Untersuchungshöhe sind unter Berücksichtigung der Topografie (vgl. Abbildung 1) in beiden Anflugrichtungen bewohnte Gebiete betroffen. Gemäß Kapitel 4.5 kann die hier ermittelte Böen Windgeschwindigkeit bewirken, dass Personen u. U. umgestoßen werden können.

Die Überschreitungen der Grenzgeschwindigkeit werden hier analog zum Szenario Ist-Situation 2012 (vgl. Kapitel 5.2.2) vornehmlich vom LFZ *Boeing 757* verursacht, das jedoch selten operiert. Weiterhin ist festzustellen, dass gemäß Kapitel 4.1 ein Worst-Case-Ansatz unter Annahme ruhiger, neutral geschichteter Atmosphäre gewählt wurde, der durchaus eine Überschätzung der Einzugsgebiete darstellt. Es ist zudem zu prüfen, ob sich Personen in der hier relevanten Höhe in den ausgewiesenen Zonen gemäß Abbildung 15 im Freien aufhalten können.

Die Maximalwerte für die der Schwelle am nächsten liegende Bebauung sind analog zum Szenario Ist-Situation 2012 (aufgrund der identischen Flugrouten und LFZ Muster) für die Landebahn 06 mit einer Böen-Windgeschwindigkeit von ca. 36,5 m/s und Landebahn 24 mit einer Böen-Windgeschwindigkeit von ca. 35 m/s ermittelt worden.

<p>  Einzugsgebiet von Wirbelschleppen für Personengefährdung   Aufzugspuren (08/204)   Start- und Landebahn                 </p>	  
<p><b>Übersicht</b>                  Projekt: Neubegutachtung der Gefahren durch Wirbelschleppen am Flughafen Friedrichshafen                  Plan: Einzugsgebiet von Wirbelschleppen für Personengefährdung                  Szenario: Planungsfall 2020                  Untersuchungshöhe: 5 m</p>	
<p><b>Plan-Nr.:</b> Kartengrundlage: DTN50 Luftverantw. für Geoinformation und Luftvermessung, Baden-Württemberg                  Projektion: UTM Zone 32, Ellipsoid: GRS80, Datum: ETRS89                  Format: DIN A3                  bearbeitet: 2014, 07, 16                  geprüft: 2014, 07, 16                  Planverfasser: GfL                  Datum / Unterschrift: 16.07.2014  <b>GfL</b>                  Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH                  Auftraggeber: Flughafen Friedrichshafen GmbH                  Datum / Unterschrift:                  Gliederungs-Nr.:</p>	

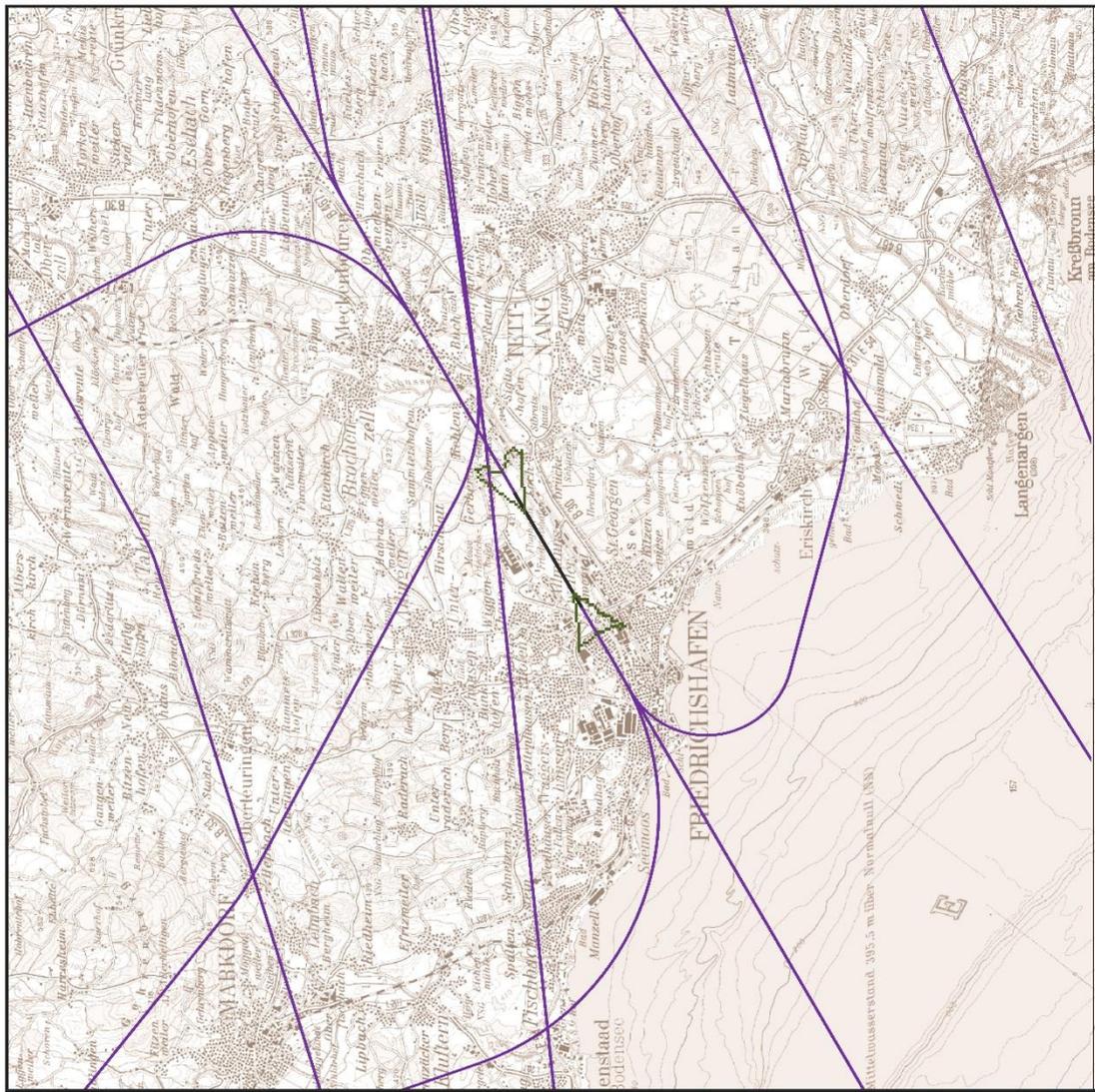


Abbildung 15: Einzugsgebiet von Wirbelschleppen für Personengefährdung  
 Untersuchungshöhe 5 m, Szenario Planungsfall 2020



## 6 Bewertung der Ergebnisse

### 6.1 Analyse der Berechnungsergebnisse

Gemäß Kapitel 5 wurden die Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude sowie die Einzugsgebiete von Wirbelschleppen für Personengefährdung ermittelt und in einer Plandarstellung ausgewiesen.

Die Ergebnisse zeigen hinsichtlich der Gebäudegefährdung in den Untersuchungshöhen 10 m und 25 m für beide Szenarien Ist-Situation 2012/Planungsfall 2020 und jeweils beide Anflugrichtungen Betroffenheit in bewohnten Gebieten (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 14). Nachfolgend werden demnach bereits bestehende Vorsorgemaßnahmen analysiert und die erforderliche Anpassung des Wirbelschleppen-Vorsorgegebietes erarbeitet (vgl. Kapitel 6.2).

Die Maximalwerte der *resultierenden* Windgeschwindigkeit wurden für die Untersuchungshöhe von 25 m im Bereich der Anfluggrundlinie auf Höhe der Schwelle in der nächstgelegenen Rasterzelle mit ca. 37 m/s bestimmt. In diesem Gebiet gibt es aber keine Betroffenheit aufgrund fehlender Bebauung. Der höchste Wert mit Betroffenheit liegt bei ca. 36,5 m/s.

Eine Personengefährdung unmittelbar am Boden (Untersuchungshöhe 2 m in Bezug zum FBP) kann hingegen nicht erkannt werden. In 5 m Höhe liegt hingegen Betroffenheit unter Berücksichtigung der Topografie (vgl. Abbildung 1) in beiden Anflugrichtungen vereinzelt vor (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 15). Die hier errechnete maximale Böen-Windgeschwindigkeit kann zum Stürzen von Personen führen. Nachfolgende Untersuchungen zu Risikominderungsmaßnahmen für Beschäftigte berücksichtigen infolge Szenarien, in denen Personen sich in derartigen Höhen zu Wartungsarbeiten im Freien aufhalten (vgl. Kapitel 6.3, hier Arbeitsschutzrichtlinien).

Insgesamt bestätigen somit die Untersuchungen, dass die aktuellen, nachfolgend rekapitulierten Regelungen zur Prävention der Gefahren für Gebäude durch Wirbelschleppen am Flughafen FDH nicht hinreichend sind und Handlungsbedarf in Form der Anpassung der Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete gegeben ist. Hierzu führt der nachfolgende Abschnitt aus.

### 6.2 Anpassung der Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete

Am Flughafen Friedrichshafen sind aufgrund der Genehmigung mit Änderung vom 1. März 1996 sog. Wirbelschleppen-Vorsorgemaßnahmen festgeschrieben<sup>20</sup> (vgl. Kapitel 3). Seitens des Flughafens wurden zudem CAD-Planungsunterlagen bereitgestellt, in denen weiterführend sog. *Vorsorgegebiete*, als auch *Überprüfungsgebiete* verzeichnet sind [29]. Es zeigt sich, dass die derzeit festgelegten *Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete* gestützt auf die vorliegenden Berechnungsergebnisse gemäß Kapitel 5 zu klein dimensioniert sind, da vermehrt Wirbelschleppenvorfälle auch außerhalb dieser Gebiete zu verzeichnen waren (vgl. Kapitel 3). Zudem folgt die grundsätzliche Geometrie dieser Gebiete nicht den Ausbreitungscharakteristika der Wirbelschleppen. Demnach wird eine Anpassung dieser Gebiete empfohlen. Die in den Gebieten vorgesehenen Wirbelschleppen-Vorsorgemaßnahmen werden als ausreichend bewertet auch im Hinblick auf die bereits erfolgten Klammerungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 3).

Grundsätzlich ist festzustellen, dass für die Gefährdung durch Wirbelschleppen national und auch international keine Grenzwerte existieren. Im Rahmen des in 2006 im Planfeststellungsverfahren zum Ausbau des Flughafens Frankfurt/Main (4. Bahn) durch GfL

<sup>20</sup> Die derzeit ausgewiesenen Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete sind dem Anhang A1 und A2 zu entnehmen.

erstellten Gutachtens [9] wurden umfangreiche Recherchen zu Wirbelschleppenvorfällen in Unfalldatenbanken durchgeführt. Aussagen der durch Wirbelschleppen hervorgerufenen Vorfälle/Unfälle ließen sich hierbei nachweisen [9]. Eine weiterführende Recherche der hier relevanten durch Wirbelschleppen hervorgerufenen Schäden an Gebäuden bzw. Personen führten jedoch zu keinem Ergebnis. Die Analysen lieferten zu diesem Aspekt keine verlässlichen Daten.

Im Regelfall ist bedingt durch das Schadensbild bei Wirbelschleppenschäden (vgl. Kapitel 4.4) zu erwarten, das durch möglicherweise herabfallende Dachziegel eine Verletzungsgefahr für Personen nicht auszuschließen ist<sup>21</sup>. Aus Gutachtersicht wird demzufolge ein durch Wirbelschleppen generiertes Gefährdungspotenzial, d.h. Verletzungswahrscheinlichkeit pro Individuum im Bereich von  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$  pro Jahr als akzeptabel angesehen. Dies würde jedoch unterstellen, dass bei jedem Wirbelschleppenvorfall herabfallende Dachziegel zu verzeichnen wären, was sicher eine signifikante Überschätzung darstellt.

Die o.g. Feststellung beruht insbesondere auf Erfahrungen der GfL aus dem Bereich der Modellierung zum Externen Risiko. Hier stehen derzeit international Akzeptanzwerte für das Individuelle Risiko im Bereich von  $10^{-5}$  pro Jahr im Fokus, wenn auch für Deutschland bisher kein gesetzlicher Wert existiert [34]. Es handelt sich hierbei jedoch per Definition um die Wahrscheinlichkeit, als Individuum an den Folgen eines Flugzeugabsturzes zu Tode zu kommen. Das vermutete Schadensausmaß ist demnach ungleich höher als das hier bei Wirbelschleppenvorfällen zu erwartende Verletzungsrisiko, so dass eine Steigerung der tolerierbaren Eintrittswahrscheinlichkeit um 1 bis 2 Zehnerpotenzen gegenüber dem o. g. Individuellen Risiko Grenzwert hinnehmbar erscheint.

Folgt man dem Ansatz, dass die o.g. Akzeptanzschwelle hinsichtlich der Verletzungswahrscheinlichkeit sicher eine Überschätzung darstellt, so sollten die Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete zumindest so dimensioniert sein, dass die Zonen, in denen Wirbelschleppenschäden zu verzeichnen waren möglichst abgedeckt sind.

Die Anpassung der Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete folgt nunmehr dem Ansatz, dass Vorsorgemaßnahmen gemäß den Vorgaben aus Kapitel 3 umzusetzen sind, wenn eine maximale Eintrittshäufigkeit von **einer Wirbelschleppe mit Überschreitung des Windsog Grenzwertes in 100 Jahren** (Erwartungswert =  $1 \times 10^{-2}$ , basierend auf den Auswertungen gemäß Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.3.1) unterschritten wird. **Es gilt hier zudem der Ansatz, dass bisherige Zonen abgedeckt und bestehende Gebiete nicht verkleinert werden. Zudem sind alle Wirbelschleppenvorfälle der letzten 5 Jahre abgedeckt<sup>22</sup>.**

Die Zonen weisen hierbei bedingt durch die unterschiedliche Bahnbelegung je Landerichtung abweichende Ausdehnungen auf.

Die modifizierten *Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete* wurden auf Basis der Gefährdungspotenziale des Szenarios Planungsfall 2020 (Untersuchungshöhe 25 m) mittels Eingrenzung der o.g. maximalen Eintrittshäufigkeit bestimmt und mit den vom AG bereitgestellten CAD-Plandateien überlagert. Auf Basis dieser Plangrundlage erfolgte die straßenbezogene Festlegung dieser Gebiete. Hierbei wurde der Prämisse gefolgt, dass Gebäude/Flurstücke, die mehrheitlich innerhalb der Gebiete verortet sind, vollständig aufgenommen wurden.

Nachfolgende Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen als Überblick die modifizierten Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete je Landebahn<sup>23</sup>. Die modifizierten Wirbelschleppen-

<sup>21</sup> Verletzungen mit Todesfolge lassen sich hierbei nicht gänzlich ausschließen, sind jedoch sehr unwahrscheinlich.

<sup>22</sup> Dies beinhaltet auch die am 01.09 und 02.09.2014 gemeldeten Wirbelschleppenvorfälle im Stadtgebiet von Friedrichshafen.

<sup>23</sup> Die schraffierten Flächen zeigen die aktuellen Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete gemäß [29].

Vorsorgegebiete wurden zudem in den vom AG bereitgestellten CAD-Plandateien gemäß [29] verzeichnet und sind dem Gutachten beigegefügt. Die detaillierte straßenbezogene Festlegung ist demnach diesen aktualisierten CAD Plänen zu entnehmen.

Im Ergebnis zeigt sich eine stark veränderte Ausprägung der modifizierten Gebiete im Vergleich zu den 1996 festgelegten *Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten*. Dies resultiert daher, dass die Verkehrsverteilung auf die Bahnen 06 und 24 in den Berechnungen explizit berücksichtigt wurde. Aufgrund der weitaus höheren Belegung der Bahn 24 (ca. 82 % der Landungen in EDNY) ist eine deutliche Vergrößerung dieses Gebietes festzustellen.

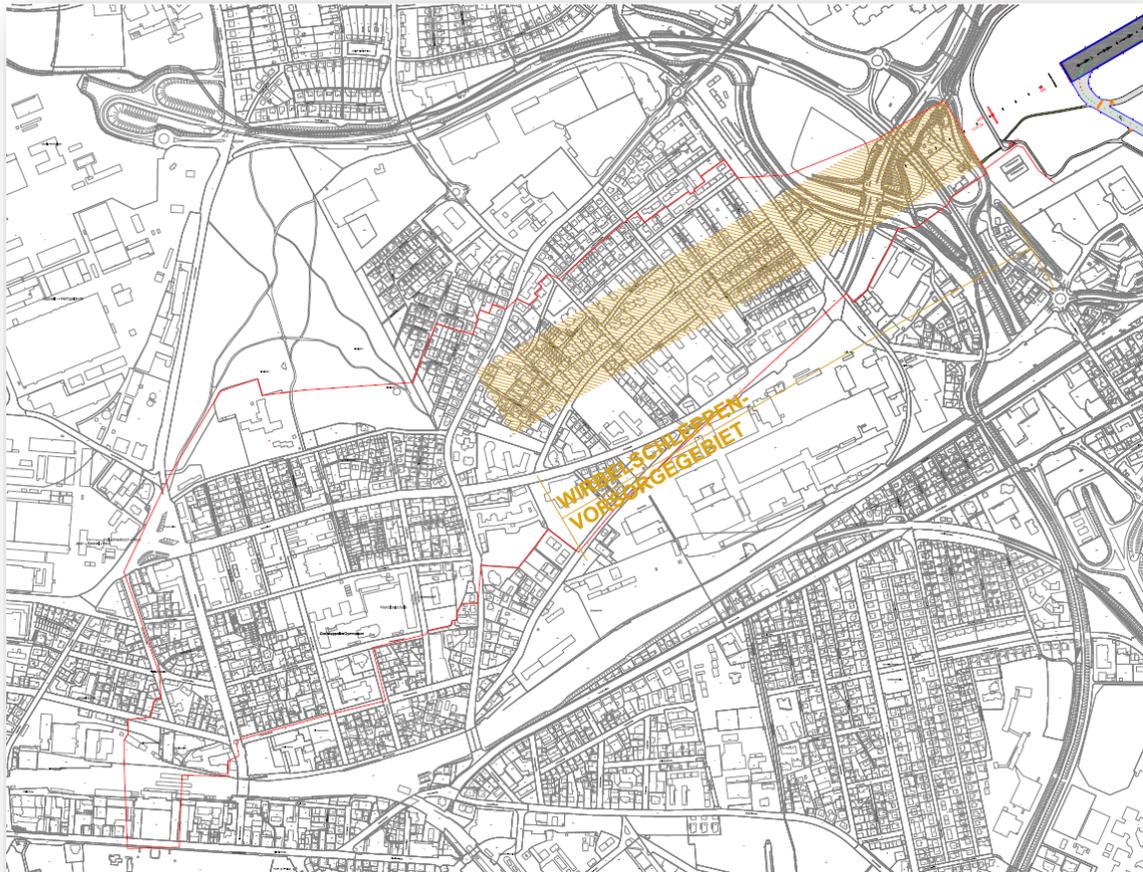


Abbildung 16: modifiziertes Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet für die Landebahn 06<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Die schraffierten Flächen zeigen die aktuellen Wirbelschleppen-Vorsorgegebiete gemäß [29].

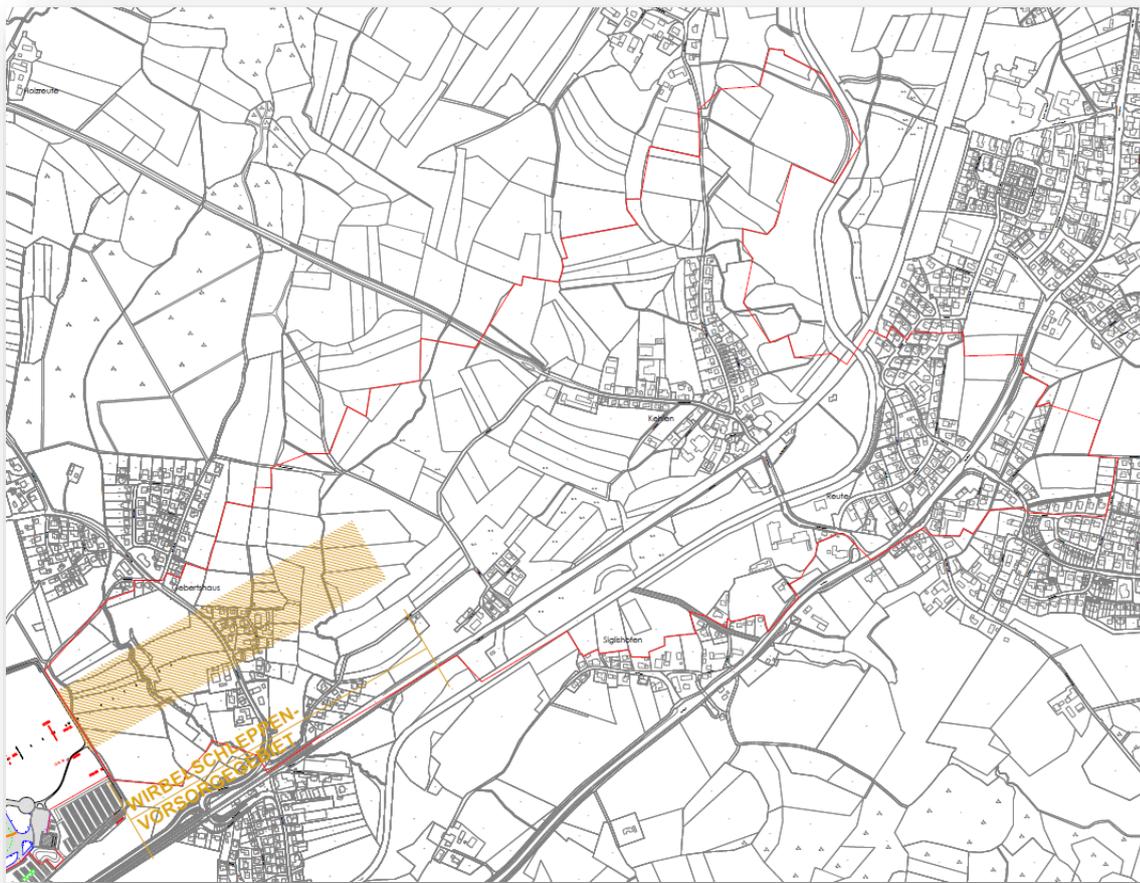


Abbildung 17: modifiziertes Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet für die Landebahn 24<sup>24</sup>

Zusätzlich zu den Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten wurden vom AG ebenfalls *Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete* festgelegt (vgl. Kapitel 3). Auch für dieses Gebiet wird eine Anpassung empfohlen, da die grundsätzliche Geometrie dieser Gebiete nicht den Ausbreitungscharakteristika der Wirbelschleppen entspricht.

Zugrunde gelegt wird hier analog zu den *Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten* eine maximal zulässige Eintrittshäufigkeit von einer Wirbelschleppe mit Überschreitung des Windsog Grenzwertes in 100 Jahren. Prämisse ist hier, dass in dieser Zone nahezu alle bisher verzeichneten Wirbelschleppenschäden verortet sind. In Landerichtung 24 wurde diese Zone im Endbereich demnach an das gemäß [29] verzeichnete Überprüfungsgebiet angepasst, sodass innerhalb dieser Zone nunmehr bis auf einen Vorfall alle bisher verzeichneten Wirbelschleppenschäden verortet sind. Das modifizierte *Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiet* ist nachfolgender Abbildung 18 zu entnehmen.

Es wird weiterführend empfohlen zu prüfen, ob die bereits angewandte Methode der nachweislich durch den Flughafen EDNY angewiesenen Prüfung gemeldeter Wirbelschleppenvorfälle vor Ort ausreichend ist und die Festlegung eines *Wirbelschleppen-Überprüfungsgebietes* demnach zukünftig entbehrlich wird.

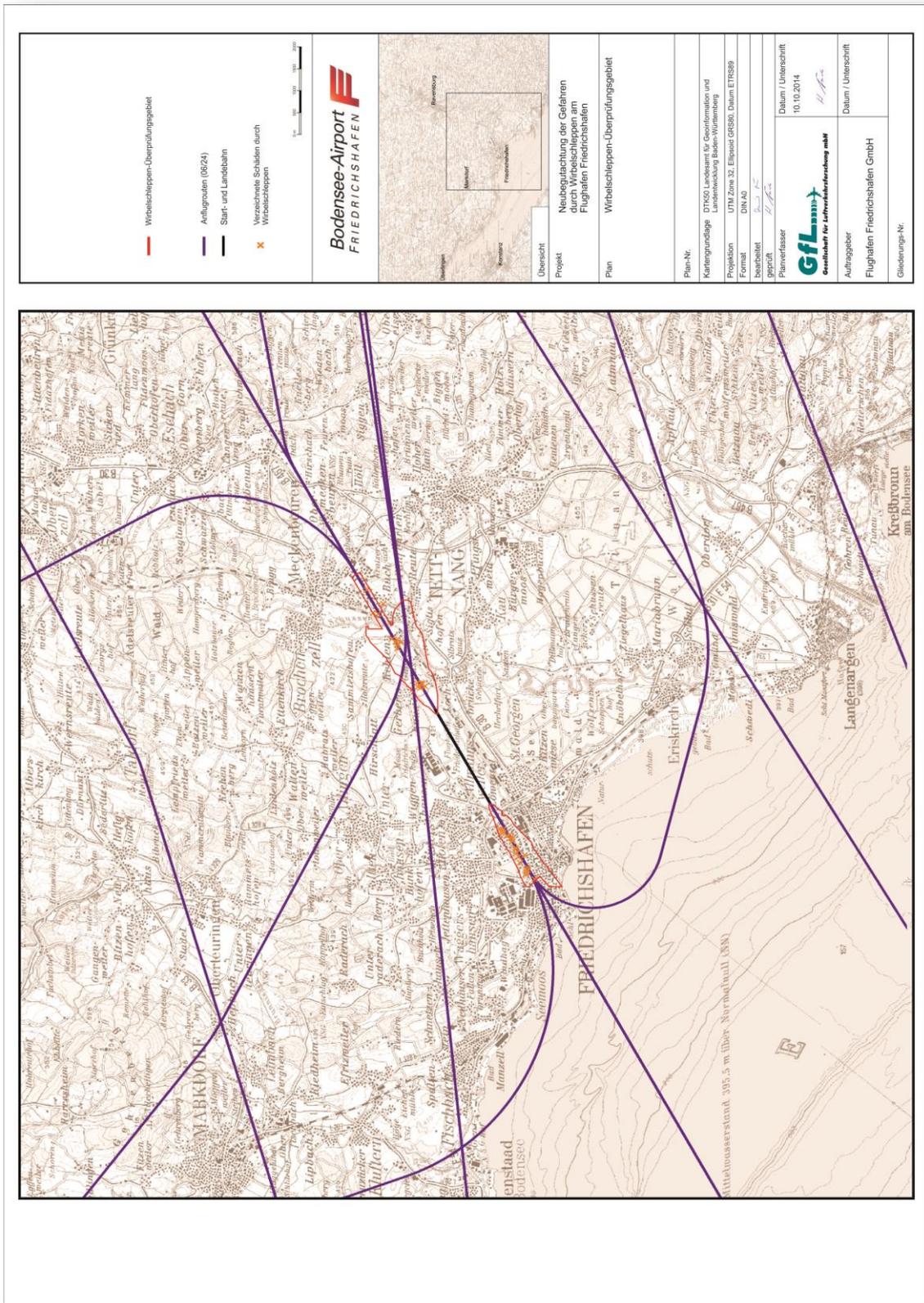


Abbildung 18: modifizierte Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete

### 6.3 Risikominderungsempfehlungen bzgl. Vorsorgemaßnahmen von beruflich im Freien tätigen Personen

Gemäß Kapitel 6.1 zeigt sich, dass hinsichtlich der Personengefährdung durch Wirbelschleppen vereinzelt auch bewohnte Gebiete betroffen sind. Im Folgenden wird nach Verfahrensweisen recherchiert, die als mögliche Präventivmaßnahmen zum Schutz des Menschen vor Wirbelschleppen dienen können. Insbesondere für Personen, die sich zu gewerblichen Wartungsarbeiten in größeren Höhen im Freien aufhalten, ist dies aufgrund der vorliegenden Ergebnisse angezeigt.

Nachfolgend werden die allgemein gültigen staatlichen Vorschriften und Gesetze hinsichtlich der geltenden und anzuwendenden Arbeitsschutzmaßnahmen für Außenarbeiten an hohen Bauwerken analysiert. Von einer Worst-Case-Betrachtung wird in diesem Fall gesprochen, da spezifische Arbeitsschutzbestimmungen einzelner Branchen zwangsläufig eine Konkretisierung des staatlichen Rechts darstellen und somit zielführend zu einer weiteren Erhöhung der Sicherheit führen.

Als wesentliche Gefahr für o. g. Tätigkeiten wird die Gefahr eines Absturzes des Arbeiters (hier durch die von Wirbelschleppen hervorgerufenen Windböen) gesehen. Zur Minderung bzw. Abwehr dieser Gefahr sind nachfolgend die dafür relevanten Paragraphen aus geltender Rechtslage angeführt.

#### Arbeitsschutzgesetz

In § 15 dieses Gesetzes (Pflichten der Beschäftigten) ist folgendes ausgeführt (Zitat aus [24]):

*(1) Die Beschäftigten sind verpflichtet, nach ihren Möglichkeiten sowie gemäß der Unterweisung und Weisung des Arbeitgebers für ihre Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit Sorge zu tragen. Entsprechend Satz 1 haben die Beschäftigten auch für die Sicherheit und Gesundheit der Personen zu sorgen, die von ihren Handlungen oder Unterlassungen bei der Arbeit betroffen sind.*

*(2) Im Rahmen des Absatzes 1 haben die Beschäftigten insbesondere Maschinen, Geräte, Werkzeuge, Arbeitsstoffe, Transportmittel und sonstige Arbeitsmittel sowie Schutzvorrichtungen und die ihnen zur Verfügung gestellte persönliche Schutzausrüstung bestimmungsgemäß zu verwenden.*

#### Arbeitsstättenverordnung

In § 12 dieser Verordnung (Schutz gegen Absturz und herabfallende Gegenstände) ist zur Sicherung gegen Absturz und Hineinstürzen folgendes festgelegt (Zitat aus [25])

*„Absturzgefahr: Eine Absturzgefahr besteht, wenn eine Absturzhöhe von mehr als 1 m vorhanden ist.“*

*„Gefahrbereich: Gefahrbereiche mit Gefahren des Hinunterfallens oder des Hineinstürzens liegen u.a. vor, wenn Arbeitsplätze und Verkehrswege“*

*„a) sich 0,20 bis 1,00 m oberhalb der angrenzenden Fußbodenfläche befinden;“*

*„b) an Bottiche, Becken und Behälter mit heißen, ätzenden oder giftigen Stoffen, mit Stoffen, in denen man versinken kann, oder mit Rührwerken, deren Oberkante weniger als 0,90 m über der Fußbodenfläche liegt, grenzen.“*

*„Umwehrung: Umwehrungen sind Geländer, feste Abschränkungen, Brüstungen o. ä. Einrichtungen zum Schutz der Arbeitnehmer gegen Absturz, Hinunterfallen oder Hineinstürzen in einen Gefahrbereich. Die Funktion einer Umwehrung können in Sonderfällen auch mit dem Boden fest verankerte Einrichtungsgegenstände übernehmen.“*

### *Sicherung gegen Absturz und Hineinstürzen*

*„Bei Absturzgefahr sind Umwehungen anzubringen. Das gilt nicht für die Fälle, in denen die Umweh rung der Zweckbestimmung des Arbeitsplatzes oder des Verkehrsweges widerspricht, z.B. Kaianlagen oder Be- und Entladestellen von Lagerflächen.“*

### Unfallverhütungsvorschrift Bauarbeiten BGV C22

Für Bauarbeiten gelten die Vorschriften der Baugenossenschaft (BG) verankert in der BGV C22 [26]. Diese Unfallverhütungsvorschrift gilt dementsprechend auch für Außenarbeiten.

Als die wesentliche Gefahr bei Außenarbeiten (Bauarbeiten) an hohen Bauwerken wird die Gefahr eines Absturzes eingestuft. In der BGV C22 § 12 sind dazu explizit Absturzsicherungen wie folgt vorgeschrieben (Zitate aus [26]):

*(1) Einrichtungen, die ein Abstürzen von Personen verhindern (Absturzsicherungen), müssen vorhanden sein:*

*1. unabhängig von der Absturzhöhe an*

- Arbeitsplätzen an und über Wasser oder anderen festen oder flüssigen Stoffen, in denen man versinken kann,*
- Verkehrswegen über Wasser oder anderen festen oder flüssigen Stoffen, in denen man versinken kann;*

*2. bei mehr als 1,00 m Absturzhöhe, soweit nicht nach Nummer 1 zu sichern ist, an*

- freiliegenden Treppenläufen und -absätzen,*
- Wandöffnungen,*
- Bedienungsständen von Maschinen und deren Zugängen;*

*3. bei mehr als 2,00 m Absturzhöhe an allen übrigen Arbeitsplätzen und Verkehrswegen;*

*4. bei mehr als 3,00 m Absturzhöhe abweichend von Nummer 3 an Arbeitsplätzen und Verkehrswegen auf Dächern;*

*5. bei mehr als 5,00 m Absturzhöhe abweichend von Nummern 3 und 4 beim Mauern über die Hand und beim Arbeiten an Fenstern.“*

*(2) Lassen sich aus arbeitstechnischen Gründen Absturzsicherungen nicht verwenden, müssen an deren Stelle Einrichtungen zum Auffangen abstürzender Personen (Auffangeinrichtungen) vorhanden sein.*

Nach Analyse der allgemeinen Regelungen zum Arbeitsschutz in Hinblick auf die Gefährdung bei Arbeiten an hohen Bauwerken (Gefahr des Absturzes) ist festzustellen, dass im Arbeitsschutzgesetz [24] die Pflichten des Beschäftigten allgemeingültig beschrieben sind. Dies sind u. a. das Vorhalten von Schutzvorrichtungen und die Nutzung der ihnen zur Verfügung gestellten persönlichen Schutzausrüstungen (PSA).

In der Arbeitsstättenverordnung [25] ist weiterführend geregelt, was unter einer Absturzgefahr zu verstehen ist und welche Maßnahmen bzw. Sicherungen gegen Absturz zu ergreifen sind. Diese Verordnung gilt explizit auch für Arbeitsplätze im Freien.

Für Bauarbeiten gelten im Besonderen die Vorschriften der Bauberufgenossenschaft [26]. Diese Vorschrift schreibt detailliert das Vorhandensein von Absturzsicherungen bei entsprechenden Tätigkeiten vor.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Vorschriften der Bauberufsgenossenschaft gemäß BGV C22 [26] zu Arbeiten an hohen Gebäuden (hier relevant ab einer Höhe von 5 m innerhalb der Einzugsgebiete von Wirbelschleppen mit Personengefährdung) sowie das geltende Arbeitsschutzgesetz und die Arbeitsstättenverordnung vorbeugenden Schutzcharakter aufweisen: So wird hier die Anbringung einer sehr spezifischen Absturzsicherung bei entsprechenden Tätigkeiten vorgeschrieben. Die Gefahr einer tödlichen Verletzung durch Einwirkungen von Wirbelschleppen innerhalb der hier als Gefährdung eingestuftem Einzugsgebiete von Wirbelschleppen mit Personengefährdung (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 15) ist somit für derartige Tätigkeiten als kaum wahrscheinlich einzustufen. Unbenommen hiervon kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es bei Erfassung des Menschen von einer Wirbelschleppe trotz vorgesehener Absturzsicherungen zu Verletzungen kommen kann.

Für Personen, die sich aus nicht beruflichen Gründen innerhalb der Einzugsgebiete von Wirbelschleppen mit Personengefährdung aufhalten (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 15) sind keine expliziten Vorschriften und Gesetze anwendbar. Hier sollte ein ungesicherter Aufenthalt im Freien (Dachflächen etc.) in Höhen über 5 m vermieden werden<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> Zum Aufenthalt auf gesicherten Flächen (Balkone, Dachterrassen mit spezifischen Absturzsicherungen (Gelände etc.)) werden hier keine Einschränkungen vorgegeben.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AG</b>	Auftraggeber
<b>AIP</b>	Aeronautical Information Publication (Luftfahrthandbuch)
<b>BBP</b>	Bahnbezugspunkt
<b>BG</b>	Baugenossenschaft
<b>BR</b>	Betriebsrichtung
<b>CAD</b>	computer-aided design (rechnerunterstütztes Konstruieren)
<b>DES</b>	Datenerfassungssystem
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>DN</b>	Dachneigung
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst
<b>EDNY</b>	Flughafen Friedrichshafen (ICAO-Code)
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>ETRS</b>	European Terrestrial Reference System (Vermessungsnetz)
<b>FDH</b>	Flughafen Friedrichshafen
<b>FBP</b>	Flughafenbezugspunkt
<b>GfL</b>	Gesellschaft für Luftverkehrsforschung mbH
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization (Internationale Zivilluftfahrtorganisation)
<b>LIDAR</b>	Light Detection and Ranging
<b>NHN</b>	Normalhöhennull
<b>PSA</b>	Persönliche Schutzausrüstung
<b>SLB</b>	Start- und Landebahn
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator (Koordinatensystem)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Topografie entlang der Start- und Landebahn [6] .....	16
Abbildung 2: Verzeichnete Wirbelschleppenschäden (orangefarbige Kreuze) in Bezug zu den Wirbelschleppen-Vorsorgegebieten (rote Rechtecke).....	19
Abbildung 3: Verzeichnete Wirbelschleppenschäden in Bezug zu den Wirbelschleppen-Überprüfungsgebieten (rote Rechtecke).....	20
Abbildung 4: Nachlauf-Wirbelmodell [9] .....	24
Abbildung 5: Radialer Geschwindigkeitsverlauf in einer Wirbelschleppe [3] .....	25
Abbildung 6: Wirbelschleppe im Bodeneffekt [9] .....	27
Abbildung 7: Effekt des Wiederaufstiegs eines Wirbels im Bodeneffekt [32] .....	27
Abbildung 8: Abnahme der normierten Wirbelstärke $\Gamma_{5-15}^*$ über die normierte Zeit $t^*$ für unterschiedliche Atmosphärenzustände gemäß [3] .....	29
Abbildung 9: Von einer Wirbelschleppe verursachte Dachschäden, Nahbereich Flughafen London-Heathrow, aus [18] .....	31
Abbildung 10: Windsogwirkung bei Dächern mit flacher (links) und starker Neigung (rechts) nach [20] .....	32
Abbildung 11: Dachbereiche für Sattel- (links) und Walmdach (rechts) gemäß [20] .....	33
Abbildung 12: Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude, Untersuchungshöhe 25 m, Szenario Ist-Situation 2012 .....	39
Abbildung 13: Einzugsgebiet von Wirbelschleppen für Personengefährdung Untersuchungshöhe 5 m, Szenario Ist-Situation 2012 .....	41
Abbildung 14: Zonen des Gefährdungspotenzials für Gebäude, Untersuchungshöhe 25 m, Szenario Planungsfall 2020.....	43
Abbildung 15: Einzugsgebiet von Wirbelschleppen für Personengefährdung Untersuchungshöhe 5 m, Szenario Planungsfall 2020 .....	45
Abbildung 16: modifiziertes Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet für die Landebahn 06.....	49
Abbildung 17: modifiziertes Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet für die Landebahn 24 <sup>24</sup> .....	50
Abbildung 18: modifizierte Wirbelschleppen-Überprüfungsgebiete.....	51
Abbildung 19: Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet Bahn 06 [27].....	61
Abbildung 20: Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet Bahn 24 [28].....	62

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Koordinaten Flughafenbezugspunkt .....	13
Tabelle 2: Koordinaten Bahnbezugspunkt 06/24.....	13
Tabelle 3: Daten der befestigten Start- und Landebahn EDNY .....	14
Tabelle 4: Jahresflugbewegungen (Landungen) EDNY.....	14
Tabelle 5: Windklimatologie Friedrichshafen 01/2001 bis 12/2010 (Häufigkeiten der beobachteten Halbstundenwerte an der Station 2793 Friedrichshafen [10])..	15
Tabelle 6: Zusammenhang zwischen Einzelwert und Erwartungswert .....	23
Tabelle 7: Verwendete Größen in der Wirbelschleppenmodellierung .....	23
Tabelle 8: Kenngrößen von Wirbelschleppen für in EDNY typische Luftfahrzeugmuster (bei Standardatmosphäre in 500 m NHN: Luftdichte = 1,17 kg/m <sup>3</sup> Temperatur = 11,5°C).....	29
Tabelle 9: Außendruckbeiwerte, Sog, verschiedene Dachformen, Dachbereiche und Dachneigungen (nach [20]) .....	33
Tabelle 10: Ergebnisse der Gefährdungsanalyse Szenario Ist-Situation 2012 .....	38
Tabelle 11: Ergebnisse der Gefährdungsanalyse Szenario Planungsfall 2020.....	42

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] SÜDKURIER GMBH MEDIENHAUS Internet:  
<http://www.suedkurier.de/region/bodenseekreis-oberschwaben/friedrichshafen/Experten-nehmen-Einflugschneise-des-Hae fler-Flughafens-unter-die-Lupe;art372474,6203734>, 07.August.2013
- [2] FLUGHAFEN FRIEDRICHSHAFEN GMBH: *Genehmigung nach §§ 8 Abs. 5 Satz 1, 6 Abs. 4 Satz 2 LuftVG zur Anlegung und zum Betrieb des Flugplatzes Friedrichshafen in Form eines Flughafens des allgemeinen Verkehrs (Verkehrsflughafen)*. Stand 12. Juli 2012
- [3] HOLZÄPFEL, F. ; GERZ, T.: *Gutachten zum Gefährdungspotenzial durch Wirbelschleppen an der 3. Start- und Landebahn des Flughafens München. Planfeststellungsverfahren 3. Start- und Landebahn Flughafen München, Oberpfaffenhofen*, 10. Juli 2007
- [4] KURZ U. FISCHER GMBH: *Ermittlung des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{eq}$  nach AzB für die sechs verkehrsreichsten Monate März bis August 2012 an den festgelegten Immissionsorten entsprechend der Änderungsgenehmigung für den Flughafen Friedrichshafen vom 1. März 1996 mit der Ergänzung vom 12.Jui 2012*. Winnenden, 1. Oktober 2013
- [5] OTSD GMBH: *Datenerfassungssystem (DES) gemäß Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD) in der Fassung der Bekanntmachung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 19.11.2008 (Bundesanzeiger 195a/2008) für den Flughafen Friedrichshafen (EDNY) Prognosejahr: 2020*. Bremen, 4. August 2010
- [6] DEUTSCHE FLUGSICHERUNG GMBH: *Luftfahrthandbuch – AIP, EDNY Flughafen Friedrichshafen*. Stand Januar 2014
- [7] BGBl. I S.2980, Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB), (BAHz. Nr. 195a vom 23. Dezember 2008) nach Erster Verordnung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm (Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festlegung von Lärmschutzbereichen – 1. FlugLSV, 27. Dezember 2008
- [9] GESELLSCHAFT FÜR LUFTVERKEHRSFORSCHUNG MBH: *Gutachten G1 „Umweltverträglichkeitsstudie (UVS) und Landschaftspflegerischer Begleitplan (LBP)“, Anhang II.1 „Auswirkungen von Wirbelschleppen am Flughafen Frankfurt Main“*. Berlin, November 2006
- [10] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Windrose Friedrichshafen 01.2001 bis 12.2010, Station 2793 Friedrichshafen*. 8. Mai 2014
- [11] FLUGHAFEN FRIEDRICHSHAFEN GMBH: *Excel Datei Wirbelschleppenvorsorgemaßnahmen "Flughafen Friedrichshafen GmbH"*. Stand November 2013
- [12] HENNMANN, I.: *Deformation und Zerfall von Flugzeugwirbelschleppen in turbulenter und stabil geschichteter Atmosphäre*. Oberpfaffenhofen, 18. November 2009
- [13] HOLZÄPFEL, F.: *A Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model*. Journal of Aircraft, Vol. 40, No. 2, pp. 323-331, 2003

- [14] HOLZÄPFEL, F.: *Probabilistic Two-Phase Wake-Vortex Model: Further Develeopment and Assessment*. Journal of Aircraft 43 No. 3, 700-708, 2006
- [15] HOLZÄPFEL, F., STEEN, M.: *Aircraft Wake-Vortex Evolution in Ground Proximity: Analysis and Parameterization*. AIAA J. 45 No 1, 218-221, 2007
- [16] HOLZÄPFEL, F., ROBINS, R. E.: *Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake-Vortex Model: Application and Assessment*. Journal of Aircraft, Vol. 41, No. 5, pp. 1117-1126, 2004
- [17] FISCHENBERG D.: *Bestimmung der Wirbelschleppencharakteristik aus Flugmessdaten*. Paper 2002-170, DGLR-Jahrestagung 2002, Stuttgart, 23.-26. September 2002, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2002
- [18] BAA: *Environment Workshop 1997*. Vortrag BAA Heathrow, Paris, 1997
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*. DIN EN 1991-1-4, ergänzt um DIN EN 1991-1-4/NA – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter. Dezember 2010.
- [20] MAßONG, F.: *Windsogsicherung am geneigten Dach: Grundlagen – Berechnungen – Projekte*. 1. Auflage, Köln : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2012. ISBN: 9783481025007
- [21] MELBOURNE, W. H.: *Criteria for Environmental Wind Conditions*. Department of Mechanical Engineering, Monash University, Clayton, Victoria (Australia). Journal of Industrial Aerodynamics, Volume 3, 241 – 249. 1978
- [22] JANSSEN, W. D.; BLOCKEN, B.; van Hooff, T.: *Pedestrian Wind Comfort Around Buildings: Comparison of Wind Comfort Criteria Based on Whole-Flow Field Data for a Complex Case Study*. Publication in Building and Environment, October 2012
- [23] ETLING D.: *Theoretische Meteorologie – Eine Einführung*. 1996
- [24] BGBl. I, ArbSchG, Arbeitsschutzgesetz, (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 19.Oktober 2013 (BGBl. I S. 3836) geändert worden ist, 19.Oktober 2013
- [25] BGBl. I, ArbStättV, Arbeitsstättenverordnung, vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), die zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960) geändert worden ist, 19. Juli 2010
- [26] BAU-BERUFSGENOSSENSCHAFT, „Unfallverhütungsvorschrift Bauarbeiten“, BGV 22, Fassung vom 1. Januar 1997 mit Durchführungsanweisungen vom April 1993, Stand 2002
- [27] FLUGHAFEN FRIEDRICHSHAFEN GMBH: *Übersichtsplan Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet Friedrichshafen*. März 1996
- [28] FLUGHAFEN FRIEDRICHSHAFEN GMBH: *Übersichtsplan Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet Meckenbeuren*. März 1996
- [29] FLUGHAFEN FRIEDRICHSHAFEN GMBH, CAD Plandateien Kp262\_ws\_fn\_090922.dwg, Kp262\_ws\_mb\_090922.dwg, Stand: 23.November 2009
- [30] FLUGHAFEN FRIEDRICHSHAFEN GMBH, Email „AW: GfL-Wirbelschleppengutachten Friedrichshafen - Statusreport KW 8“, 7. März 2014

- [31] SCHÄNZER G., PEIL U., Email „Analyse der Wirbelschleppenproblematik im Anflugbereich des Flughafens Friedrichshafen und Erörterung von Maßnahmen zu deren Entschärfung“, Braunschweig, Juli 1999
- [32] BÖHNING P., „Akustische Lokalisierung von Wirbelschleppen“, Dissertation TU Berlin, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme V, Berlin, April 2006
- [33] DELISI, D.P., G.C. GREENE, R.E. ROBINS, D.C. VICROY und F.Y. WANG: „Aircraft Wake Vortex Core Size Measurements“. 21th AIAA/CEAS Applied Aerodynamics Conference, AIAA Paper 2003-3811, FL, Orlando, USA, June 23-26, 2003.
- [34] KHP, Referenzierung des externen Risikos infolge neuer Landebahn am Flughafen Frankfurt Main, G16.4, Frankfurt am Main, 13.12.2006

## Anhang A

### A1 Wirbelschleppen Vorsorgegebiet Bahn 06

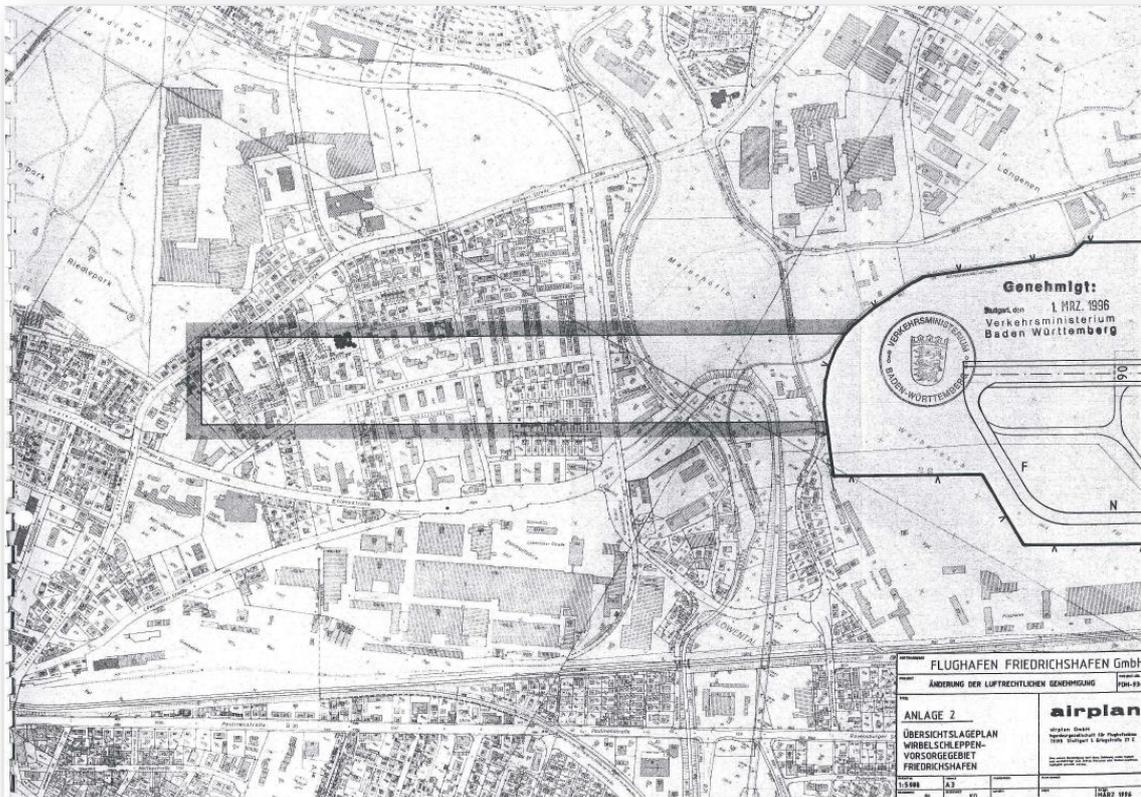


Abbildung 19: Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet Bahn 06 [27]

## A2 Wirbelschleppen Vorsorgegebiet Bahn 24

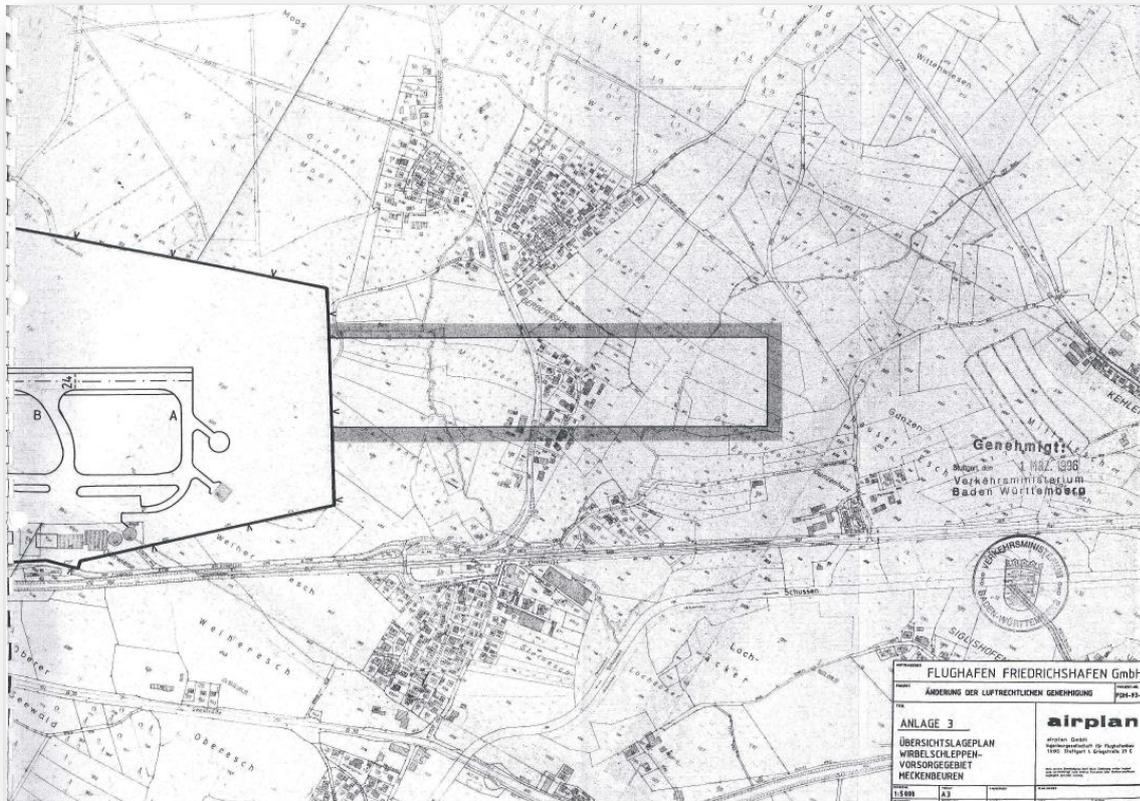


Abbildung 20: Wirbelschleppen-Vorsorgegebiet Bahn 24 [28]