

WINDENERGIEANLAGEN IN FLUGPLATZNÄHE

Gutachten zur Feststellung notwendiger
Mindestabstände von Windenergieanlagen zu
Flugbetriebsräumen an Flugplätzen der
Allgemeinen Luftfahrt unter Berücksichtigung
sämtlicher Luftfahrzeugklassen, insbesondere
auch der im Luftsport verwendeten

Gutachterliche Stellungnahme
Fachbereich 6 Luft- und Raumfahrttechnik
FH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Frank Janser
Bastian Hoeveler M.Sc.
David Schneider
Philipp Weber

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
Diagrammverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis	x
Einheitsverzeichnis	xi
1. Zielsetzung.....	1
2. Grundlagen.....	2
2.1 Definition der Flugphasen.....	2
2.2 Luftraum.....	4
2.3 Sichtflug	7
2.4 Instrumentenflug	9
2.5 Ausbildungsanforderungen an Piloten	9
2.5.1 Privatpilotenlizenz.....	10
2.5.2 Berufspilotenlizenz	10
2.5.3 Instrumentenflugberechtigung.....	10
2.6 Turbulenz und Windscherung.....	11
2.7 Rechtliche Grundlagen für die Berücksichtigung von Luftfahrthindernissen, insbesondere Bauwerken, in der Umgebung von Flugplätzen	13
2.7.1 Bauschutzbereich gemäß § 12 und § 17 Luftverkehrsgesetz	13
2.7.2 Allgemeiner Luftraum	15
2.7.3 Hindernisfreiflächen gemäß verwaltungsrechtlicher Regelungen	16
2.7.4 Hindernisfreiflächen Instrumentenflug	22
2.7.5 Verordnung der europäischen Kommission	23
2.7.6 ICAO Obstacle Limitation Surfaces	24
2.7.7 Visual Segment Surface.....	27

2.7.8	Rücksichtnahmegebot zum Schutz der Hindernisfreiheit in der Umgebung von Flugplätzen	28
2.7.9	Zusammenfassung	29
3.	Windenergieanlagen	30
4.	Flugbetrieb Standardflugplatz	37
4.1	Motorisierte Luftfahrzeuge	37
4.1.1	Platzrunde	37
4.1.2	Schulung	41
4.2	Segelflug	42
4.2.1	Windenstart	42
4.2.2	Flugzeugschlepp	43
4.2.3	Platzrunde	44
4.2.4	Übungsraum	45
4.3	Ballone	46
4.4	Fallschirmsprungbetrieb	47
4.5	Gleitschirme	47
4.6	Hängegleiter	48
4.7	Einflüsse im Flugbetrieb	48
5.	Strömungsfeld Windenergieanlagen	50
5.1	Typisches Windfeld	50
5.2	Literaturübersicht	58
5.2.1	Böenbelastung von UL-Flugzeugen durch den turbulenten Nachlauf von Windenergieanlagen, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Oldenburg, 2014	58
5.2.2	Flugempfehlungen für den UL-Sonderlandeplatz Boslar, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Oldenburg, 2015	63
5.2.3	“The influence of wind turbine induced turbulence on ultralight aircraft”, a CFD analysis, Von Karman Institute for Fluid Dynamics	68

5.2.4	„CAA Windturbine Wake Encounter Study“, University of Liverpool	69
5.2.5	“Wind Farm Turbulence Impacts on General Aviation Airports in Kansas”. Roll Hazard Analysis.....	70
5.2.6	„Untersuchung zum Nachlaufeinfluss von Windenergieanlagen auf Segelflugzeuge“, Diplomarbeit, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik	72
5.2.7	Zusammenfassung	76
5.3	Potenzielle Auswirkungen des Nachlaufes auf das Luftfahrzeug	77
5.3.1	Kriterium Böen und Windscherung	78
5.3.2	Kriterium Eddy Dissipation Rate	79
5.3.3	Zusammenfassung	81
6.	Experimentelle Untersuchung.....	82
6.1	Untersuchungshorizont	82
6.2	Vorgehensweise.....	82
6.3	Grundlagen	83
6.4	Versuchsbeschreibung	89
6.4.1	Vorbeiflug in Nabenhöhe (Aufgabe 1)	89
6.4.2	Vorbeiflug in Höhe der Rotorblattspitzen (Aufgabe 2)	89
6.4.3	Überflug	89
6.4.4	Referenzflug (Aufgabe 3)	89
6.4.5	Piloten.....	90
6.5	Ergebnisse	91
6.5.1	Versuche 1 und 2.....	91
6.5.2	Versuch 3	99
6.5.3	Gegenüberstellung Windenergieanlagen - Funkturm	103
6.5.4	Eye Tracker.....	107

6.6	Schlussfolgerung.....	108
6.6.1	Abstandsabschätzung	108
6.6.2	Pilotenbelastung	108
6.6.3	Belastung – Erfahrung	109
6.6.4	Abstandsabschätzung – Erfahrung	109
6.6.5	Abstand – Belastung	109
6.6.6	Eye Tracker.....	110
6.6.7	Unterscheidung statischer und dynamischer Hindernisse.....	111
7.	Herleitung der Abstandsregelung.....	113
7.1	Windenergieanlage als Luftfahrthindernis	113
7.2	Hindernisfreiflächen Motorflugbetrieb.....	117
7.2.1	Platzrunde	117
7.2.2	Vollkreise im Gegenanflug.....	117
7.2.3	Einflugkorridor Gegenanflug	117
7.2.4	Flug bei minimalen Wetterbedingungen	118
7.2.5	Sicherheit und Training.....	118
7.2.6	Sicherheitsbereich um die Platzrunde	118
7.2.7	Zusammenfassung.....	119
7.3	Hindernisfreiflächen Ultraleichtflug	120
7.3.1	Platzrunde	120
7.3.2	Vollkreise im Gegenanflug.....	120
7.3.3	Einflugkorridor Gegenanflug	120
7.3.4	Flug bei minimalen Wetterbedingungen	121
7.3.5	Sicherheitsbereich um die Platzrunde	121
7.3.6	Sicherheit und Training.....	121
7.3.7	Zusammenfassung.....	122

7.4	Hindernisfreiflächen Segelflugbetrieb	123
7.4.1	Schleppstrecken	123
7.4.2	Platzrunde	123
7.4.3	Sicherheitsbereich um die Platzrunde	123
7.4.4	Übungsraum	124
7.4.5	Rückkehr zum Platz.....	124
7.4.6	Zusammenfassung	125
7.5	Hindernisfreiflächen Gleitschirme und Hängegleiter	126
7.6	Hindernisfreiflächen Ballone und Fallschirmspringer.....	127
7.7	Beispiel Kombination	128
7.8	Einfluss Topografie	129
8.	Fazit	130
9.	Literaturverzeichnis	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Bauschutzbereich LuftVG §12 (Quelle: [18])	14
Abbildung 2.2: NfL 1 92/13 genaue Beschreibung der Isometrie (Quelle: [19])	18
Abbildung 2.3: Hindernisbegrenzungsflächen VFR Landebahn der Länge zwischen 800 m und 1200 m (Quelle: [19])	20
Abbildung 2.4: Hindernisfreiflächen Instrumentenanflug (Quelle: [21])	22
Abbildung 2.5: Hindernisfreiflächen Instrumentenabflug (Quelle: [21])	22
Abbildung 2.6: Hindernisfreiflächen (Quelle: ICAO Annex 14)	26
Abbildung 3.1: Beschreibung Windenergieanlage (Quelle: [28])	30
Abbildung 3.2: Fangstromröhre Windenergieanlage (Quelle: [29])	31
Abbildung 3.3: Entwicklung der Größe der durchschnittlich neu errichteten Windenergieanlagen in der Vergangenheit und Prognose für die Zukunft (Quelle: [34])	36
Abbildung 4.1: Skizze einer Standardplatzrunde (Quelle: NfL 1 37/00 [35])	38
Abbildung 4.2: Windenstart (Quelle: [36]).....	42
Abbildung 4.3: Flugzeugschlepp (Quelle: Wikipedia)	43
Abbildung 4.4: Übersicht Platzrunde Segelflug (Quelle: [37]).....	44
Abbildung 4.5: Platzrunde (Quelle: Fliegergruppe Welzheim e.V.).....	45
Abbildung 4.6: Übungsraum (Quelle: [36]).....	46
Abbildung 5.1: Geschwindigkeitsreduktion im Nachlauf auf 40 % (Quelle: [38])	51
Abbildung 5.2: Umströmung Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Quelle: [39])	51
Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverteilung in der Abströmung, Visualisierung auf Basis der Daten von Diagramm 5.2.....	55
Abbildung 5.4: Blattspitzenwirbel (Quelle: [39]).....	57
Abbildung 5.5: Anstellwinkeländerung durch vertikale Böe	60
Abbildung 5.6: Planung Luftverkehr Linnich-Boslar (Quelle: [45]).....	64
Abbildung 5.7: Simulierter abschwimmender Blattspitzenwirbel (Quelle: [49]) .	70
Abbildung 5.8: aufwändige CFD Studie zu Wirbelschleppen einer Windkraftanlage (Quelle: Stefan Ivanell, University of Uppsala [50])	71
Abbildung 5.9: Gefährdungsbereich abschwimmende Wirbelschleppe	71
Abbildung 5.10: Beispiel CFD Untersuchung (Quelle: [51])	72
Abbildung 6.1: Pilot A Abstand Aufgabe 1.....	93
Abbildung 6.2: Pilot A Abstand Aufgabe 2	93
Abbildung 6.3: Pilot B Abstand Aufgabe 1.....	93

Abbildung 6.4: Pilot B Abstand Aufgabe 2	93
Abbildung 6.5: Pilot C Abstand Aufgabe 1	94
Abbildung 6.6: Pilot C Abstand Aufgabe 2	94
Abbildung 6.7: Pilot D Abstand Aufgabe 1	94
Abbildung 6.8: Pilot D Abstand Aufgabe 2	94
Abbildung 6.9: Pilot E Abstand Aufgabe 1	94
Abbildung 6.10: Pilot E Abstand Aufgabe 2	94
Abbildung 6.11: Pilot F Abstand Aufgabe 1	95
Abbildung 6.12: Pilot F Abstand Aufgabe 2	95
Abbildung 6.13: Pilot F Abstand Aufgabe 1	95
Abbildung 6.14: Pilot F Abstand Aufgabe 2	95
Abbildung 6.15: Pilot A Abstand Aufgabe 3	100
Abbildung 6.16: Pilot B Abstand Aufgabe 3	100
Abbildung 6.17: Pilot C Abstand Aufgabe 3	100
Abbildung 6.18: Pilot D Abstand Aufgabe 3	100
Abbildung 6.19: Pilot E Abstand Aufgabe 3	101
Abbildung 6.20: Pilot F Abstand Aufgabe 3	101
Abbildung 6.21: Pilot G Abstand Aufgabe 3	101
Abbildung 7.1: Vergleich Silhouetten Turm und Windenergieanlage	114
Abbildung 7.2: Schutzraum um ein dynamisches Hindernis	116
Abbildung 7.3: Flugplatz Mindestabstände zu Windenergieanlagen mit Sicherheitsbereich	119
Abbildung 7.4: Sicherheitsbereich UL-Platzrunde	122
Abbildung 7.5: Sicherheitsbereich Segelflugplatz	125
Abbildung 7.6: Sicherheitsbereich Gleitschirm	126
Abbildung 7.7: Sicherheitsbereich Fallschirmspringer/Ballonstartfläche	127
Abbildung 7.8: Übersicht Schutzbereiche kombinierte Verkehrsarten	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Klassifikation von Windscherung und Turbulenz	12
Tabelle 2.2: Größe und Ausdehnung der Hindernisfreiflächen (Quelle: [20])	19
Tabelle 2.3: Größe und Ausdehnung der Hindernisfreiflächen (Quelle: [26])	27
Tabelle 6.1: Beispielwertung NASA Task-Load-Index	87
Tabelle 6.2: Beispielrechnung NASA Task Load Index	88
Tabelle 6.3: Pilotendaten.....	90
Tabelle 6.4: Abstände gegenübergestellt	103

Diagrammverzeichnis

Diagramm 3.1: Elektrische Leistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Quelle: [29])	32
Diagramm 3.2: Durchschnittliche Leistung je Windenergieanlage (Quelle: [33])	33
Diagramm 3.3: Durchschnittlicher Rotordurchmesser (links) und Masthöhe (rechts) neu in Betrieb genommener Anlagen im Jahr 2012 (Quelle: [33]) ..	34
Diagramm 3.4: Durchschnittlicher Rotordurchmesser (links) und Masthöhe (rechts) neu in Betrieb genommener Anlagen im Jahr 2014 (Quelle: [30]) .	34
Diagramm 3.5: Entwicklung der Anteile Rotorgrößengruppen über die Zeit (Quelle: [33])	35
Diagramm 5.1: Nachlaufverzögerung (Quelle: [39])	52
Diagramm 5.2: Geschwindigkeitsverteilung hinter einer Windenergieanlage (Quelle: [39])	54
Diagramm 5.3: Turbulenzverteilung über einen vertikalen Schnitt im Nachlauf einer Windenergieanlage (Quelle: [39])	56
Diagramm 5.4: Radiale Lastverteilung eines realen Rotorblattes (Quelle: [41])	59
Diagramm 5.5: Maximale Turbulenzbelastung beim Durchfliegen eines Windenergieanlagenachlaufes (Quelle: [40])	62
Diagramm 5.6: Anströmungsgeschwindigkeit beim Durchflug im Abstand von 126 m des Windenergieanlagenachlaufes, aufgeteilt in die Raumrichtungen (Quelle: [51])	73
Diagramm 5.7: Änderung des Anstellwinkels und des Schiebewinkels (Quelle: [51])	74

Diagramm 5.8: Änderung des Auftriebs bei einem Rotordurchmesser Abstand (Quelle: [51])	75
Diagramm 5.9: Geschwindigkeitsverteilung hinter einer Windenergieanlage (Quelle: [39])	78
Diagramm 5.10: Eddy Dissipation Rate (Quelle: [52]).....	80
Diagramm 6.1: Abstände Aufgabe 1	91
Diagramm 6.2: Abstände Aufgabe 2	91
Diagramm 6.3: Abstand - Erfahrung Aufgabe 1	92
Diagramm 6.4: Abstand - Erfahrung Aufgabe 2	92
Diagramm 6.5: Pilotenbelastung Windenergieanlagen	96
Diagramm 6.6: Belastung - Erfahrung Windenergieanlagen	97
Diagramm 6.7: Abstand - Belastung Aufgabe 1	97
Diagramm 6.8: Abstand - Belastung Aufgabe 2	98
Diagramm 6.9: Abstände Aufgabe 3	99
Diagramm 6.10: Abstand - Erfahrung Aufgabe 3	99
Diagramm 6.11: Pilotenbelastung Turm	102
Diagramm 6.12: Belastung - Erfahrung Funkturm	102
Diagramm 6.13: Abstand - Belastung Aufgabe 3	103
Diagramm 6.14: Gegenüberstellung der Abstände.....	104
Diagramm 6.15: Mittlere Abstände	105
Diagramm 6.16: Gegenüberstellung der Belastung	105
Diagramm 6.17: Außenblickdauer	107

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

<i>CS</i>	Certification Specifications
<i>DVO</i>	Durchführungsverordnung
<i>EDR</i>	Eddy Dissipation Rate
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>IAS</i>	angezeigte Fluggeschwindigkeit (englisch: Indicated Airspeed)
<i>ICAO</i>	International Civil Aviation Organisation
<i>LuftVG</i>	Luftverkehrsgesetz
<i>LuftVO</i>	Luftverkehrsordnung
<i>MSL</i>	Mittlerer Meeresspiegel (englisch: Mean Sea Level)
<i>SERA</i>	Standardised European Rules of the Air
<i>UL</i>	Ultraleichtflugzeug

Lateinische Formelzeichen

<i>b</i>	Spannweite
<i>D</i>	Rotordurchmesser
<i>n</i>	Lastfaktor
<i>v</i>	Fluggeschwindigkeit

Griechische Formelzeichen

α	Anstellwinkel
β	Schiebewinkel
Δ	Symbol für Differenz/Veränderung
ε	Eddy Dissipation Rate
ρ	Luftdichte

Einheitsverzeichnis

ft	Fuß (=0,3048 m)
kg	Kilogramm
km	Kilometer (=1000 m)
km/h	Kilometer je Stunde
kts	Knoten (=1,852 km/h)
m	Meter
N	Newton
Nm	Newtonmeter
Pa	Pascal [N/m^2]
s	Sekunde

1. Zielsetzung

Die FH Aachen Fachbereich 6/ACIAS e.V. ist vom Luftsport-Landesverband Brandenburg e.V. beauftragt worden, in einem wissenschaftlichen Gutachten zu untersuchen, welcher Mindestabstand zu Windenergieanlagen abhängig von ihrer Größe für den Flugbetrieb an Flugplätzen mit gemischtem Flugbetrieb notwendig ist. Für die Erarbeitung der Aufgabenstellung wurde eine Arbeitsgruppe gebildet, in der neben Vertretern des Luftsport Landesverbandes Brandenburg auch Vertreter des Deutschen Aero Clubs und der AOPA-Germany - Verband der Allgemeinen Luftfahrt e.V. mitgewirkt haben. Berücksichtigte Verkehrsteilnehmer sind Motorflugzeuge, Ultraleichtflugzeuge, Segelflugzeuge, Fallschirmspringer, Hängegleiter, Gleitschirme und Ballone. Für diese Analyse werden die Gefahr der Kollision mit einer Windenergieanlage, die Auswirkung des Windfeldes im Nachlauf der Windenergieanlage auf das Luftfahrzeug, die notwendige Trennung der An- und Abflugwege der verschiedenen Luftfahrzeugtypen und Voraussetzungen für die zweckmäßige Nutzung eines Flugplatzes und Segelfluggeländes, beispielsweise Ausbildung oder Streckenflüge, berücksichtigt. Auf Basis dieser Untersuchungen werden entsprechend angepasste Hindernisfreiflächen abgeleitet.

2. Grundlagen

Relevante grundlegende Begriffe und Rahmenbedingungen für dieses Gutachten werden anhand der geltenden nationalen, europäischen und internationalen Regularien aufbereitet und analysiert. Es ist zu beachten, dass zum Teil die aktuellen nationalen deutschen gesetzlichen Regeln in der Luftverkehrsordnung (*LuftVO*) und dem Luftverkehrsgesetz (*LuftVG*) von der übergeordneten, für die Mitgliedsländer verpflichtenden europäischen Verordnung *EU DVO 923/2012 Standardised European Rules of the Air (SERA)* aus dem Jahr 2012 und *EU VO 139/2014* abweichen [1]. Seit dem 04.12.2014 ist die *EU DVO 923/2012* auch für Deutschland in Kraft. Diese wiederum basieren bis auf wenige Ausnahmen auf Annex 2 (Rules of the Air) und Annex 11 (Air Traffic Service) des Chicagoer Abkommens über die internationale Zivilluftfahrt. Die Bundesrepublik Deutschland ist seit 1956 Mitglied der International Civil Aviation Organisation (*ICAO*), einer Sonderorganisation der Vereinten Nationen, und somit angehalten, die Inhalte der Annexes des Chicagoer Abkommens möglichst weitgehend umzusetzen und in nationales Recht zu überführen. Die nationalen Gesetze und Verordnungen werden aktuell entsprechend angepasst und überarbeitet.

2.1 Definition der Flugphasen

Zum Einstieg werden die Grobdefinitionen von Fachbegriffen für die relevanten Flugphasen vorgestellt.

Diese sind durch das Common Taxonomy Team für die Mitgliedsstaaten der International Civil Aviation Organisation (*ICAO*), wie nachfolgend dargestellt, definiert worden [2]. Diese Vorgabe ist durch die ECCAIRS Aviation, einer Arbeitsgruppe der europäischen Flugsicherheitsbehörde, in einen europaweit einheitlichen Standard umgewandelt worden. [3] [4, 5]

Start

Die Flugphase ab dem Setzen der Startleistung bis zur ersten vorgeschriebenen Leistungsreduktion, bis zum Erreichen der VFR-Platzrundenhöhe (VFR-Platzrunde siehe Kapitel 4.1.1) oder 1000 ft (300 m) über der Höhe des Startbahnendes, was davon zuerst erreicht ist, oder dem Abbrechen des Startlaufes.

Reiseflug

Flug nach Instrumentenflugregeln: Ab dem Beenden des Anfangssteigfluges, während des Reisefluges und dem Abschluss des kontrollierten Sinkfluges bis zum Initial Approach Fix.

Flug nach Sichtflugregeln: Flugphase nach Beendigung des Anfangssteigfluges, während des Reisefluges bis zum Erreichen der Platzrundenhöhe oder 1000 ft über dem Zielflugplatz, was auch immer davon zuerst erreicht wird.

Manöver

Eine Flugsituation, in der geplanter Tiefflug durchgeführt wird, eine bestimmte, auch abnormale, Fluglage eingenommen wird oder in der ungewöhnliche Beschleunigungen gezielt gesteuert werden. Diese Flugsituation ist Teil des Pilotentrainings oder erfolgt im Rahmen eines Kunstfluges.

Anflug

Instrumentenflug: Der Flugabschnitt vom äußeren Anflugmarker bis zum Anheben der Flugzeugnase kurz vor dem Aufsetzen mit der Absicht über der Landebahn auszuschweben.

Sichtflug: Der Flug von 1000 ft über der Landebahnhöhe oder ab dem Einflug in die Sichtflugplatzrunde bis zum Anheben der Flugzeugnase kurz vor dem Aufsetzen zum Ausschweben über der Landebahn.

Landung

Die Flugphase ab dem Anheben der Flugzeugnase zum Ausschweben kurz vor dem Aufsetzen, während das Flugzeug auf der Landebahn ausrollt, bis das Flugzeug die Landebahn verlässt, anhält oder bis die Triebwerksleistung zum erneuten Abheben gesetzt wird, was auch immer davon zuerst eintritt.

2.2 Luftraum

Der für dieses Gutachten relevante Luftraum (bis 1500 ft über Grund) hat in Deutschland die Klasse G (unkontrollierter Luftraum), die Klasse E (kontrollierter Luftraum) und die Klasse D (Kontrollzonen, kontrollierter Luftraum).

Der Luftraum der Klasse G reicht im Allgemeinen bis 2500 ft über Grund. In der Nähe von größeren Flugplätzen ist die Obergrenze des Luftraums G auf 1700 ft und auf 1000 ft abgesenkt.

Um große Flugplätze/Verkehrsflughäfen befinden sich Kontrollzonen der Luftraumklasse D. Diese reicht in der untersten Stufe vom Erdboden bis mindestens 1500 ft über Grund.

Der Luftraum Klasse E beginnt über den auf der Erdoberfläche aufliegenden Lufträumen D oder G und reicht bis in Flugfläche 100 oder einem darüber liegenden Luftraum C oder D.

Abhängig von den Flugregeln, nach denen ein Flug durchgeführt wird (Flugregeln: siehe folgende Kapitel), ist nach SERA.6001 Folgendes zu berücksichtigen:

„d) Klasse D. Es dürfen Flüge nach Instrumentenflugregeln und Flüge nach Sichtflugregeln durchgeführt werden und es wird Flugverkehrskontrolldienst für alle Flüge erbracht. Flüge nach Instrumentenflugregeln werden gegenüber anderen Flügen nach Instrumentenflugregeln gestaffelt und erhalten auf Anforderung Verkehrsinformationen bezüglich Flügen

nach Sichtflugregeln und Ausweichempfehlungen. Flüge nach Sichtflugregeln erhalten auf Anforderung Verkehrsinformationen bezüglich aller anderen Flüge und Ausweichempfehlungen. Für alle Flüge ist eine dauernde Flugfunk-Sprechfunkverbindung erforderlich und es gilt eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 250 kt IAS [angezeigte Fluggeschwindigkeit] unterhalb 3 050 m (10 000 ft) über MSL, sofern die zuständige Behörde keine anderweitige Genehmigung für Luftfahrzeugmuster erteilt, die aus technischen oder Sicherheitsgründen diese Geschwindigkeit nicht beibehalten können [oder eine Freigabe durch die Flugsicherung erfolgt ist]. Alle Flüge benötigen eine Flugverkehrskontrollfreigabe.

- e) Klasse E. Es dürfen Flüge nach Instrumentenflugregeln und nach Sichtflugregeln durchgeführt werden. Für Flüge nach Instrumentenflugregeln wird Flugverkehrskontrolldienst erbracht und Staffelung gegenüber anderen Flügen nach Instrumentenflugregeln sichergestellt. Alle Flüge erhalten, soweit möglich, Verkehrsinformationen. Eine dauernde Flugfunk- Sprechfunkverbindung ist für Flüge nach Instrumentenflugregeln erforderlich. Für alle Flüge gilt eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 250 kt IAS unterhalb 3 050 m (10 000 ft) über MSL, sofern die zuständige Behörde keine anderweitige Genehmigung für Luftfahrzeugmuster erteilt, die aus technischen oder Sicherheitsgründen diese Geschwindigkeit nicht beibehalten können [oder eine Freigabe durch die Flugsicherung erfolgt ist]. Alle Flüge nach Instrumentenflugregeln benötigen eine Flugverkehrskontrollfreigabe. Die Klasse E darf nicht für Kontrollzonen verwendet werden.*

[...]

g) Klasse G. Es dürfen Flüge nach Instrumentenflugregeln und Flüge nach Sichtflugregeln durchgeführt werden und alle Flüge erhalten auf Anforderung Fluginformationsdienst. Alle Flüge nach Instrumentenflugregeln müssen in der Lage sein, eine Flugfunk-Sprechfunkverbindung herzustellen. Für alle Flüge gilt eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 250 kt IAS unterhalb 3 050 m (10 000 ft) über MSL [Meeresspiegel], sofern die zuständige Behörde keine anderweitige Genehmigung für Luftfahrzeugmuster erteilt, die aus technischen oder Sicherheitsgründen diese Geschwindigkeit nicht beibehalten können. Eine Flugverkehrskontrollfreigabe ist nicht erforderlich.“

[6]

Grundsätzlich dürfen somit im Luftraum G, E und D Flüge nach Instrumentenflugregeln durchgeführt werden. Dabei wird im Luftraum G jedoch in allen Fällen größere Eigenverantwortung vom Piloten hinsichtlich Flugwegüberwachung und Kollisionsvermeidung verlangt. Der Luftverkehrskontrolldienst ist hierzu nicht mehr verpflichtet.

Diese Vorschrift war bereits vor der europäischen Harmonisierung durch die SERA-Verordnung weitestgehend in der *LuftVO* § 28 und der hierzu gehörenden Anlage 4 wiedergegeben. Erläuternd ist hierzu zu sagen, dass in Deutschland nach Stand 08.09.2015 ein Flug nach Instrumentenflugregeln im Luftraum G aufgrund „Bekanntmachung über Flugbetrieb nach Instrumentenflugregeln im Luftraum der Klasse G, NfL 1-293-14“ nur entlang veröffentlichter An- und Abflugstrecken erlaubt ist [7] und in Nähe dieser Flugplätze mit derartigen Verfahren alle Luftverkehrsteilnehmer verpflichtend Funkkontakt mit der Flugleitung halten müssen (Radio Mandatory Zone) [8].

2.3 Sichtflug

Sichtflug beschreibt einen Flug nach § 28 bis § 34 der *LuftVO* bzw. *SERA.5005*.

Kennzeichnend für die Durchführung ist, dass die Besatzung die Lage des Luftfahrzeuges allein durch den Blick nach außen bestimmen kann.

Nach Sichtflugregeln darf nach § 28 *LuftVO* geflogen werden, wenn unter anderem die Wetterbedingung im direkten Umfeld des Flugzeuges die Bedingungen nach Anlage 5 der *LuftVO* beziehungsweise seit Dezember 2014 *SERA.5001* erfüllen.

Nach nationalem deutschen Recht gilt im Luftraum G unter 1000 ft über Grund die Vorgabe, dass das Flugzeug frei von Wolken ist, der Boden gesehen werden kann (Bodensicht) und eine Sichtweite von 1500 m vorhanden ist. Nach europäischem Recht gilt für Sichtweiten zwischen 1500 m und 5000 m Sicht zusätzlich eine Beschränkung der angezeigten Fluggeschwindigkeit auf 140 kt. Die Flugsicht von Hubschraubern in dieser Höhe muss 800 m betragen, für Such- und Rettungsflüge, medizinische Flüge und Brandbekämpfung sind auch geringere Sichtweiten erlaubt.

Im Luftraum D gelten, sofern eine Luftverkehrskontrollfreigabe für einen Sonderflug nach Sichtflugregeln erfolgt ist, in Kontrollzonen fast die gleichen Wetterbeschränkungen. Flug frei von Wolken, mindestens 600 ft Hauptwolkenuntergrenze und für Sichtweiten zwischen 1500 m und 5000 m ist die angezeigte Fluggeschwindigkeit auf 140 kt beschränkt. Ohne Freigabe für einen Sonderflug nach Sichtflugregeln gelten im Luftraum D und im Luftraum E unabhängig einer Freigabe eine Mindestsicht von 5000 m (unterhalb 3000 ft über Grund oder 10 000 ft über dem Meeresspiegel), 1000 ft vertikaler und 1500 m horizontaler Abstand zu Wolken. Für Hubschrauber gilt jedoch allgemein eine Mindestsichtweite von 800 m.

Zur Sicherheit ist vom Gesetzgeber eine Sicherheitsmindesthöhe für den Flug nach Sichtflugregeln eingerichtet worden. Diese ist im § 6 der *LuftVO* wie folgt definiert:

„(1) Die Sicherheitsmindesthöhe darf nur unterschritten werden, soweit es bei Start und Landung notwendig ist. Sicherheitsmindesthöhe ist die Höhe, bei der weder eine unnötige Lärmbelästigung im Sinne des § 1 Abs. 2 noch im Falle einer Notlandung eine unnötige Gefährdung von Personen und Sachen zu befürchten ist. Über Städten, anderen dicht besiedelten Gebieten, Industrieanlagen, Menschenansammlungen, Unglücksorten sowie Katastrophengebieten beträgt die Sicherheitsmindesthöhe mindestens 300 Meter (1 000 Fuß) über dem höchsten Hindernis in einem Umkreis von 600 Metern, in allen übrigen Fällen 150 Meter (500 Fuß) über Grund oder Wasser. Segelflugzeuge, Hängegleiter und Gleitsegel können die Höhe von 150 Metern (500 Fuß) auch unterschreiten, wenn die Art ihres Betriebs dies notwendig macht und eine Gefahr für Personen und Sachen nicht zu befürchten ist.“

Zusätzlich wird im nationalen deutschen Recht gefordert, dass auf Überlandflügen eine Mindestflughöhe von 2000 ft über Grund eingehalten wird, sofern nicht die „Einhaltung sonstiger Vorschriften und Festlegungen nach dieser Verordnung, insbesondere die Einhaltung der Luftraumordnung nach § 10, der Sichtflugregeln nach § 28 *LuftVO* oder von Flugverkehrskontrollfreigaben, eine geringere Höhe erfordert“. Diese Regelung existiert im europäischen Recht nach *SERA* nicht.

2.4 Instrumentenflug

Instrumentenflug beschreibt einen Flug nach § 36 bis § 42 der *LuftVO* beziehungsweise SERA.5015 bis 5025.

Ein Flug nach den Instrumentenflugregeln zeichnet sich dadurch aus, dass die Lage und Position des Luftfahrzeuges ohne Sicht nach außen bestimmt werden kann. Notwendig ist die Sicht nach außen nur zur Landung und bei dem Beschleunigen auf der Startbahn bis zum Abheben.

Instrumentenflug findet in Bodennähe entlang veröffentlichter Anflug- und Abflugstrecken statt. In Kontrollzonen des Luftraumes D ist ein Abweichen von diesen Strecken in Absprache mit der Flugverkehrskontrolle möglich, sofern bei Verlassen der Kontrollzonen in kontrollierten Luftraum eingeflogen wird (also Luftraum E, D oder C) und außer für Start und Landung notwendig eine Höhe von 1000 ft über dem höchsten Hindernis im Umkreis von 8 km zur angenommenen Position eingehalten wird.

Nach europäischem Recht darf auch im Luftraum G unabhängig von veröffentlichten An- und Abflugstrecken gestartet und gelandet werden, sofern der verantwortliche Pilot sicher gestellt hat, dass bis zum Erreichen einer sicheren Höhe ein Flug nach Sicht möglich ist beziehungsweise beim Anflug in einer sicheren Höhe Sichtflugbedingungen herrschen. Diese Regelung ist in Deutschland, wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, ausgesetzt.

Nach *SERA* (und auch *ICAO Annex 2*) ist der eigenverantwortliche Flug nach Instrumentenflugregeln im Luftraum G vorgesehen. Es gilt eine Höhe von 1000 ft über dem höchsten Hindernis im Umkreis von 8 km zur angenommenen Position einzuhalten.

2.5 Ausbildungsanforderungen an Piloten

In der europäischen Verordnung über die Lizenzierung von Luftfahrtpersonal, EU-FCL 1, werden Angaben zu den notwendigen fliegerischen Fähigkeiten gemacht, die ein Pilot im Rahmen der praktischen Flugprüfung nachweisen

muss. Unter anderem existieren objektive Kriterien wie das Halten einer Flughöhe und eines Steuerkurses.

Wichtigstes Gebot ist die Vermeidung einer Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer in jeder Situation. Dies umfasst insbesondere die Kollisionsvermeidung durch entsprechenden Sichtkontakt und eine umsichtige Flugwegführung.

In den folgenden Kapiteln werden die Anforderungen an die Piloten hinsichtlich der zulässigen Toleranzen in Abhängigkeit der jeweiligen Lizenz dargestellt.

In der europäischen Verordnung Part-FCL ist dabei festgehalten, dass es sich bei den genannten Werten um allgemeine Richtwerte handelt, die abhängig von der Flugleistung und Flugeigenschaften des Flugzeuges sind und bei äußeren Einwirkungen auf das Luftfahrzeug, beispielsweise Turbulenzen, auch überschritten werden dürfen. [9]

2.5.1 Privatpilotenlizenz

Im Rahmen der Ausbildung muss ein Privatpilot für die Erlangung der Sichtfluglizenz nachweisen, dass er die Flughöhe bis auf ± 150 ft genau einhalten kann. Der Steuerkurs und auch der Kurs über Grund dürfen nicht mehr als $\pm 10^\circ$ vom Sollwert abweichen. [9]

2.5.2 Berufspilotenlizenz

Ein Berufspilot (ohne Instrumentenflugberechtigung) muss im Sichtflug die Flughöhe bis auf ± 100 ft genau einhalten können. Der Steuerkurs und auch der Kurs über Grund müssen bis auf $\pm 10^\circ$ genau eingehalten werden. [9]

2.5.3 Instrumentenflugberechtigung

Die Instrumentenflugberechtigung stellt eine Ergänzung der zugrunde liegenden Privatpiloten- oder Berufspilotenlizenz dar. Sie erlaubt den Flug nach Instrumentenflugregeln. Die Flughöhe muss bis auf ± 100 ft genau eingehalten werden können. Der Steuerkurs und auch der Kurs über Grund müssen bis auf $\pm 5^\circ$ genau eingehalten werden. [9]

2.6 Turbulenz und Windscherung

Tabelle 2.1 stellt die Bewertung von Turbulenz und Windscherung anhand ihrer Auswirkungen auf ein mittelgroßes Verkehrsflugzeug dar. Änderungen der Strömung der das Flugzeug umgebenden Luft, die kürzer als 3 s dauern, werden allgemein als Turbulenz bezeichnet. Zur Klassifizierung der Turbulenz wird im Allgemeinen die Auswirkung auf das Luftfahrzeug, das heißt die auftretenden Beschleunigungen und die Steuerbarkeit, betrachtet. Häufig sind dies von Piloten subjektiv berichtete Werte. Mit der zunehmend besser werdenden Messtechnik wird aktuell der abstraktere Wert der Eddy Dissipation Rate (*EDR*) eingeführt. Für handlichere Werte wird in der Luftfahrt die dritte Wurzel des *DER*-Wertes verwendet. Die *EDR* gibt an, wie viel turbulente kinetische Energie in einem bestimmten Volumen in einer bestimmten Zeit in Wärme umgewandelt wird (das heißt „verloren geht“). Dieser Wert lässt direkte, objektive Rückschlüsse auf die tatsächlich vorhandene Turbulenz zu. [10]

Änderungen des Strömungsfeldes der Luft, die über eine längere Zeitdauer erfolgen, werden als Windscherung bezeichnet. Woodfield definierte hierfür 1990 den Zeitbereich von 3 s bis 40 s [11]. Hierbei müssen folgende Phänomene unterschieden werden:

- Änderung des horizontalen Windes in horizontaler Richtung (dauerhaft) – horizontale Windscherung
- zeitliche Änderung des horizontalen Windes in horizontaler Richtung - Böe
- Änderung des horizontalen Windes in vertikale Richtung – vertikale Windscherung
- räumlich begrenzte vertikale Luftbewegung – Ab-/Aufwind

Alle Quellen stimmen darin überein, dass bereits ab „moderat“ einzustufende Winderscheinungen eine signifikante Erhöhung der Arbeitsbelastung der Piloten wegen des notwendigen Aussteuerns der Störung zur Folge haben. Die Bereichsgrenzen für Turbulenz und Windscherung ergeben sich aus den Auswirkungen auf ein mittelgroßes Verkehrsflugzeug. [12]

Quellen Daten der Tabelle 2.1: [13], [14], [15], [16], [17]

Klassifikation	Beschleunigung	Beschreibung	Eddy Dissipation Rate	Böe	vertikale Wind-scherung	Ab-/Aufwind	horizontale Windscherung
	[Vielfache der Erdbeschleunigung]		[m ^{2/3} /sec]	[m/sec]	[m/sec /30m]	[m/sec]	[m/sec /600m]
sehr schwer		Luftfahrzeug wird heftig geschüttelt, Steuerung bereitet extreme Schwierigkeiten, Kontrollverlust und struktureller Schaden möglich		>15	mehr als 6	mehr als 6	mehr als 6
schwer	größer 1,0	Flugzeugsteuerung wird schwierig, Gefahr in niedrigen Höhen; große abrupte Änderungen der Höhe und Lage, große Änderungen der Fluggeschwindigkeit, Schwierigkeiten Instrumente abzulesen; lose Gegenstände werden gefährlich	größer 0,7	11 bis 15	4 bis 6	4 bis 6	4 bis 6
moderat	0,5 bis 1,0	Turbulenz ist signifikant; starke ununterbrochene, unangenehme Rucks mit Höhenänderungen, Fluktuationen der Geschwindigkeitsanzeige; Luftfahrzeug bleibt unter Kontrolle	0,4 bis 0,7	6 bis 11	2 bis 4	2 bis 4	2 bis 4
leicht	0,15 bis 0,5	leichte, definierte Schläge auf das Luftfahrzeug ohne signifikante Änderungen in der Fluglage und Flughöhe	0,1 bis 0,4	1,5 bis 6	0 bis 2	0 bis 2	0 bis 2
sehr leicht	kleiner 0,05	Kleine Bewegungen in der Längs- und Querneigung und um die Gierachse		kleiner 1,5			
keine			kleiner 0,1				

Tabelle 2.1: Klassifikation von Windscherung und Turbulenz

2.7 Rechtliche Grundlagen für die Berücksichtigung von Luftfahrthindernissen, insbesondere Bauwerken, in der Umgebung von Flugplätzen

Die Errichtung von Bauwerken im Umkreis von Flugplätzen kann zu einer Gefährdung des von ihnen ausgehenden und in ihrer Umgebung stattfindenden Luftverkehrs führen und ihre Nutzbarkeit einschränken oder sogar ausschließen.

Die nachfolgend dargestellten rechtlichen Regelungen sollen dazu dienen, mögliche Konflikte zwischen Flugplätzen und einer in ihrer Umgebung heranrückenden Bebauung in angemessener Weise zu lösen.

2.7.1 Bauschutzbereich gemäß § 12 und § 17 Luftverkehrsgesetz

Zur Abwehr von Gefahren für die Sicherheit des Luftverkehrs und zum Schutz der Allgemeinheit bestimmt das Luftverkehrsgesetz (*LuftVG*) in Deutschland für Flughäfen (Zulassung nach § 38 ff Luftverkehrszulassungsordnung) bereits als Voraussetzung ihrer Genehmigung die Festlegung von Bauschutzbereichen.

Nach § 12 *LuftVG* dürfen in der Nähe eines Flughafens Hindernisse im Bereich der Start- und Landeflächen, dem Sicherheitsstreifen und innerhalb eines Kreises mit 1,5 km Radius um den Flugplatzbezugspunkt nur mit Zustimmung der Luftfahrtbehörden genehmigt werden, wobei ausschließlich luftverkehrssicherheitliche Erwägungen eine Rolle spielen dürfen.

In einem Umkreis von 4 km Radius um den Flugplatzbezugspunkt benötigen Bauwerke über 25 m Höhe eine Genehmigung (bezogen auf die Höhe des Flugplatzbezugspunktes). Zwischen 4 km und 6 km steigt diese Höhe linear von 45 m auf 100 m an.

Weitere Beschränkungen liegen in den An- und Abflugsektoren vor. Die Anflugsektoren beginnen an den Außenkanten der Sicherheitsfläche und werden in Startbahnrichtung mit einem Öffnungswinkel von 15° bis in eine Entfernung von 15 km für Hauptstart- und Hauptlandebahnen verlängert. Für Nebenstart- und Nebenlandeflächen sind sie 8,5 km lang. Sie steigen dabei

für Hauptstart- und -landebahnen bis 10 km und für Nebenstart- und -landebahnen von ihrem Höhenniveau am Ende der Sicherheitsflächen bis zu einer Höhe von 100 m über dieser Höhe an. Für Hauptstart- und -landebahnen sind sie darüber hinaus noch von 10 km bis 15 km in einer Höhe von 100 m verlängert. Der Bauschutzbereich wird für Flughäfen automatisch eingerichtet.

Das Prinzip und die Anlage eines Bauschutzbereiches für Flughäfen nach § 12 *LuftVG* verdeutlicht die nachfolgende isometrische Darstellung.

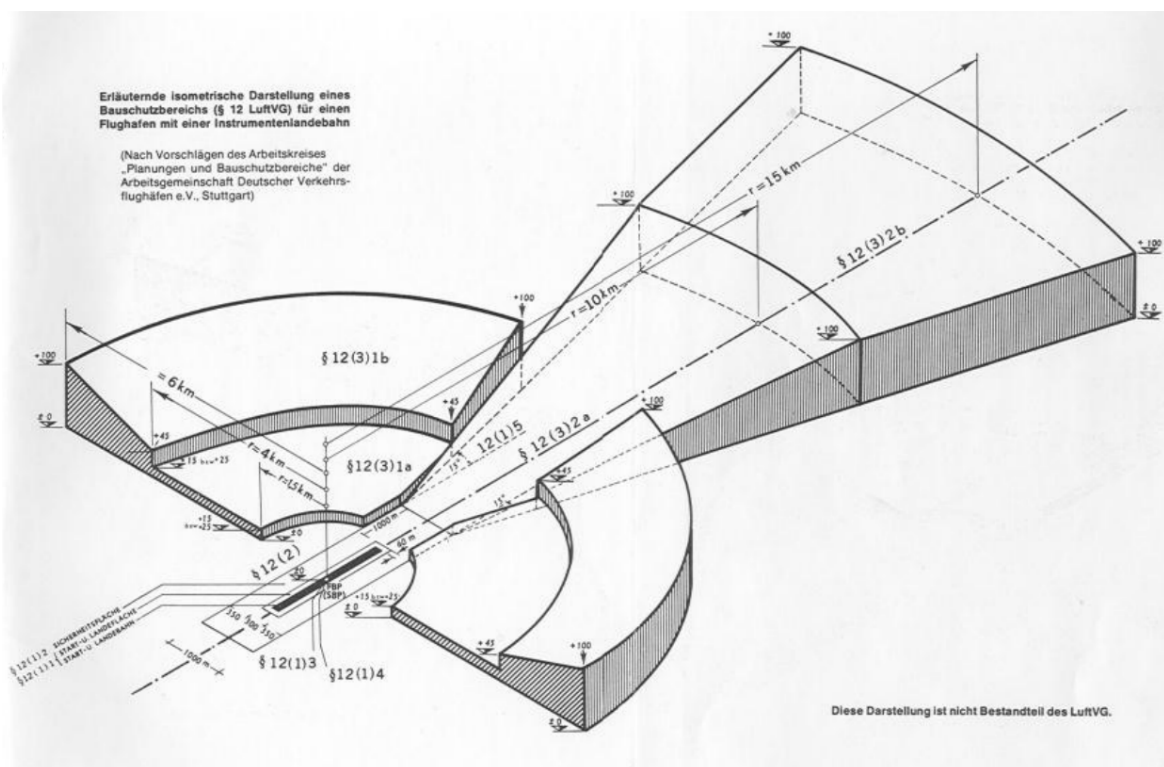


Abbildung 2.1: Bauschutzbereich LuftVG §12 (Quelle: [18])

Nach § 17 *LuftVG* können auch für Landeplätze und Segelflugplätze (Zulassung nach § 49 ff Luftverkehrszulassungsordnung) bei ihrer Genehmigung beschränkte Bauschutzbereiche eingerichtet werden.

Danach darf die für eine Baugenehmigung zuständige Behörde für Bauwerke im Umkreis von 1,5 km um den Flugplatzbezugspunkt eine Baugenehmigung nur mit Zustimmung der Luftfahrtbehörde erteilen. Gleiches gilt nach der Neufassung des *LuftVG* im Jahr 2012 auch für Bauwerke, die eine Höhe von

25 m über der Flugplatzbezugshöhe in einem Umkreis von 4 km, bezogen auf den Flugplatzbezugspunkt, überschreiten.

Die Entscheidung über die Einrichtung eines beschränkten Bauschutzbereiches trifft die zuständige Luftfahrtbehörde nach eigenem Ermessen. Ein Anspruch auf die Einrichtung eines beschränkten Bauschutzbereiches besteht nicht. Die im Jahr 2012 erfolgte Erweiterung der beschränkten Bauschutzbereiche über den 1,5 km - Radius hinaus, soll auch explizit für bestehende Plätze gelten und eine Erweiterung des bereits bestehenden beschränkten Bauschutzbereiches ermöglichen.

2.7.2 Allgemeiner Luftraum

Ein Zustimmungsvorbehalt der Luftfahrtbehörden gilt nach § 14 *LuftVG* auch für die Errichtung von Bauwerken und baulichen Anlagen außerhalb eines Bauschutzbereiches, wobei wiederum eine Differenzierung nach deren Höhe und Entfernung vom Flugplatz maßgeblich ist. Unter anderem benötigen Bauwerke über 100 m über dem Erdboden eine Zustimmung der zuständigen Luftfahrtbehörde.

Bei Flugplätzen, an denen auch Flüge nach Instrumentenflugregeln stattfinden, sieht § 18b *LuftVG* außerdem Informationspflichten der zuständigen Luftfahrtbehörden gegenüber dem Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung über Bauwerke vor, die in Bereichen errichtet werden sollen, die für die Einrichtung und Überwachung von Verfahren für Flüge nach Instrumentenflugregeln aus Gründen der Hindernisfreiheit zu bewerten sind (Hindernisinformationsbereiche).

Maßgeblich ist, dass die Sicherheit des Luftverkehrs hierdurch nicht beeinträchtigt wird. Es ist sogar die Möglichkeit des Entfernens eines Luftfahrthindernisses vorgesehen.

Die Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen muss geduldet werden.

2.7.3 Hindernisfreiflächen gemäß verwaltungsrechtlicher Regelungen

Neben den gesetzlichen Bestimmungen des Luftverkehrsgesetzes zur Freihaltung des Luftraums von Hindernissen sehen die „Richtlinien für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb“ und die „Richtlinien über die Hindernisfreiheit für Start- und Landebahnen mit Instrumentenflugbetrieb“ Hindernisfreiflächen in der Umgebung von Flugplätzen vor. Diese Richtlinien sind verbindliche verwaltungsrechtliche Regelungen für die Luftfahrt und werden in den Nachrichten für Luftfahrer (NfL), herausgegeben von der Deutschen Flugsicherung (DFS) veröffentlicht.

2.7.3.1 Hindernisfreiflächen Sichtflug

Für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb gilt die NfL 1 92/13 vom 02.05.2013. Sie beruht auf Empfehlungen der ICAO Annex 14 Band I, „Flugplätze“ zum Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt. Ziffer 1.4 dieser NfL sieht vor, dass ICAO Anhang 14 gilt, soweit Einzelheiten in diesen Richtlinien nicht geregelt sind.

Die Größe der in dieser NfL festgelegten Hindernisfreiflächen richtet sich nach einer Kennzahl, die durch die Länge der Start- und Landebahn und die Merkmale der Flugzeuge, für die der Platz vorgesehen ist, bestimmt wird.

Die Anforderungen an die Hindernisfreiflächen sind dabei in den „Richtlinien für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb“ wie folgt definiert:

„Anforderungen an die Hindernisfreiheit

Die Start- und Landebahn und der sie umgebende Streifen sind von aufragenden Bauwerken, Vertiefungen und sonstigen Hindernissen freizuhalten. Hiervon sind Einrichtungen auf den Streifen ausgenommen, wenn sie dort zur sicheren Durchführung des Flugbetriebs notwendig sind. In diesem Fall müssen die Einrichtungen, soweit mit ihrer Zweckbestimmung vereinbar, möglichst weit von der S/L-Bahn entfernt, so niedrig wie möglich und so konstruiert sein, dass sie anstoßenden Luftfahrzeugen einen möglichst geringen Widerstand entgegensetzen.

Bauwerke/Objekte sollen die An- und/oder Abflugflächen sowie die seitlichen Übergangsflächen nicht durchstoßen.

Existierende Hindernisse, die die genannten Flächen durchstoßen, sind wenn möglich zu entfernen.

Ausnahmen bilden Bauwerke/Objekte, die von bestehenden nicht entfernbar Hindernissen abgeschattet werden.

In die äußere Hindernisbegrenzungsfläche sollten keine Bauwerke und sonstigen Erhebungen hineinragen, die nach den örtlichen Verhältnissen die sichere Durchführung des Flugbetriebs gefährden können.“

Nachfolgend eine Beschreibung der Hindernisfreiflächen an einem Landeplatz:

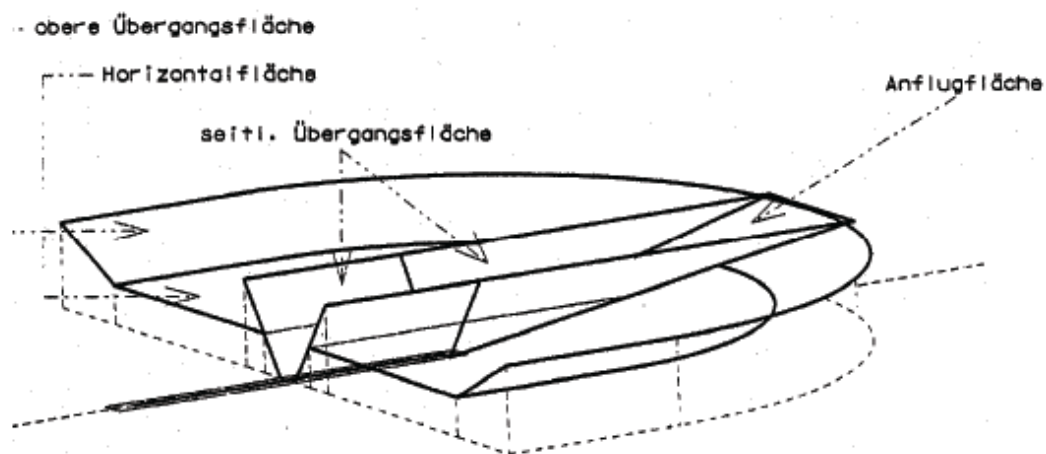


Abbildung 2.2: NfL 1 92/13 genaue Beschreibung der Isometrie (Quelle: [19])

In vorangehender Abbildung ist der Aufbau von Hindernisfreiflächen für einen Landeplatz dargestellt. Die Fläche besteht aus einem inneren Bereich und einem äußeren Bereich.

Der innere Bereich ist begrenzt durch die An- und Abflugflächen und die seitlichen Übergangsflächen. Die An- und Abflugflächen sind beschrieben durch eine Länge, beginnend mit mindestens 30 m Abstand zum Beginn der Landebahn (60 m bei Landebahnen >1800 m Länge) und der Breite des Sicherheitsstreifens, eine Neigung ihrer Unterseite gegenüber der Horizontalen und eine Divergenz ihrer seitlichen Ränder, also der Aufweitung mit zunehmender Entfernung von der Bahn. Die seitlichen Übergangsflächen steigen von dem Sicherheitsstreifen der Bahn beziehungsweise der seitlichen Begrenzung der An- und Abflugflächen mit einer Neigung von 1:5 (1:7 bei Bahnlängen >1800 m) bis auf eine Höhe von 100 m an.

Um die inneren Hindernisbegrenzungsflächen schließt sich die äußere Hindernisbegrenzungsfläche an. Diese besteht aus einer Horizontalfläche und einer oberen Übergangsfläche. Die Horizontalfläche umgibt die innere Hindernisbegrenzungsfläche als horizontale Ebene in einer Höhe von 45 m über dem Flugplatzbezugspunkt. Die horizontale Ausdehnung ist durch Radien (siehe Tabelle 2.2) begrenzt. Hieran schließt sich wiederum die obere

Übergangsfläche an. Diese steigt mit einer Neigung von 1:20 bis auf eine Höhe von 100 m über dem Flugplatz an.

Tabelle 2.2: Größe und Ausdehnung der Hindernisfreiflächen (Quelle: [20])

Länge Start- und Landebahn	An- und Abflugfläche			Horizontalebene in m
m	Neigung	Länge in m	Divergenz	
<800	1:20	2000	10%	2000
800 bis <1200	1:25	2500	10%	2500
1200 bis <1800	Anflug: 1:30 Abflug: 1:50	Anflug: 3000 Abflug: 15.000	12,5%	3600

In Abbildung 2.3 auf nachfolgender Seite ist exemplarisch eine grafische, bemaßte Darstellung der Hindernisfreiflächen eines Flugplatzes mit Sichtflugbetrieb und einer Start- und Landebahn der Länge zwischen 800 m und 1200 m (Kennzahl 2) abgebildet.

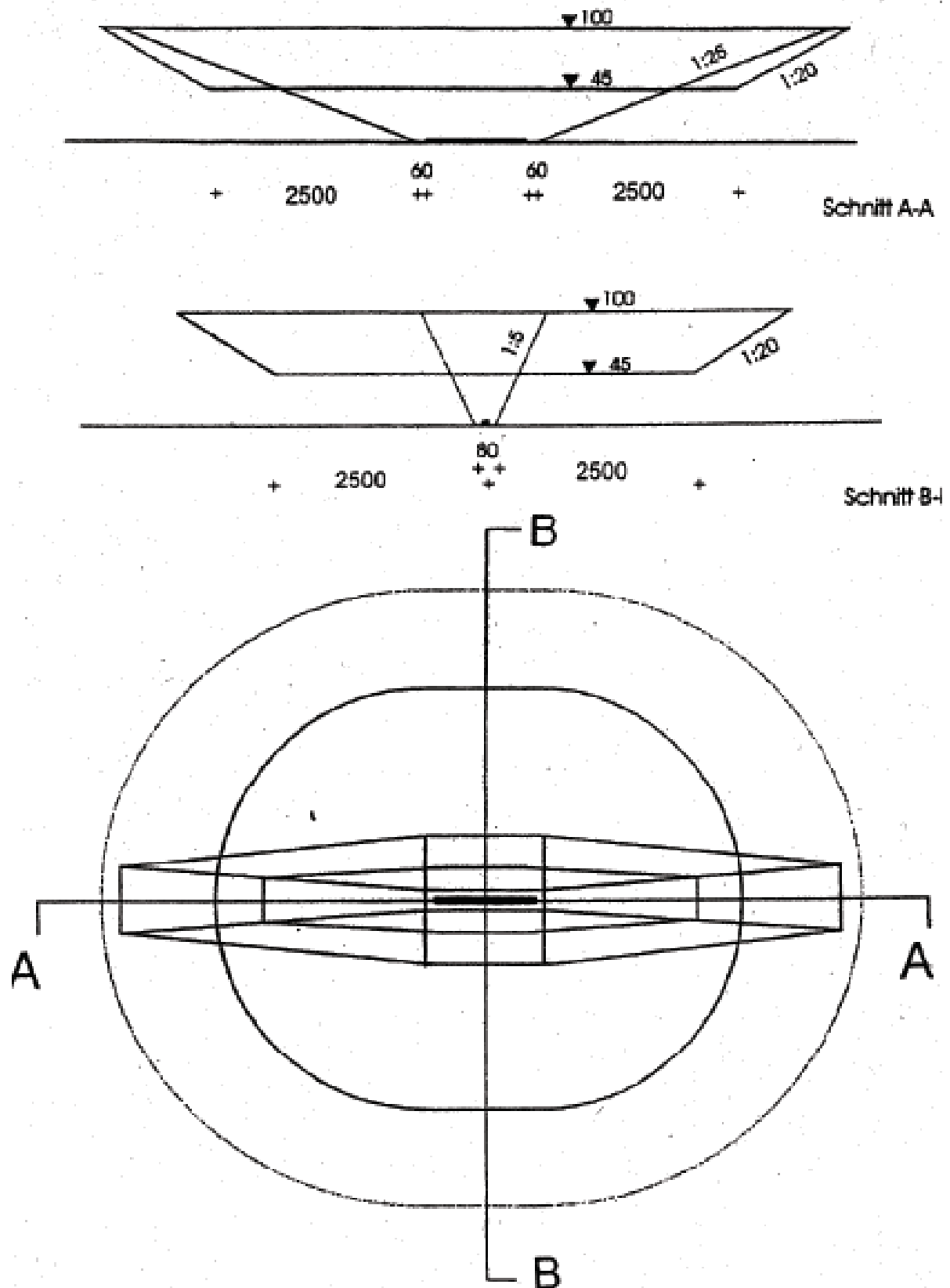


Abbildung 2.3: Hindernisbegrenzungsflächen VFR Landebahn der Länge zwischen 800 m und 1200 m (Quelle: [19])

Neben den nachfolgend detailliert beschriebenen Hindernisfreiflächen wurde im Jahr 2015 in diese NfL folgende Bestimmung zur Abwehr von Gefahren durch Bauwerke für den Flugplatzverkehr in der Platzrunde aufgenommen:

„6) Unbeschadet der Anforderungen der Hindernisbegrenzung sollen im Bereich der Platzrunden keine Hindernisse vorhanden sein, die die sichere Durchführung des Flugplatzverkehrs gefährden können. Von einer Gefährdung des Flugplatzverkehrs in der Platzrunde ist grundsätzlich dann auszugehen, wenn relevante Bauwerke oder sonstige Anlagen innerhalb der geplanten oder festgelegten Platzrunde errichtet werden sollen oder wenn in anderen Bereichen relevante Bauwerke oder sonstige Anlagen einen Mindestabstand von 400 Metern zum Gegenanflug von Platzrunden und / oder 850 Metern zu den anderen Teilen von Platzrunden (inkl. Kurventeilen) unterschreiten. Die Beurteilung im Einzelfall, ob und in wieweit Bauwerke oder sonstige Anlagen die Durchführung des Flugplatzverkehrs beeinträchtigen, soll auf der Grundlage einer Stellungnahme der Flugsicherungsorganisation erfolgen.“

Somit ist eine Empfehlung der DFS aus dem Jahr 2001, die sich insbesondere auf Windkraftanlagen in der Umgebung von Flugplätzen ohne Bauschutzbereich bezog, zu einer verwaltungsrechtlich bindenden Regelung geworden.

Ergänzend kann auf „Grundsätze des Bundes und der Länder für die Regelung des Flugverkehrs an Flugplätzen ohne Flugverkehrskontrollstellen“ vom 03.04.2000 (NfL II 37/00), geändert durch die NfL II 71/00, verwiesen werden.

Für die Hindernisfreiheit an Segelflugplätzen und ihrer Umgebung gelten nach wie vor die Richtlinien für die Genehmigung der Anlage und des Betriebs von Segelfluggeländen vom 23.05.1969 in NfL I 129/69.

2.7.4 Hindernisfreiflächen Instrumentenflug

Zum Schutz des Instrumentenfluges existieren neben den bekannten Freiflächen des Sichtfluges (wenn auch mit größeren Dimensionen) einige weitere Freiflächen mit höheren Anforderungen an die Hindernisfreiheit. Daneben müssen unterschiedliche Maße zwischen Präzisions- und Nichtpräzisionsanflugverfahren beachtet werden.

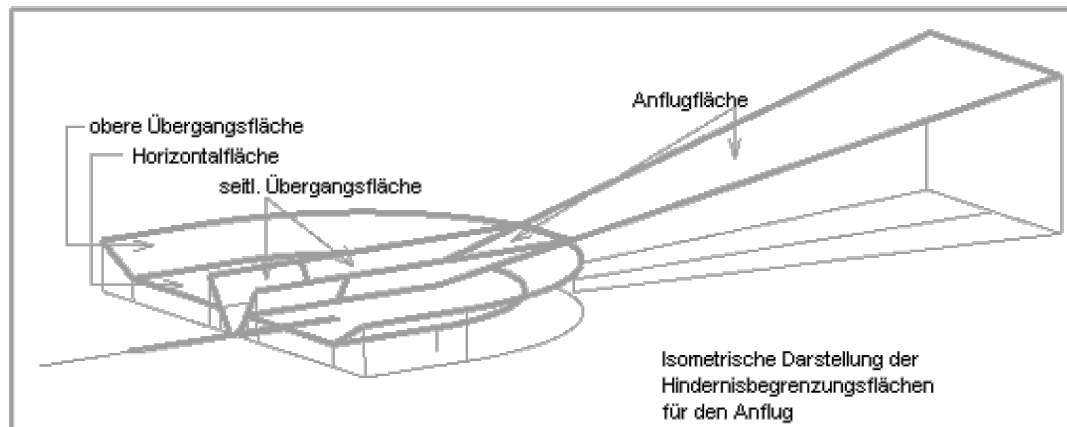


Abbildung 2.4: Hindernisfreiflächen Instrumentenanflug (Quelle: [21])

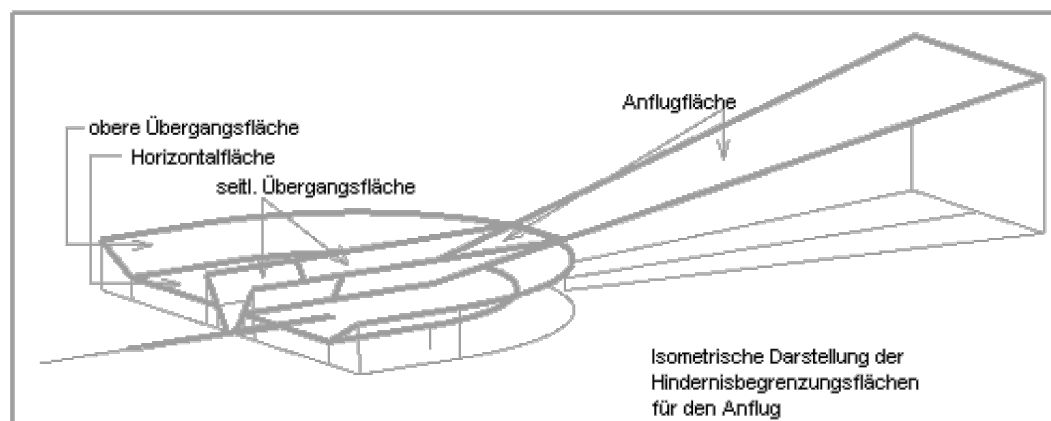


Abbildung 2.5: Hindernisfreiflächen Instrumentenabflug (Quelle: [21])

Für An- und Abflugflächen, sowie die seitlichen Übergangsflächen, gilt nach den Richtlinien über die Hindernisfreiheit für Start- und Landebahnen mit Instrumentenflugbetrieb:

„Bauwerke/Objekte sollen die An- und/oder Abflugflächen sowie die seitlichen Übergangsflächen nicht durchstoßen.“

Existierende Hindernisse, die die genannten Flächen durchstoßen, sind, wenn möglich, zu entfernen.“

Wie aus Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 zu erkennen ist, sind die Hindernisfreiflächen für den Instrumentenflug sehr ähnlich zu den Freiflächen des Sichtfluges mit dem bedeutenden Unterschied, dass lange Korridore, die deutlich über die Übergangsflächen des Flugplatzes sowohl in ihrer Höhe als auch in ihrer Länge hinausgehen, vorhanden sind. Für weitere Details wird auf NfL 328/01 verwiesen.

2.7.5 Verordnung der europäischen Kommission

Am 12. Februar 2014 ist die VO 139/2014 „zur Festlegung von Anforderungen und Verwaltungsverfahren in Bezug auf Flugplätze“ in Kraft getreten. Diese regelt unter anderem den Schutz und die Überwachung der Flugplatzumgebung (Artikel 8 und 9).

„Artikel 8

Schutz der Flugplatzumgebung

- (1) Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass Konsultationen durchgeführt werden hinsichtlich der Sicherheitsauswirkungen geplanter Bauwerke innerhalb der Hindernisbegrenzungs- und -schutzflächen sowie anderer mit dem Flugplatz in Zusammenhang stehender Flächen.*
- (2) Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass Konsultationen durchgeführt werden hinsichtlich der Sicherheitsauswirkungen geplanter Bauwerke außerhalb der Hindernisbegrenzungs- und -schutzflächen sowie anderer mit dem Flugplatz in Zusammenhang stehender Flächen, die die von den Mitgliedstaaten festgelegte Höhe überschreiten.*
- (3) Die Mitgliedstaaten stellen die Koordinierung des Schutzes von Flugplätzen sicher, die in der Nähe von Landesgrenzen zu anderen Mitgliedstaaten gelegen sind.*

Artikel 9

Überwachung der Flugplatzumgebung

Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass Konsultationen durchgeführt werden hinsichtlich Tätigkeiten von Menschen und hinsichtlich der Flächennutzung z. B.:

- a) Baumaßnahmen oder Änderungen der Flächennutzung im Umfeld des Flugplatzes;*
- b) Baumaßnahmen, die durch Hindernisse verursachte Turbulenzen mit sich bringen können, welche eine Gefahr für den Flugbetrieb darstellen können;*

[...]“ [22]

Somit sind die Mitgliedstaaten gefordert und angehalten, die Bauschutzbereiche und Hindernisfreiflächen zu überwachen. Sie sollen hierbei auch explizit Turbulenzen berücksichtigen, die durch das Hindernis entstehen und den Luftverkehr gefährden können.

2.7.6 ICAO Obstacle Limitation Surfaces

Die ICAO hat im Annex 14 (Aerodrome Design and Operations) und im ICAO Airport Services Manual (Doc 9137) Part 6 eigene Vorgaben veröffentlicht, wie Hindernisfreiflächen für eine sichere und sinngemäße Nutzung eines Flugplatzes gestaltet sein sollen. Wie in der deutschen Gesetzgebung, sollen An- und Abflugflächen vollständig freigehalten werden von Hindernissen. In die äußeren Begrenzungsflächen dürfen Hindernisse nur dann reinragen, wenn der Luftverkehr hierdurch nicht negativ beeinflusst wird. [23] [24]

Eine Grafik über die einzelnen Elemente ist auf Seite 26 zu sehen.

Für Flugplätze mit Sichtflugbetrieb sind die wie folgt bezeichneten Elemente der Hindernisfreiflächen relevant: conical surface, approach, inner horizontal surface, take-off climb surface, transitional surface.

Diese Flächen entsprechen von ihrer Definition her den bekannten deutschen Hindernisfreiflächen (deutsche Bezeichnung in Klammern):

inner horizontal surface (Horizontalfäche):

Eine Fläche mit einem definierten Radius und einer definierten Höhe über dem Flugplatzbezugspunkt.

conical surface (obere Übergangsfläche):

Eine Fläche, die mit definiertem Winkel gegenüber der Horizontalen, ausgehend vom Rand der inneren horizontal kreisförmig nach außen bis zu einer bestimmten Endhöhe ansteigt.

approach surface (Anflugfläche):

Die approach surface beginnt ausgehend von einem bestimmten Abstand vor dem Anfang der Landebahn mit einer definierten Breite und steigt in Verlängerung der Landebahn unter einem definierten Winkel gegenüber der Horizontalen bis zu einer bestimmten Entfernung an. Die Seitengrenzen beginnen an dem Bahnende und divergieren dabei mit zunehmender Entfernung unter einem bestimmten Winkel. Die Möglichkeit der Berücksichtigung eines gekurvten Anflugs ist vorgesehen.

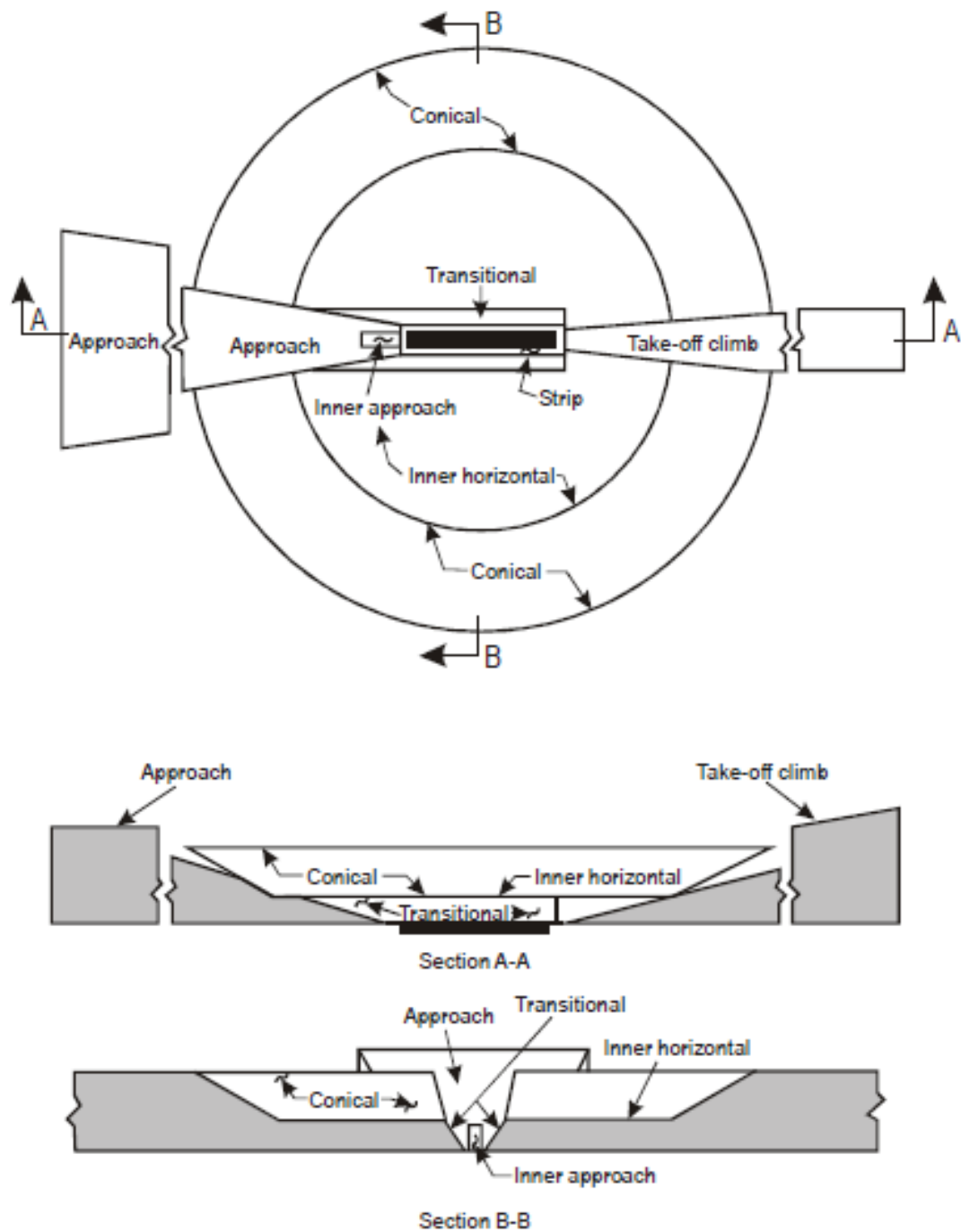
take-off climb surface (Abflugfläche):

Die take-off climb surface beginnt ausgehend von einem bestimmten Abstand vom Ende der Startbahn mit einer definierten Breite und steigt in Verlängerung der Landebahn unter einem definierten Winkel gegenüber der Horizontalen bis zu einer bestimmten Entfernung an. Die Seitengrenzen beginnen an dem Bahnende und divergieren dabei mit zunehmender Entfernung unter einem bestimmten Winkel auseinander. Die Möglichkeit einen gekurvten Anflug zu berücksichtigen ist vorgesehen.

transitional surface (seitliche Übergangsflächen):

Die transitional surfaces schließen sich an die Seitengrenzen der approach surface, take-off climb surface und den Sicherheitsflächen entlang der Start- und Landebahn an. Sie steigen divergierend parallel zur Mittellinie der Start-

und Landebahn mit 20 % für Bahnlängen unter 1800 m und mit 14,3 % für längere Bahnlängen bis auf eine definierte Höhe an.



See Figure 4-2 for inner transitional and balked landing obstacle limitation surfaces and Attachment B for a three-dimensional view

Abbildung 2.6: Hindernisfreiflächen (Quelle: ICAO Annex 14)

[25]

Tabelle 2.3: Größe und Ausdehnung der Hindernisfreiflächen (Quelle: [26])

Länge Start- und Landebahn	An- und Abflugfläche			äußere Hindernisbe- grenzungsfläche		conical
	Neigung	Länge	Divergenz	Radius in m	Höhe in m	Höhe in m
<800	1:20	Anflug: 2000 Abflug: 1600	10%	2000	45	35
800 bis <1200	1:25	2500	10%	2500	45	55
1200 bis <1800	Anflug: 1:30 Abflug: 1:50	Anflug: 3000 Abflug: 15.000	Anflug: 10% Abflug: 12%	4000	45	75
>1800	Anflug: 1:40 Abflug: 1:50	Anflug: 3000 Abflug: 15.000	Anflug: 10% Abflug: 12%	4000	45	100

2.7.7 Visual Segment Surface

Im Rahmen von Instrumentenanflügen gibt es an Landeplätzen eine sogenannte Visual Segment Surface nach ICAO doc 8168 (PANS-OPS) [27]. Diese verbindet den die Landebahn umgebenden Sicherheitsstreifen mit der Hindernisfreihöhe eines Instrumentenanfluges. Sie schützt den letzten Abschnitt eines Nicht-Präzisions-Instrumentenanfluges, der nach Sicht durchgeführt wird, vor Hindernissen. Diese Fläche steigt abhängig vom Anfluggradienten mit einem Winkel zwischen $1,9^\circ$ und $2,4^\circ$ an, die seitlichen Ränder divergieren mit 15 %. Diese Fläche muss vollständig frei von Hindernissen bleiben, da andernfalls das zugehörige Anflugverfahren nicht mehr durchgeführt werden darf.

2.7.8 Rücksichtnahmegebot zum Schutz der Hindernisfreiheit in der Umgebung von Flugplätzen

Zur Konfliktlösung zwischen bestehenden Flugplätzen und heranrückender Bebauung hat das Bundesverwaltungsgericht das baurechtliche „Gebot der Rücksichtnahme“ herangezogen (BVerwG 4 C 1 04, Urteil vom 18.11.2004). Es hat hierzu argumentiert, das baurechtliche Gebot, mit Vorhaben auf den luftverkehrsrechtlich genehmigten Betrieb eines Segelflugplatzes Rücksicht zu nehmen, werde nicht durch vorrangige Regelungen des Luftverkehrsgesetzes verdrängt. Welche Anforderungen das Gebot der Rücksichtnahme begründe, hänge von den jeweiligen Umständen ab. Je empfindlicher und schutzwürdiger die Stellung desjenigen sei, dem die Rücksichtnahme im gegebenen Zusammenhang zugute komme, umso mehr könne er an Rücksichtnahme verlangen. Je verständlicher und unabweisbarer die mit dem Vorhaben verfolgten Interessen seien, umso weniger brauche derjenige, der das Vorhaben verwirklichen will, Rücksicht zu nehmen. Für die sachgerechte Beurteilung des Einzelfalles komme es wesentlich auf eine Abwägung an zwischen dem, was einerseits dem Rücksichtnahmebegünstigten und andererseits dem Rücksichtnahmeverpflichteten nach Lage der Dinge zuzumuten sei. Das Bundesverwaltungsgericht hat in diesem Zusammenhang der Priorität der jeweiligen bestehenden Nutzung maßgebliche Bedeutung gegeben. Allerdings müsse geprüft werden, ob der Betrieb eines Segelflugplatzes in einer Weise geändert werden könnte, die „unter Aufrechterhaltung der wesentlichen Nutzungsmöglichkeiten die Sicherheitsrisiken vermeidet“.

Das Obergerverwaltungsgericht Rheinland-Pfalz hatte bereits zu den „wesentlichen Nutzungsmöglichkeiten“ in diesem Fall auch auf den Ausbildungsbetrieb verwiesen (OVG Rheinland-Pfalz, Urteil vom 26.11.2003, 8 A 10814/03.OVG).

In einem weiteren Urteil vom 16.01.2006 hat das OVG Rheinland-Pfalz erwähnt, den durch die luftrechtliche Genehmigung nicht festgelegten Übungsraum an einem Segelflugplatz für schutzwürdig zu halten. Der Schulbetrieb und damit auch die Existenz eines den luftverkehrsrechtlichen Anforderungen entsprechenden Übungsraums in Sichtweite des Flugplatzes sei Bestandteil der bestimmungsgemäßen Nutzung eines Segelfluggeländes.

2.7.9 Zusammenfassung

Abschließend kann festgestellt werden, dass Hindernisfreiflächen in Deutschland durch mehrere, zum Teil nicht deckungsgleiche Regelungen, beschrieben werden. Gegenüber der internationalen Regelung umfassen die nationalen deutschen Regelungen größere Bereiche; allerdings ist das empfohlene vollständige Freihalten der äußeren Begrenzungsflächen in Deutschland nicht vorgesehen. Die größeren Bereiche sind durch die im internationalen Vergleich dichtere Bebauung, das schlechtere Wetter und das höhere Flugaufkommen erklärt.

Zur Darstellung und Wertung dieses Gefährdungspotenzials und zur Prüfung der Frage, ob die bestehenden Konfliktregelungen insbesondere zum Schutz der kleineren Flugplätze der Allgemeinen Luftfahrt noch ausreichend sind, sollen nachfolgende Untersuchungen dienen.

3. Windenergieanlagen

In diesem Kapitel wird der Stand der Windenergieanlagen-Technologie beschrieben. Hierfür wird zuerst ein kurzer Einblick in die Technik und gewöhnliche Bautypen gegeben. Anschließend wird der aktuelle Entwicklungsstand dargestellt.

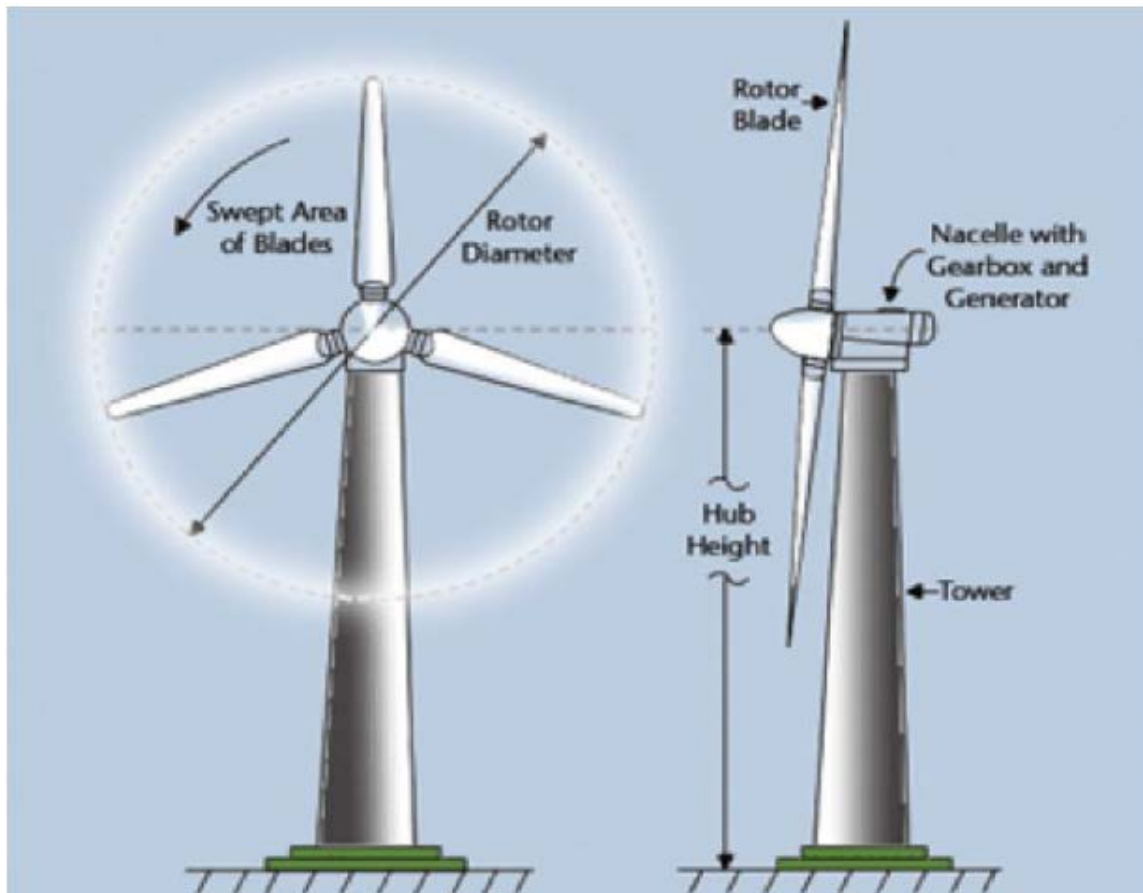


Abbildung 3.1: Beschreibung Windenergieanlage (Quelle: [28])

In Abbildung 3.1 ist eine Prinzipskizze einer modernen Windenergieanlage abgebildet. Die Anlagen bestehen typischerweise aus einem Mast und einem aufgesetzten, drehbaren Generatorgehäuse. Hieran schließt sich mit einer horizontalen Achse ein Dreiblattroter an. Der Anstellwinkel der Rotorblätter ist zur Steuerung der Rotorleistung veränderbar. Der Rotor, vom Wind angetrieben, treibt über eine Welle entweder direkt oder über ein Getriebe die Generatorwelle an. Im Generator wird die mechanische Wellenleistung in elektrische Leistung umgewandelt, die zumeist in das öffentliche Netz eingespeist wird.

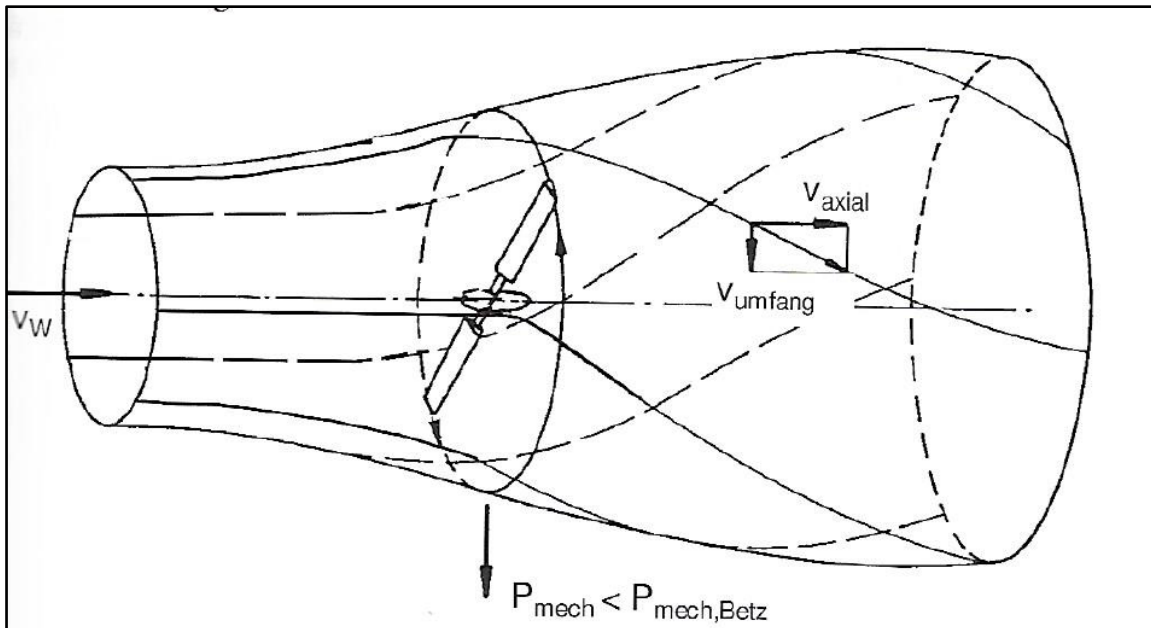


Abbildung 3.2: Fangstromröhre Windenergieanlage (Quelle: [29])

In Abbildung 3.2 ist die Fangstromröhre einer Windenergieanlage dargestellt. Der anströmende Wind wird durch die Leistungsentnahme des Rotors verzögert und erhält einen Drall. Die Fangstromröhre erweitert sich aufgrund der verringerten Abströmgeschwindigkeit und zur Druckrückgewinnung. Die maximale Leistungsausbeute erfolgt, wenn die Abströmungsgeschwindigkeit auf etwa $2/3$ der Anströmungsgeschwindigkeit verzögert wird (Betz-Kriterium). [29]

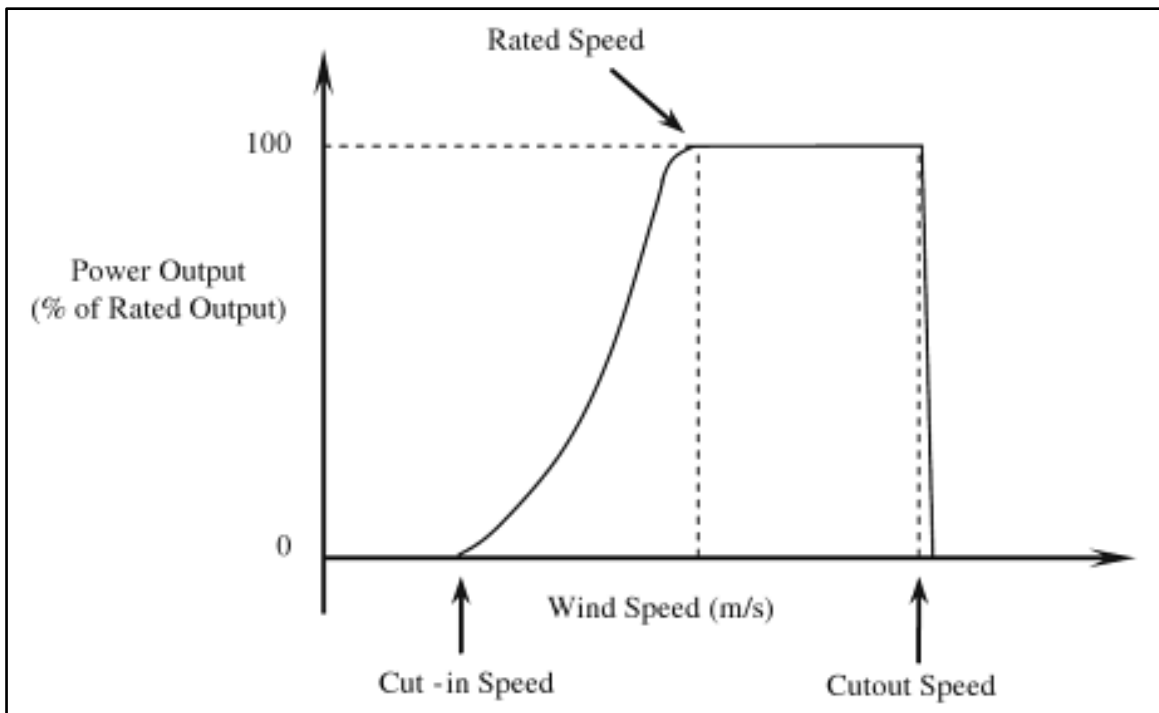


Diagramm 3.1: Elektrische Leistung einer Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Quelle: [29])

Im Diagramm 3.1 ist der typische Leistungsverlauf einer Windenergieanlage über der Windgeschwindigkeit aufgetragen zu sehen. Es gibt eine minimale Windgeschwindigkeit, ab der die Leistungsausbeute der Rotorblätter die anlageninternen Verluste übersteigen und ab der elektrische Energie gewonnen werden kann. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt die Produktion kubisch an, bis ab der Volllastgeschwindigkeit (rated speed) die Anlage durch die mechanische Belastung, das Getriebe oder durch den Generator limitiert ist und kein weiterer Leistungsanstieg möglich ist. Bei dieser Geschwindigkeit ist der Nachlauf auch am stärksten ausgeprägt. Bei einer zu hohen Windgeschwindigkeit wird die Windenergieanlage aus Sicherheitsgründen und Gründen der mechanischen Belastung abgeschaltet.

Im Jahr 2014 hatte die durchschnittliche neu errichtete Windenergieanlage eine maximale elektrische Leistung von 2,7 MW. Rotordurchmesser und Nabenhöhe waren durchschnittlich leicht über 100 m. Dabei ist zu beachten, dass im Binnenland der Rotor und besonders der Mast deutlich größer ausfallen als in Küstengebieten. [30]

Als aktuell (Mitte 2015) größte in Betrieb befindliche Windenergieanlage gilt die Vestas V164-8.0, entwickelt in Zusammenarbeit mit Mitsubishi. Der Rotordurchmesser beträgt 164 m, der Turm hat eine Höhe von 133 m, die Nennleistung beträgt 8,0 MW. [31]

Im Diagramm 3.2 ist die durchschnittliche Leistung der neu in Betrieb genommenen Windenergieanlagen über die Jahre aufgetragen. Gut zu erkennen ist, dass diese stetig zugenommen hat. Auch für die Zukunft ist mit steigender Leistung je Anlage und somit größeren Anlagen zu rechnen.

[32, 33]

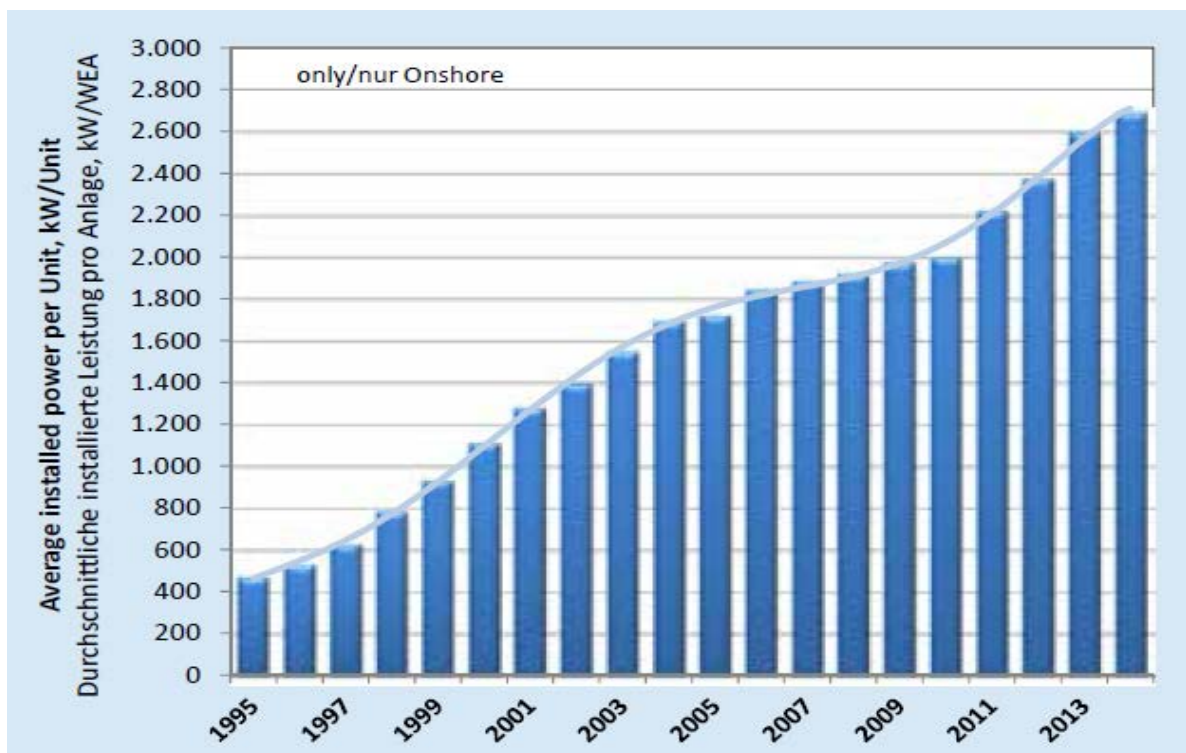


Diagramm 3.2: Durchschnittliche Leistung je Windenergieanlage (Quelle: [33])

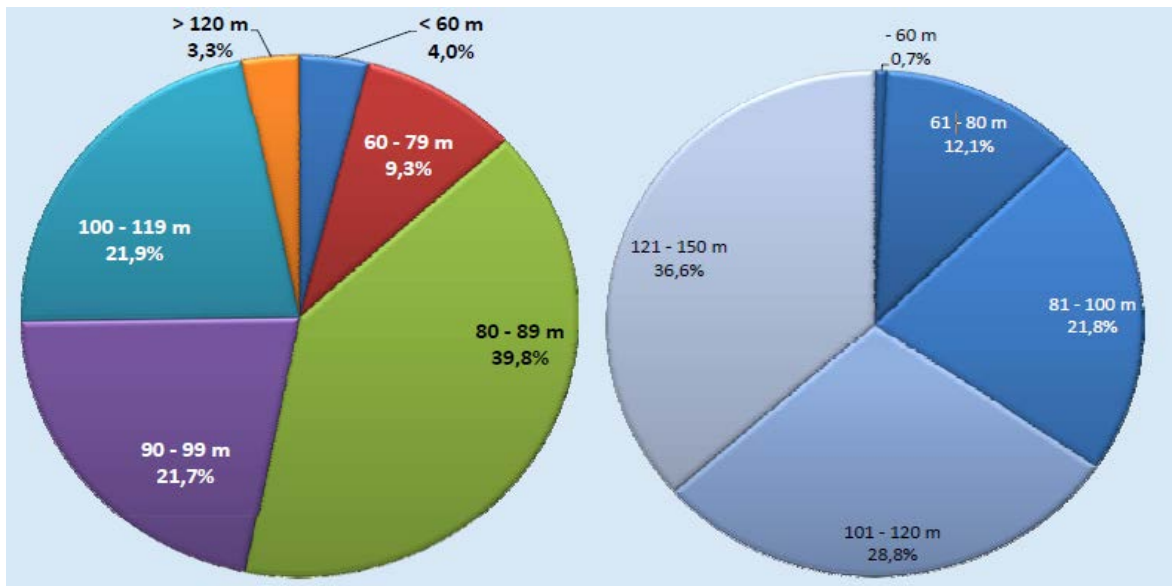


Diagramm 3.3: Durchschnittlicher Rotordurchmesser (links) und Masthöhe (rechts) neu in Betrieb genommener Anlagen im Jahr 2012 (Quelle: [33])

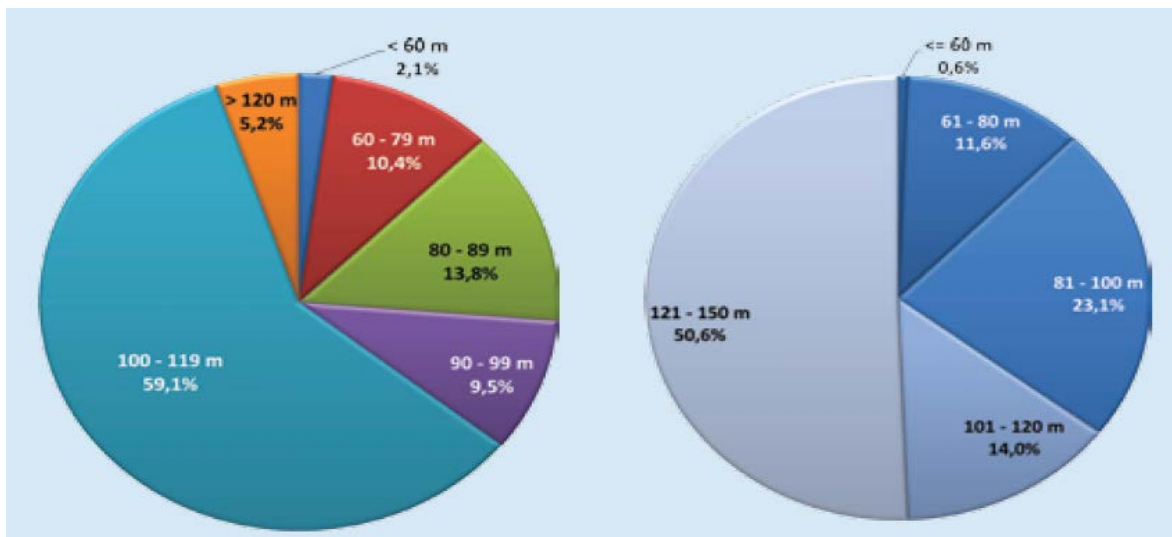


Diagramm 3.4: Durchschnittlicher Rotordurchmesser (links) und Masthöhe (rechts) neu in Betrieb genommener Anlagen im Jahr 2014 (Quelle: [30])

In dem Diagramm 3.3 und dem Diagramm 3.4 ist der Anteil der Rotordurchmesser (links) und der Nabenhöhen (rechts) dargestellt – oben für das Jahr 2012, unten für das Jahr 2014. Ersichtlich ist, dass der meistverwendete Rotordurchmesser von dem Bereich zwischen 80 m bis 89 m auf 100 m bis 119 m zugenommen hat. Bei den Masthöhen waren 2012 noch 101 m bis 120 m genauso wichtig, wie der Größenbereich 121 m bis 150 m (je 25%), 2014 hatte dagegen der Bereich 121 m bis 150 m einen Marktanteil von über 50 %, der von 101 m bis 120 m betrug dagegen nur noch 14 %.

Im Diagramm 3.5 wird der zeitliche Verlauf des Marktanteils einzelner Rotordurchmesser am Gesamtmarkt dargestellt. Zu erkennen ist, dass die wichtigste Rotorgröße mit zunehmender Zeit zunehmend größer geworden ist. 1987 hatte die Klasse <16 m 80 % Marktanteil, 1991 war es die Klasse 22,1 m bis 32 m, 1996 hatte die Klasse 32,1 m bis 48 m 90 % Marktanteil und anschließend, von 2003 bis 2011, hatte die Klasse 60,1 m bis 90 m über 80 % Marktanteil. Seit 2007 gewinnt zunehmend die Klasse über 90,1 m Rotordurchmesser an Marktanteil und ist 2014 bereits die wichtigste Rotordurchmessergröße. Es ist davon auszugehen, dass sich Neuinstallationen für die nächsten Jahre auf diese Größe konzentrieren. Man kann aufgrund der bisherigen Entwicklung jedoch auch davon ausgehen, dass es ab 2020 eine neue, größere Klasse geben wird.

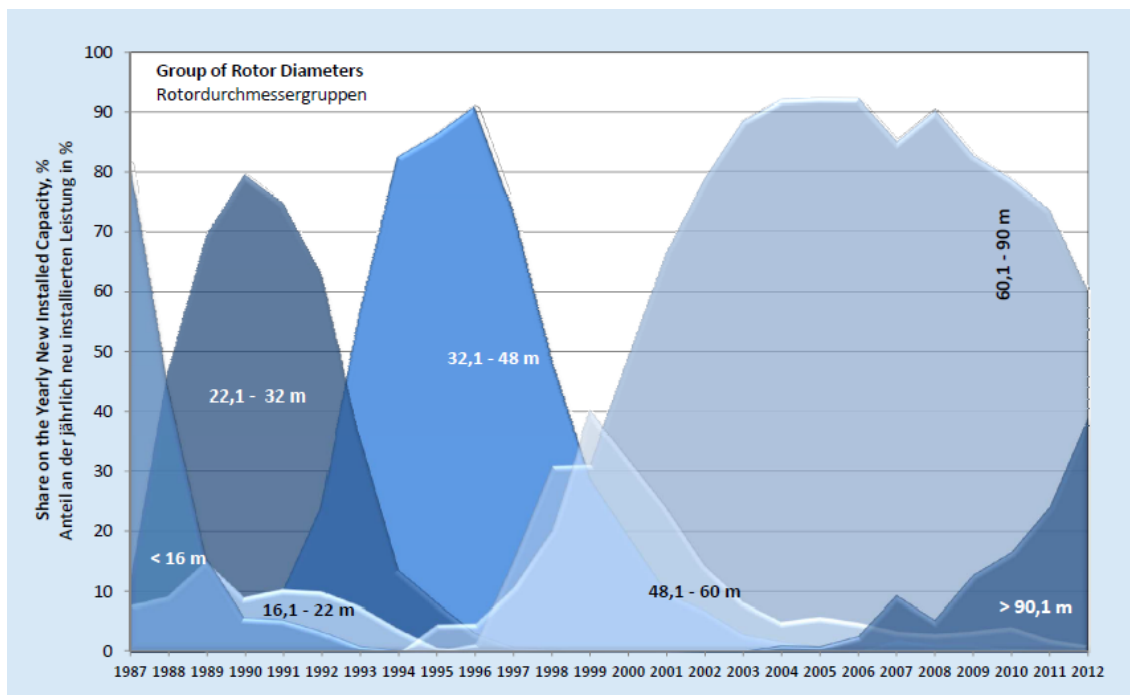


Diagramm 3.5: Entwicklung der Anteile Rotorgrößengruppen über die Zeit
(Quelle: [33])

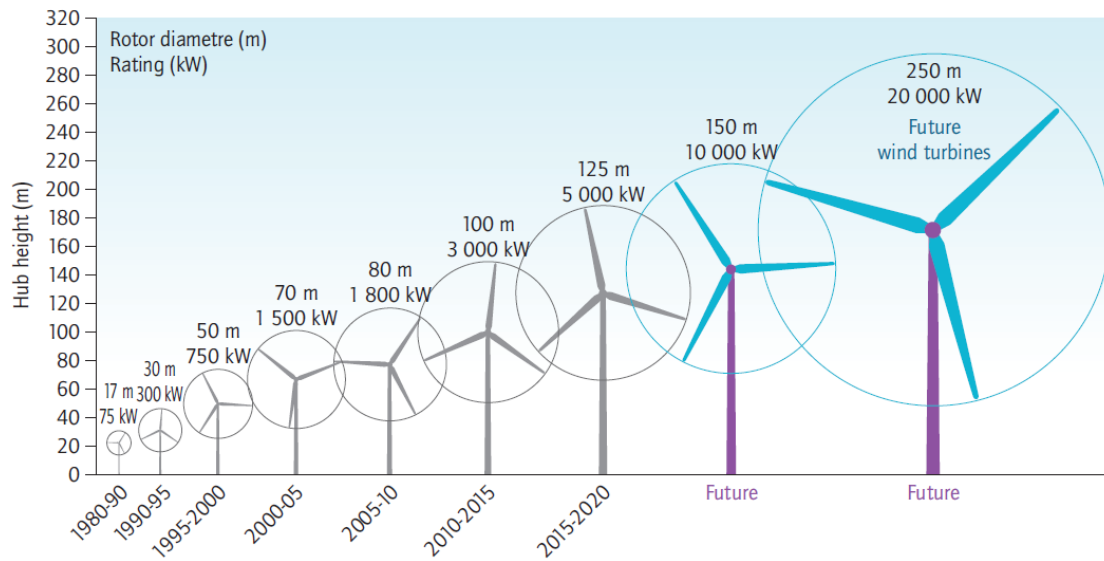


Abbildung 3.3: Entwicklung der Größe der durchschnittlich neu errichteten Windenergieanlagen in der Vergangenheit und Prognose für die Zukunft (Quelle: [34])

Abbildung 3.3 stellt die Entwicklung der Größe der durchschnittlichen Windkraftanlage über die Zeit dar und macht eine Prognose. In naher Zukunft sind Anlagengrößen von 150 m Rotordurchmesser und 10 MW Leistung zu erwarten. Anlagen dieser Größenordnung befinden sich durchaus schon in der Entwicklung. Für die weitere Zukunft sind Anlagen bis 250 m Rotordurchmesser und 20 MW elektrischer Leistung prognostiziert.

4. Flugbetrieb Standardflugplatz

Im Kapitel 4 wird der Flugbetrieb an einem Standardflugplatz vorgestellt. Es wird gezeigt, welche Flugverfahren durch die Verkehrsteilnehmer anzuwenden sind, und welche besonderen Eigenschaften zu berücksichtigen sind. Abschließend wird zusammengefasst, wie die jeweiligen Luftfahrzeugarten sich im Flugbetrieb gegenseitig beeinflussen und welche Maßnahmen für einen sicheren Flugbetrieb existieren.

Die dabei berücksichtigten Verkehrsteilnehmer sind Motorflugzeuge, Hubschrauber, Ultraleichtflugzeuge und Motorsegler im Motorbetrieb, Segelflugzeuge, Ballone, Fallschirmspringer, Gleitschirme und Hängegleiter.

4.1 Motorisierte Luftfahrzeuge

Diese Luftfahrzeuge zeichnen sich im Allgemeinen dadurch aus, unabhängig herrschender Luftbewegungen steigen und die Flugwege über Grund unabhängig von der Thermik wählen zu können.

4.1.1 Platzrunde

Die Platzrunde ist ein standardisiertes An- und Abflugverfahren für Flüge nach Sichtflugregeln. Der Gesetzgeber hat in NfL II 37/00 die Bestimmungen einer Standardplatzrunde für den Motorflug beschrieben.

Aufgaben und Kriterien der Platzrunde, insbesondere explizit veröffentlichter Platzrundenführungen, sind folgende:

- Gewährleistung der Sicherheit im Flugplatzverkehr, insbesondere bei Start und Landung, sowie beim An- und Abflug
- Steuerung und Optimierung des Verkehrsflusses
- Flugführungshilfe für den Piloten im Flugplatzverkehr
- Einteilungshilfe bei der Bedienung des Luftfahrzeuges nach dem Start sowie bei der Vorbereitung und Durchführung der Landung
- Schutz lärmempfindlicher Gebiete rund um den Flugplatz

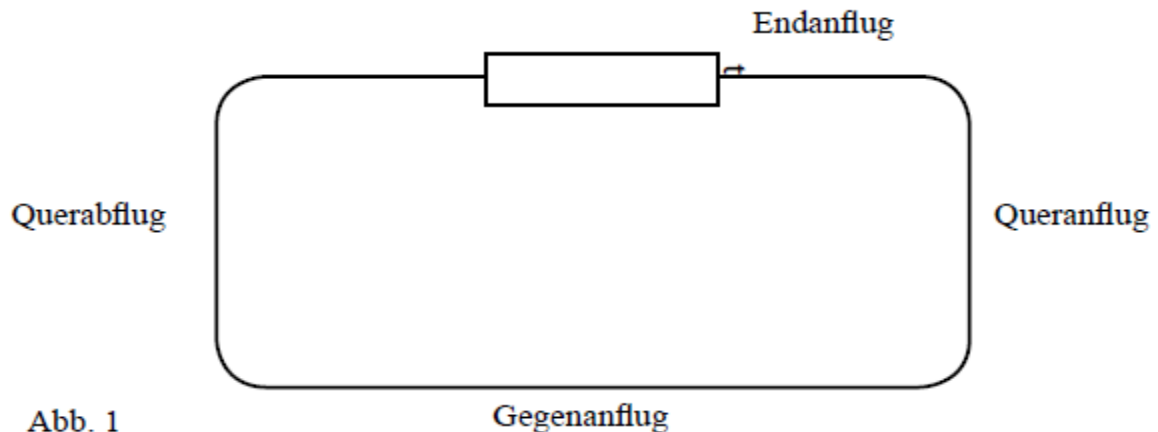


Abb. 1
Abbildung 4.1: Skizze einer Standardplatzrunde (Quelle: NfL 1 37/00 [35])

Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, hat die Standardplatzrunde eine rechteckige Form. Sie besteht aus den Platzrundenteilen Abflug, Querabflug, Gegenanflug, Queranflug und Endanflug. Die Ecken sind dabei symbolisch abgerundet. (Die in den Karten verwendeten Radien sind zumindest für die meisten Motorflugzeuge nicht fliegbare, da sie zu klein sind.) Standardmäßig wird die Platzrunde links herum, also gegen den Uhrzeigersinn, geflogen, damit der links sitzende Pilot eine bessere Sicht auf den Platzrundenbetrieb und einen ungestörten Blick auf die Flugbetriebsflächen hat.

Motorisierte Luftfahrzeuge starten eigenständig auf einer hierfür zugelassenen Startbahn und steigen anschließend entlang der veröffentlichten Platzrundenführung im Abflug- und Querabflugsektor auf Platzrundenhöhe. Diese Höhe wird für den gesamten Gegenanflug gehalten. Der Abflug soll für Motorflugplatzrunden mindestens 1,5 km lang sein und der Gegenanflug 1,5 km von der Landebahn entfernt sein. Für Ultraleichtflugzeuge soll der Abflug mindestens 600 m lang sein und der Abstand des Gegenanfluges zur Landebahn mindestens 300 m betragen. Die Flughöhe im Gegenanflug soll für Motorflugzeuge mindestens 800 ft über Grund sein, für Ultraleichtflugzeuge zwischen 600 ft und 800 ft. Sofern eine Platzrunde für Ultraleichtflugzeuge und eine Platzrunde für Motorflugzeuge ineinander verschachtelt am Platz existieren, soll der Höhenabstand im Gegenanflug mindestens 200 ft betragen und der horizontale Abstand 500 m. Die Platzrunde soll, sofern möglich, zwischen dem Ende des Abflugsektors bis zur Mitte des Gegenanfluges verlassen werden, sofern keine gesondert ausgewiesenen Abflugrouten veröffentlicht sind.

Der Einflug in die Platzrunde erfolgt in der Mitte des Gegenanfluges unter einem Winkel von 45° auf Platzrundenhöhe. Mit diesem Verfahren wird sichergestellt, dass vorflugberechtigter Verkehr in der Platzrunde erkannt werden kann. Ist der Direkteinflug nicht möglich, soll durch das Fliegen eines Vollkreises ausreichend Abstand hergestellt werden. Sofern Luftfahrzeuge im Gegenanflug zu nahe hintereinander herfliegen, können diese Abstände durch das Fliegen von Vollkreisen erhöht werden.

An den Gegenanflug schließt sich der Queranflug an. In diesem wird der Sinkflug eingeleitet und das Flugzeug für die Landung konfiguriert (Landeclappen ausgefahren, Geschwindigkeit des Endanfluges eingenommen, ...). Aus dem Queranflug wird in mindestens 1,5 km Entfernung in den Endanflug eingedreht.

Die vorangehende Beschreibung regelt die Platzrunde, sofern keine weiteren Informationen nach §21a LuftVO veröffentlicht sind:

„(1) Für die Durchführung des Flugplatzverkehrs können besondere Regelungen durch die Flugsicherungsorganisation getroffen werden, wenn Flugplätze mit Flugverkehrskontrollstelle betroffen sind. In allen anderen Fällen werden die Regelungen von der für die Genehmigung des Flugplatzes zuständigen Luftfahrtbehörde des Landes aufgrund einer gutachtlichen Stellungnahme der Flugsicherungsorganisation getroffen. Die Regelungen werden in den Nachrichten für Luftfahrer (NfL) bekanntgemacht.“

Absatz (1) besagt, dass die zuständige Landesluftfahrtbehörde des jeweiligen Flugplatzes für den Sichtflugverkehr besondere Verfahren einführen kann, um einen sicheren und flüssigen Verkehrsverlauf zu gewährleisten. Eine erste Informationsquelle für Flugplatzverfahren ist das Luftfahrt-handbuch AIP-VFR, in dem alle wichtigen Regelungen eines Flugplatzes beschrieben sind. Alle weiteren Informationen sind der Flugplatzbenutzungsordnung zu entnehmen, welche in den Nachrichten für Luftfahrer (NfL) veröffentlicht werden.

Eine veröffentlichte Platzrundenführung existiert in Deutschland nur an Flugplätzen ohne Flugverkehrskontrolle. Hiermit sollen im Allgemeinen lärmempfindliche Gebiete geschützt und topografische Besonderheiten berücksichtigt werden.

Der Flugverkehr in einer Platzrunde findet in der Regel im Luftraum G, einem unkontrollierten Luftraum, statt. Eine aktive Überwachung und Steuerung des Flugplatzverkehrs durch einen Fluglotsen gibt es nicht.

Dabei gibt es weder in nationalen, noch in europäischen oder internationalen Regularien eine Definition, in-wie-weit eine Platzrunde, die nach Sichtflugregeln geflogen wird, eingehalten werden muss. Es finden sich lediglich allgemeine Formulierungen wie zum Beispiel „Die veröffentlichten Flugbetriebsregelungen sind entsprechend § 22 Abs. 1 Nr. 1 LuftVO zu beachten und daher grundsätzlich verbindlich“ (NfL II 37/2000) [35].

Für den unkontrollierten Sichtflug ist ein verbindlich festgelegter Flugweg nicht vorgesehen. Von daher gibt es auch keine weitere Beschreibung über mögliche und zulässige Abweichungen vom veröffentlichten Flugweg.

[35]

4.1.2 Schulung

Im Rahmen der Pilotenausbildung erfolgen viele Trainingseinheiten innerhalb der Platzrunde.

Ziellandung:

Bei der Ziellandung soll der Flugschüler das Flugzeug aus einer Höhe von 2000 ft über dem Flugplatz mit einem simulierten Triebwerksausfall landen. Der Flugschüler hat den Flugweg so anzupassen, dass der Sinkflug auf der Landebahnschwelle endet. Dafür gibt es neben der Möglichkeit, die Flugleistung des Luftfahrzeuges durch das Ausfahren der Landeklappen zu verschlechtern, auch die Möglichkeit, einen längeren oder kürzeren Flugweg zu wählen.

Simulierter Triebwerksausfall in der Platzrunde:

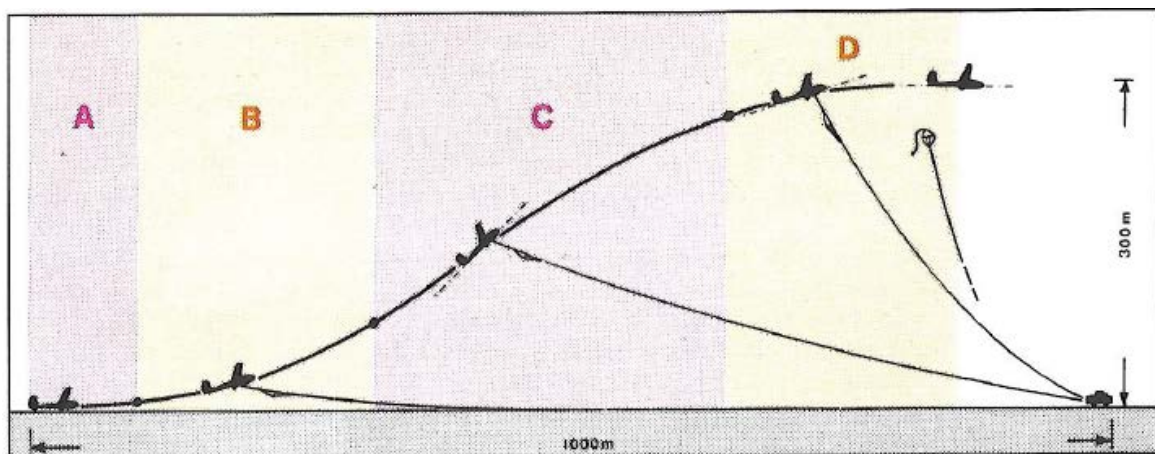
Beim simulierten Triebwerksausfall in der Platzrunde soll der Flugschüler das Luftfahrzeug aus dem Gegenanflug im Gleitflug ohne Hilfe von Motorleistung zurück auf die Landebahn fliegen und dort landen. Hierfür muss der Flugweg gegenüber der Standardplatzrunde abgekürzt werden.

4.2 Segelflug

Nachfolgend wird der Flugbetrieb mit Segelflugzeugen vorgestellt. Zuerst werden typische Startverfahren beschrieben - anschließend die Platzrunden und Anflugverfahren.

4.2.1 Windenstart

Beim Windenstart startet das Segelflugzeug, indem es von einem Seil, das durch eine Winde, die am Ende der Startfläche steht und aufgewickelt wird, gezogen und somit beschleunigt wird. Hierbei wird das Flugzeug zuerst horizontal beschleunigt, bis es ausreichend Geschwindigkeit (gewöhnlich das 1,3- bis 1,6-fache der Minimalgeschwindigkeit) erreicht hat. Danach wird das Flugzeug stark angestellt, um bei konstanter Fluggeschwindigkeit aufgrund des fortlaufenden Seilzuges Höhe zu gewinnen. Auf diese Weise können bei 1000 m ausgelegtem Seil über 400 m Höhe erreicht werden. Abschließend wird das Seil ausgekoppelt und es kann während eines Platzrundenfluges geeigneter Aufwind zum weiteren Steigen gesucht werden. Falls dieser ausbleibt, wird wieder gelandet.



A Anrollen, Abheben

B Übergang in die Steigfluglage

C Steigflug

D Übergang in die Normalfluglage, Ausklinken

Abbildung 4.2: Windenstart (Quelle: [36])

4.2.2 Flugzeugschlepp

Eine weitere geläufige Startart von Segelflugzeugen ist der sogenannte Flugzeugschlepp. Hierbei wird das Segelflugzeug von einem Motorflugzeug an einem bis zu 60 m langen Seil gezogen und erhält auf diese Weise die nötige Energie für ausreichend Geschwindigkeit zum Starten und zum Steigen. Gewöhnlich wird das Flugzeugschleppverfahren so lange angewandt, bis ausreichend Höhe und ein bekanntes Gebiet mit zuverlässigen Aufwinden erreicht ist. Dann koppelt das Segelflugzeug das Schleppseil aus und beide Flugzeuge setzen den Flug unabhängig voneinander fort.

Den Flugzeugschleppverband, bestehend aus dem Segelflugzeug und dem Motorflugzeug, zeichnet eine verhältnismäßig lange Startstrecke, eine geringe Steigrate, eine zumeist vergleichsweise niedrige Fluggeschwindigkeit und eine geringe Wendigkeit aus.

In der flugbetrieblichen Praxis sind dies konkret Kurvenradien über 1000 m und Steiggradienten von unter 4%.

Wegen der geringeren erzielbaren Steigrate müssen bekannte Abwindgebiete, beispielsweise windabgewandte Berghänge, vermieden werden.



Abbildung 4.3: Flugzeugschlepp (Quelle: Wikipedia)

4.2.3 Platzrunde

Ähnlich dem Motorflug existiert auch beim Segelflugbetrieb eine Platzrunde. Die vollständige Platzrunde, wie in Abbildung 4.4 dargestellt, wird nur von Segelflugzeugen geflogen, die zuvor mit der Winde gestartet worden sind. Diese ist dadurch geprägt, dass Segelflugzeuge über keinen eigenen Antrieb verfügen. Daher wird direkt nach dem Ausklinken des Windenseils sofort in den Querabflug gekurvt. Im Querabflug und im Gegenanflug wird dann der Flugweg auf der Suche nach nutzbaren Aufwinden variiert. In dieser Zeit kann beispielsweise um 150 m bis 200 m gesunken werden, bis schließlich querab der Landebahn in einer Höhe von 200 m über dem Platz die sogenannte Position erreicht wird. Dieser Punkt wird auch von Segelflugzeugen angeflogen, die von einem Überlandflug zum Platz zurückkehren. Von hier aus wird nach einem Standardverfahren die Landebahn angeflogen. Dabei findet eine Variation der Flugwege abhängig von den Flugeigenschaften, der Sinkrate, möglicher Auf- und Abwinde, der Windrichtung und weiteren Faktoren statt.

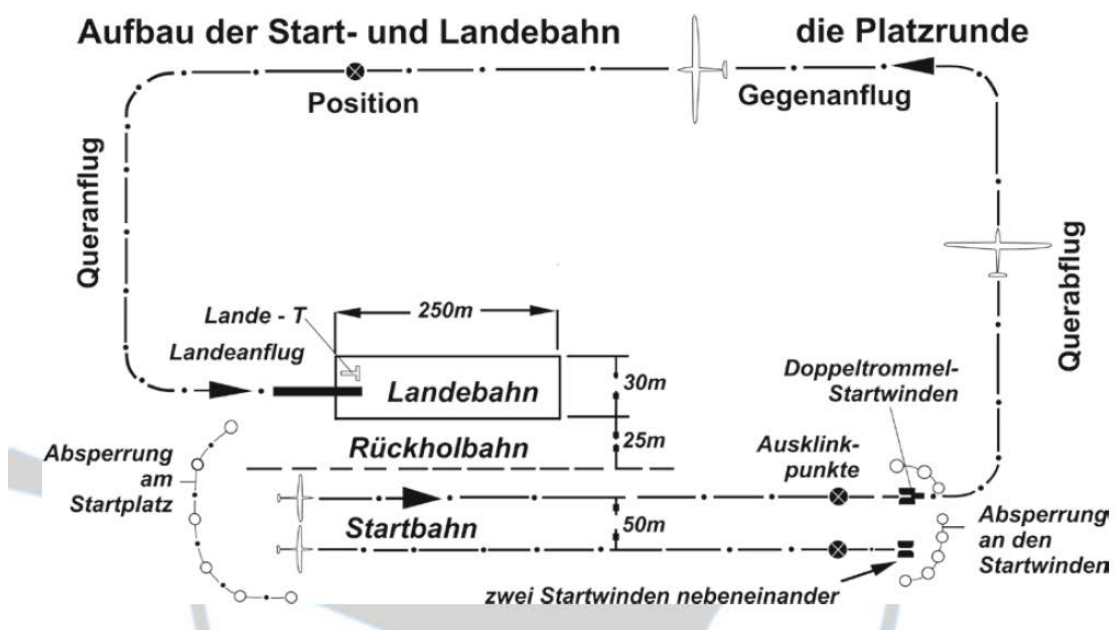


Abbildung 4.4: Übersicht Platzrunde Segelflug (Quelle: [37])

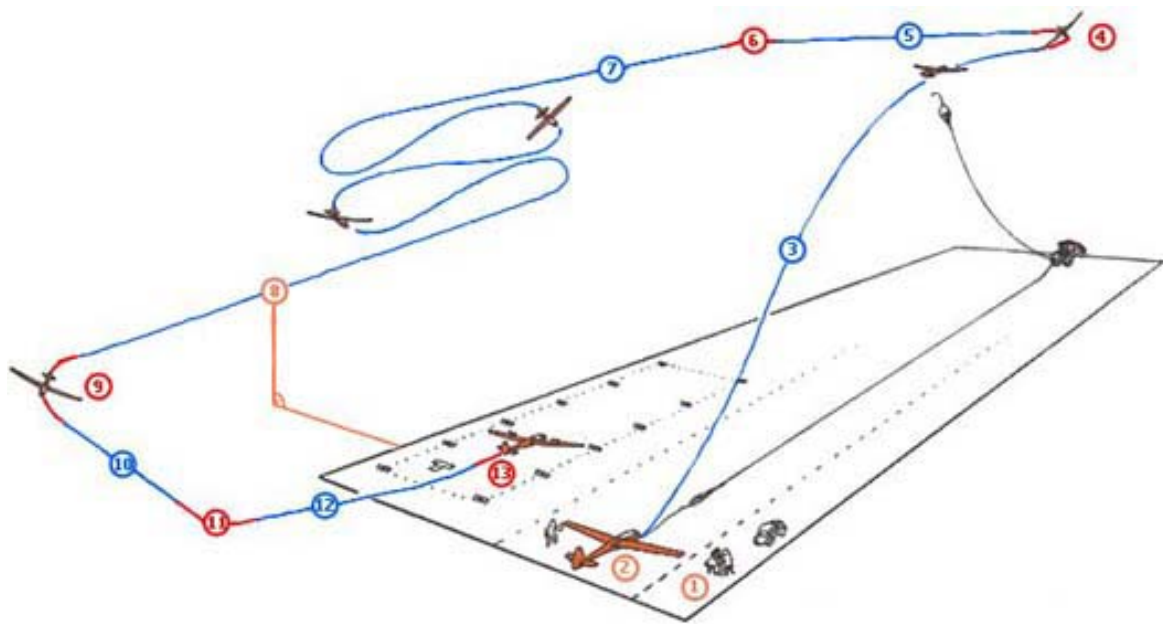


Abbildung 4.5: Platzrunde (Quelle: Homepage Fliegergruppe Welzheim e.V.)

4.2.4 Übungsraum

Segelflugschüler müssen im Rahmen ihrer Ausbildung auf ihren ersten Alleinflügen in Sichtweite ihres Fluglehrers nachweisen, dass sie sicher selbstständig Aufwinde finden und diese nutzen können, gewöhnlich durch den Flug auf Kreisbahnen innerhalb dieser Aufwinde. Das Gebiet, das hierfür genutzt wird, wird als Übungsraum bezeichnet und ist ein bekanntes, flugplatznahes Gebiet mit zuverlässigen Aufwinden. Die Flugschüler fliegen diesen in ausreichender Höhe nach dem Start mittels Seilwinde an oder werden per Flugzeugschleppverfahren dorthin gebracht. Ein weiteres Kriterium ist, dass aus dem Übungsraum jederzeit eine sichere Rückkehr zum Platz möglich ist. So verändern sich nutzbare Gebiete abhängig von der Windrichtung.

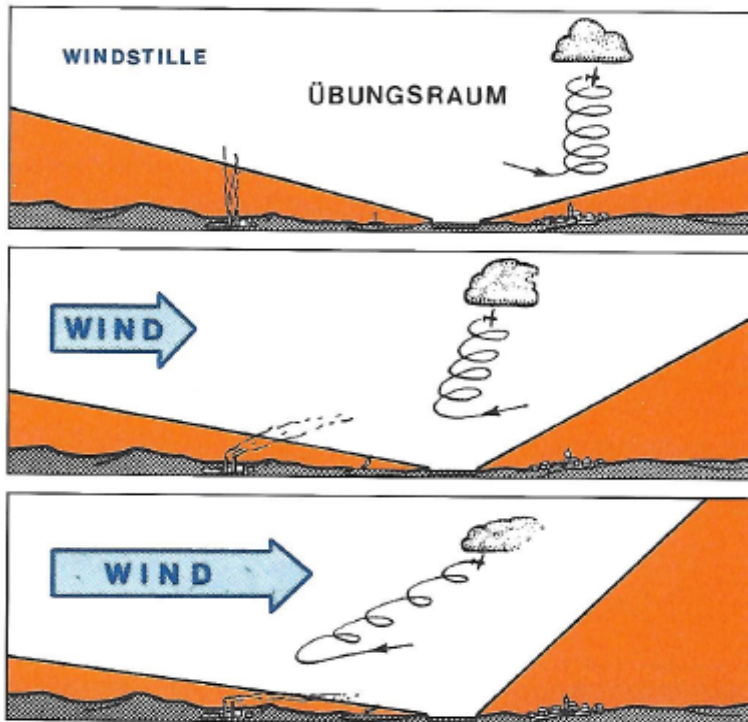


Abbildung 4.6: Übungsraum (Quelle: [36])

4.3 Ballone

Ballone nutzen Flugplätze und ihre Infrastruktur häufig als Startfläche. Nach dem Abheben treiben sie mit dem vorherrschenden Wind mit. Sie können zumeist vergleichsweise gute Steiggradienten erreichen. Ballone werden aufgrund heißer Luft in der Hülle, die somit eine geringere Dichte als die umgebende Luft aufweist, vom Boden weggehoben und treiben mit dem Wind. Die Hülle ist sehr weich, sodass schon leichte Turbulenzen und Windscherungen eine Deformation der Hülle zur Folge haben. Dies wiederum geht mit einem unkontrollierbaren Verlust an Auftrieb der Hülle einher, woraufhin der Ballon unweigerlich schnell und unkontrolliert an Höhe verliert. Der Fahrer hat lediglich die Möglichkeit, sehr träge mit Nachheizen auf Störungen zu reagieren. Wegen ihrer Größe sind Heißluftballone sehr gut für andere Verkehrsteilnehmer zu sehen. Sie verlangen jedoch ein Umfliegen mit sicherem Abstand, sofern sie vom Wind durch die Platzrunde getragen werden. Somit muss von den veröffentlichten Anflugverfahren abgewichen werden.

4.4 Fallschirmsprungbetrieb

Flugplätze mit Fallschirmsprungbetrieb verfügen über eine zusätzliche Landefläche für Fallschirmspringer gewöhnlich in Nähe der Start- und Landebahn, allerdings auf der zur Platzrunde abgewandten Seite. Der Abstand soll mindestens 500 m betragen. Auf dieser Seite werden sie auch von ihren Absetzflugzeugen abgesetzt (die Flugwege der Absetzflugzeuge entsprechen den Verfahren für Motorflugzeuge). Da Fallschirmspringer auch nach Öffnung des Schirmes steil sinken, sind sie - sofern sie sich auf Kollisionskurs mit Flugzeugen befinden - für die Flugzeugpiloten nur sehr spät zu entdecken. Daher muss eine räumliche Trennung der möglichen Flugbahnen gegeben sein.

4.5 Gleitschirme

Gleitschirme operieren, sofern nicht motorisiert, von zusätzlichen Startflächen auf topografischen Erhebungen in Platznähe oder werden von einer Winde hochgezogen. Anflüge zum Platz erfolgen von der Seite, die abgewandt zur Platzrunde ist. Aufgrund ihrer geringen Fluggeschwindigkeit stellen sie ortsfeste Hindernisse für Luftfahrzeuge dar und müssen umflogen werden. Eine räumliche Trennung der Flugbahnen muss gegeben sein.

Sofern Gleitschirme motorisiert sind, operieren sie wie Flugzeuge von der Start- und Landebahn des Flugplatzes. Wegen ihrer sehr geringen Fluggeschwindigkeit können sie sich nicht in die Ultraleichtplatzrunde einordnen. Daher ist es sinnvoll, eine eigene Platzrunde auf der Seite, abgewandt zu den anderen Platzrunden, zu haben.

Der Schirm ist enorm anfällig für Turbulenzen. Im Flug droht je nach Fluggeschwindigkeit ein Zusammenklappen oder sogar ein Verdrehen des Schirmes als Reaktion auf Böen oder Turbulenzen. Damit ist eine unkontrollierbare Fluglage verbunden, was möglicherweise einen Absturz zur Folge hat.

4.6 Hängegleiter

Hängegleiter nutzen bestehende Flugplätze zum Teil ähnlich wie Gleitschirme, um auf diesen zu landen. Hängegleiter können von einem Flugplatz analog zu Segelflugzeugen mittels Windschlepp und auch mittels Schlepp von langsam fliegenden motorisierten Ultraleichtflugzeugen starten. Hängegleiter werden durch die Verlagerung ihres Schwerpunktes gesteuert. Dies ist eine sehr indirekte Steuerungsmethode. Sie macht eine vorausschauende Flugplanung notwendig. Hinzu kommt, dass die Fluggeschwindigkeit von Hängegleitern deutlich höher als die von Gleitschirmen ist, so dass sie großräumigere Flächen für Start und Landung benötigen. Bei Turbulenzen und Böen droht ein unkontrolliertes Überschlagen im Flug.

4.7 Einflüsse im Flugbetrieb

Nachfolgend werden Einflüsse einer bestimmten Betriebsart auf andere Teilnehmer des Flugplatzbetriebes beschrieben

Ballone

Ballone werden langsam durch die Luftströmung getrieben. Ihre Fahrstrecke ist lediglich durch eine Veränderung der Höhe änderbar. Sofern ihre Position die Platzrunde anderer Verkehrsteilnehmer tangiert, müssen diese, sofern möglich, die Platzrunde anpassen oder abwarten bis der Ballon das Gebiet der Platzrunde verlassen hat.

Gleitschirme und Hängegleiter

Bis auf Ballone müssen alle anderen Verkehrsteilnehmer Rücksicht auf Gleitschirme und Hängegleiter nehmen, da diese schlechtere Flugleistungen und geringeren Geschwindigkeiten aufweisen als die anderen Verkehrsteilnehmer. Dies hat zur Folge, dass die Platzrundenführung unter Umständen verlassen werden muss, um auszuweichen.

Fallschirmsprungbetrieb

Fallschirmspringer sind für andere Verkehrsteilnehmer aufgrund ihrer vornehmlich vertikalen Flugbewegung nur spät zu erkennen. Wegen ihrer steilen Sinkflüge und geringen Geschwindigkeit haben sie Vorflugrecht vor allen anderen Verkehrsteilnehmern, die entsprechend ausweichen müssen.

Segelflug

Wegen des fehlenden eigenen Antriebes sind Segelflugzeuge gegenüber Motorflugzeugen vorflugberechtigt. Motorflugzeuge müssen entsprechend ausweichen. Flugzeugschleppverbände bewegen sich langsam und träge durch die Platzrunde und müssen umflogen werden.

5. Strömungsfeld Windenergieanlagen

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Auswirkungen von Windenergieanlagen auf das Windfeld mit Daten aus einschlägigen Veröffentlichungen dargestellt. Anschließend wird der Nachlauf hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen auf ein Luftfahrzeug untersucht.

5.1 Typisches Windfeld

Windenergieanlagen wandeln Energie, die als Strömungsenergie im natürlichen Wind gespeichert ist, in elektrische Energie um. Hierfür entziehen sie dem Wind Energie, indem sie die Strömungsgeschwindigkeit reduzieren. Dies erfolgt jedoch nicht gleichmäßig über die Rotorebene, sondern es handelt sich um ein vielschichtiges Zusammenspiel von verschiedenen Effekten: der Strömungsgeschwindigkeit des Windes, der Kreisgeschwindigkeit des Rotorblattes, der Drehrichtung des Rotors, der Ausformung der Bodengrenzschicht und des Blattrandwirbels, um nur einige zu nennen.

Zum Einstieg soll die Abbildung 5.1 auf nachfolgender Seite vorgestellt werden. Das Nachlauf Feld wird hierbei für verschiedene Windenergieanlagen dargestellt. Im roten dargestellten Volumen ist die Strömungsgeschwindigkeit auf 40 % der Anströmgeschwindigkeit reduziert. Man erkennt, dass dies neben kleinen Fetzen direkt am Blatt vor allem für einen Bereich in etwa in Form eines Hohlzylinders mit etwa Rotordurchmesser und einer Länge von sechs Rotordurchmessern der Fall ist. Die Energieentnahme aus der Luftströmung fällt in der Rotormitte nicht so groß aus, da die Drehgeschwindigkeit des Rotors hier zu gering ist, und der Luft somit nicht effektiv Energie entzogen werden kann.

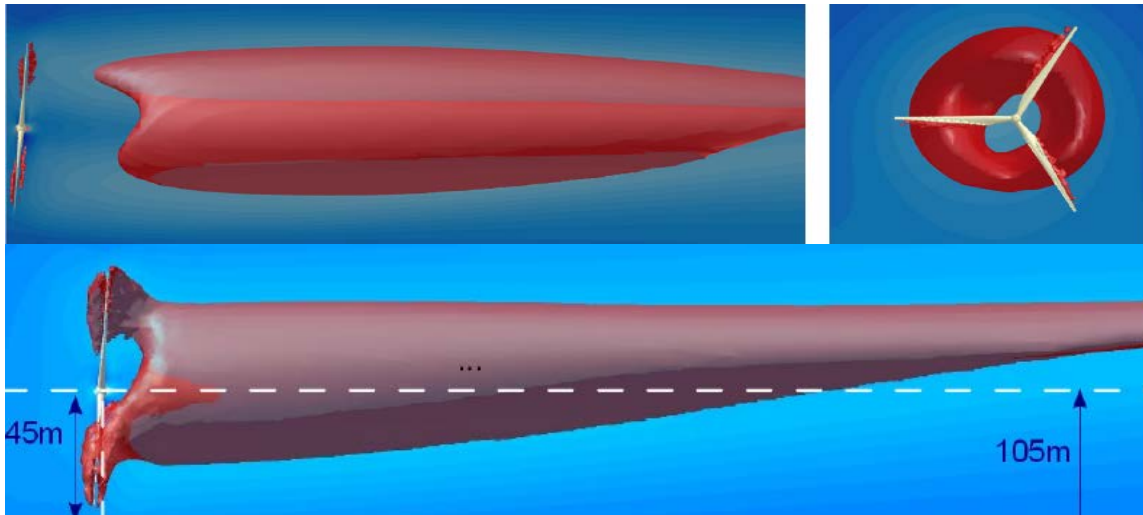


Abbildung 5.1: Geschwindigkeitsreduktion im Nachlauf auf 40 % (Quelle: [38])

Abbildung 5.2 zeigt, dass die Um- und Durchströmung einer Windenergieanlage keinesfalls ein gleichmäßiger linearer Vorgang, sondern ein - abhängig von der Windenergieanlage, dem Terrain und der Windgeschwindigkeit - hochkomplexer Vorgang ist. Im obigen Fall ist die Windgeschwindigkeit deutlich geringer als im unteren Fall. Bei der geringeren Geschwindigkeit treten jedoch die deutlich stärkeren Nachlaufeffekte auf.

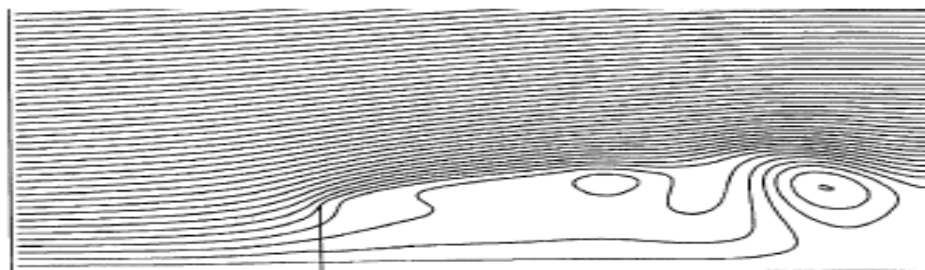


Fig. 29. Flow field about the Tjæreborg wind turbine at a wind speed of 6.5 m/s (from [113]).

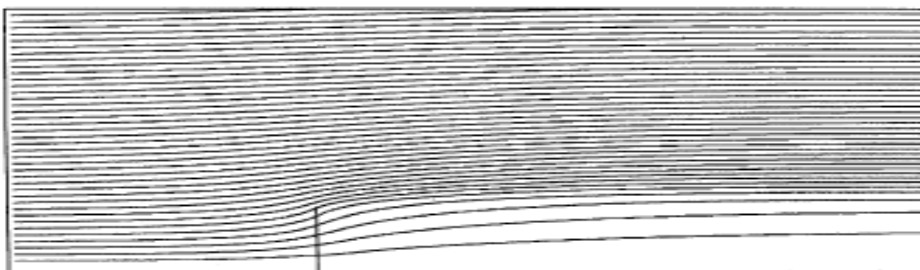


Fig. 30. Flow field about the Tjæreborg wind turbine at a wind speed of 10 m/s (from [113]).

Abbildung 5.2: Umströmung Windenergieanlage in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Quelle: [39])

Im Diagramm 5.1 ist die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit der Luft auf der Abwindseite gegenüber der freien Anströmung entlang der Rotorachse über den Abstand zum Rotor abgebildet. Dies ist für zwei unterschiedliche Belastungen (c_T) des Rotors dargestellt. Ein größeres c_T -Wert steht dabei für eine hohe Windausbeute.

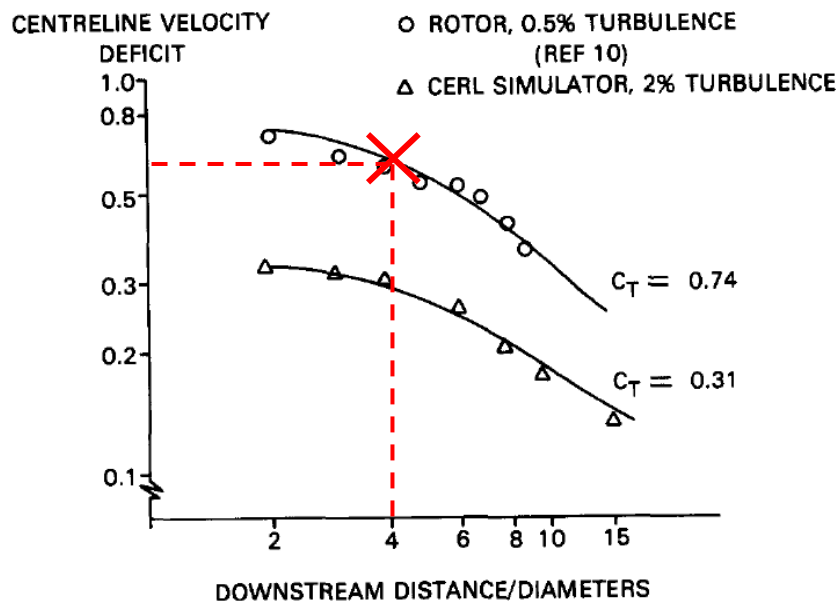


Diagramm 5.1: Nachlaufverzögerung (Quelle: [39])

Wie das Diagramm 5.1 zu lesen ist, soll mit Hilfe deseingezeichneten Kreuzes exemplarisch beschrieben werden. Das Kreuz befindet sich über der 4 der x-Achse. Somit befindet sich der Ort auf der Rotorachse im Nachlauf der Windenergieanlage in vier Rotordurchmesser Abstand. An der y-Achse ist zu dem Kreuz etwa eine 0,7 abzulesen. Hieraus ergibt sich, dass die Geschwindigkeit an diesem Ort um 70 % gegenüber der Anströmung verzögert ist und somit nur 30 % der Anströmungsgeschwindigkeit beträgt. [39]

Für die höhere Rotorbelastung und somit den kritischen Fall beträgt die Strömungsgeschwindigkeit in einem Abstand von zwei Rotordurchmessern hiernach 25 % der Geschwindigkeit der Anströmung und steigt bis 10 Rotordurchmesser Abstand wieder auf 70 % an.

Als Ergänzung hierzu sind Diagramm 5.2 und Diagramm 5.3 auf den folgenden Seiten einer weiteren Untersuchung anzusehen.

Im Diagramm 5.2 auf der nächsten Seite stellt die x-Achse die vorhandene Strömungsgeschwindigkeit im Verhältnis zur Anströmung dar. Die y-Achse stellt den Abstand von der Rotorachse in Verhältnis zum Durchmesser dar. Die eingezeichneten Kurven repräsentieren somit die Windgeschwindigkeitsverteilung im Nachlauf in einer bestimmten Entfernung zum Rotor.

Am Beispiel des eingezeichneten Kreuzes bedeutet dies: Das Kreuz liegt auf der Kurve, die die Windgeschwindigkeitsverteilung in sechs Rotordurchmessern Abstand zur Windenergieanlage darstellt. An der x-Achse kann abgelesen werden, dass die Geschwindigkeit 50 % der Geschwindigkeit der Anströmung entspricht. An der y-Achse erkennt man, dass dieser Ort in einem Abstand von 30 % zur Rotorachse liegt. Es wird von radialer Symmetrie ausgegangen.

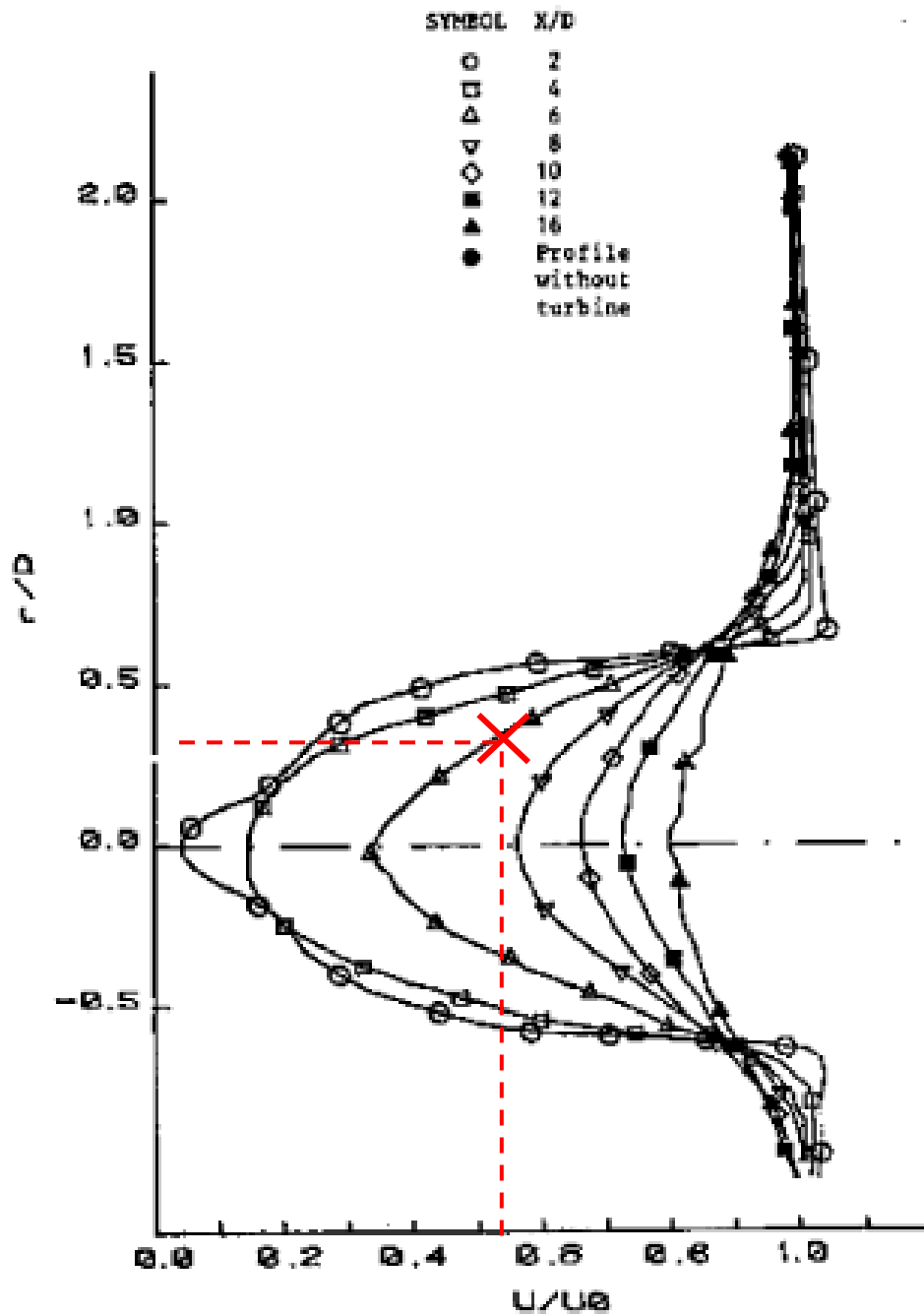


Diagramm 5.2: Geschwindigkeitsverteilung hinter einer Windenergieanlage
(Quelle: [39])

Das Diagramm 5.2 wurde in nachfolgender Abbildung teilweise visualisiert. Die Strömungsgeschwindigkeit der Abströmung ist im Schnitt für drei unterschiedliche Abstände zum Rotor aufgetragen.

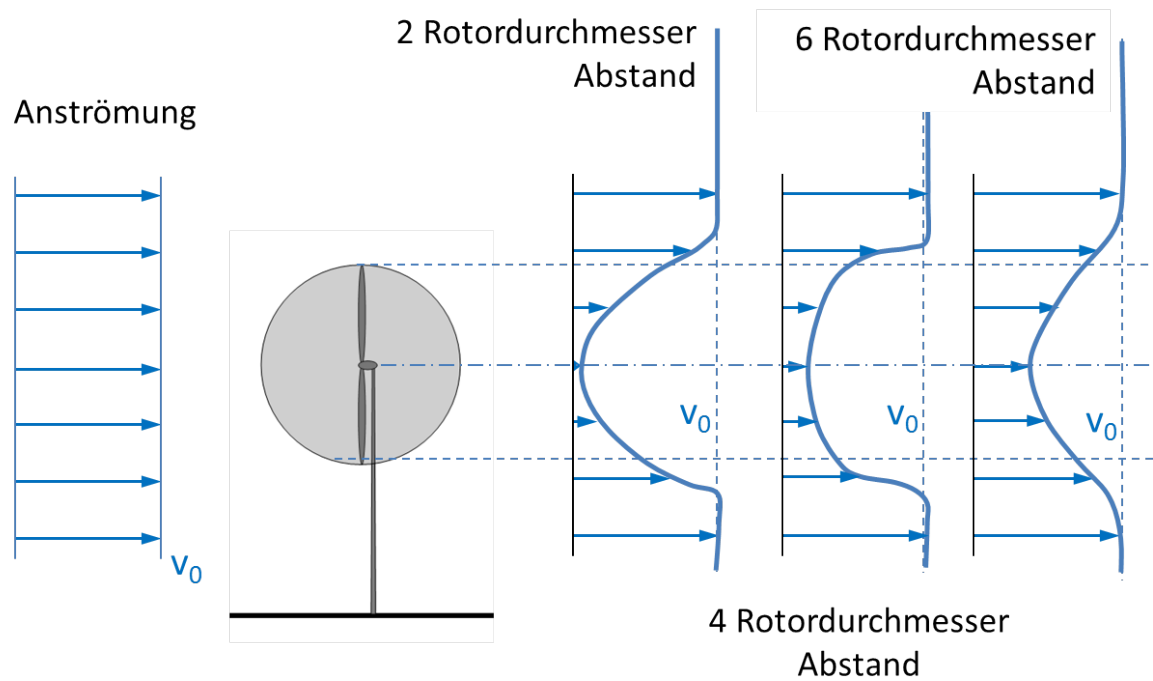


Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverteilung in der Abströmung, Visualisierung auf Basis der Daten von Diagramm 5.2

**COMPARISON BETWEEN THE MEASURED AND PREDICTED
TURBULENT VELOCITY PROFILES IN THE WAKE
OF A SINGLE MACHINE OPERATING AT TSR= 4.0.**

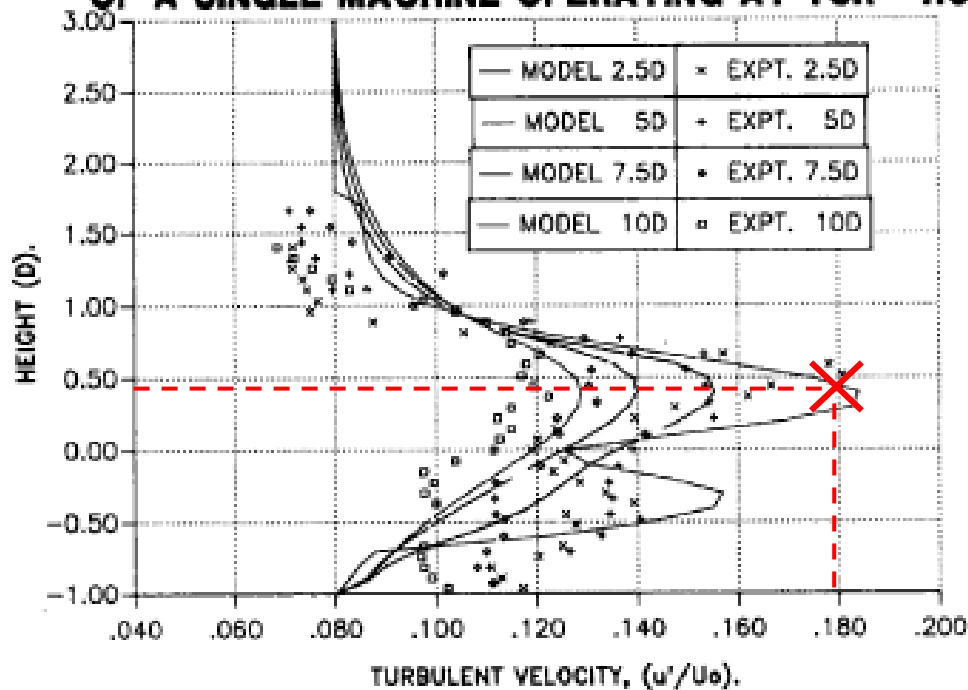


Diagramm 5.3: Turbulenzverteilung über einen vertikalen Schnitt im Nachlauf einer Windenergieanlage (Quelle: [39])

Im Diagramm 5.3 ist der Turbulenzgrad wiederum in festen Entfernungen zur Rotorebene entlang verschiedener Durchmesser dargestellt. Es wird ein Turbulenzgrad von 20% erreicht.

Anhand des eingezeichneten Kreuzes soll erklärt werden, wie das Diagramm 5.3 zu interpretieren ist. Der Turbulenzgrad beträgt 18 % (siehe x-Achse) an diesem Kurvenpunkt. Das heißt durchschnittlich weicht die Strömungsgeschwindigkeit um 18% von der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit ab. An der y-Achse ist zu erkennen, dass dieser Ort etwa einen halben Rotordurchmesser oberhalb der Rotorachse liegt und am Index liest man ab, dass sich der Ort 2,5 Rotordurchmesser im Nachlauf des Rotors befindet.

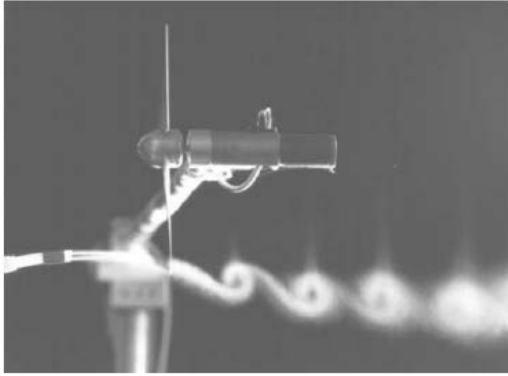


Fig. 6. Flow visualisation experiment at TUDelft, showing two revolutions of tip vortices for a two-bladed rotor (from [24]).



Fig. 4. Flow visualisation with smoke, revealing the tip vortices (from [16]).



Fig. 7. Flow visualisation with smoke grenade in tip, revealing smoke trails for the NREL turbine in the NASA-Ames wind tunnel (from Hand [13]).

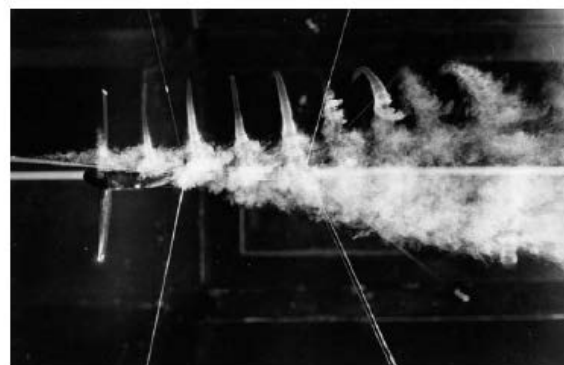


Fig. 5. Flow visualisation with smoke, revealing smoke trails being 'sucked' into the vortex spirals (from [16]).

Abbildung 5.4: Blattspitzenwirbel (Quelle: [39])

Ein weiterer wichtiger Strömungseffekt, der aus den vorangegangenen Diagrammen nicht ersichtlich geworden ist, ist die Umströmung der Blattspitze und die damit verbundene Wirbelbildung. Von jeder Blattspitze schwimmt ein entsprechender Wirbel entlang einer Spirale aufgrund der Überlagerung von Blattbewegung und der Windströmung ab. Beispiele hierfür sind nachfolgend gegeben.

Zu erkennen ist, dass der Blattspitzenwirbel die bereits beschriebene Fangstromröhre in etwa einschließt. Dabei arbeiten diese Wirbel aufgrund ihrer räumlichen Lage zueinander jedoch gegeneinander, sodass diese Wirbel nach einer Distanz von etwa vier Rotordurchmessern aufgrund von Dissipation ihre Schärfe verlieren. Nichtsdestotrotz wird die vorhandene turbulente Energie erst verzögert über die Wirbelgrößenkaskade (Kolmogorov) abgebaut.

5.2 Literaturübersicht

Im nachfolgenden Kapitel sollen einschlägige Studien zum Thema Einfluss des Nachlaufes von Windenergieanlagen auf Luftfahrzeuge vorgestellt werden.

5.2.1 Böenbelastung von UL-Flugzeugen durch den turbulenten Nachlauf von Windenergieanlagen, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Oldenburg, 2014

In der Nähe des Flugplatzes für Ultraleichtflugzeuge Linich-Boslar soll ein Windpark errichtet werden. Das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik hat insgesamt drei Gutachten erstellt, die die Auswirkung auf die Flugsicherheit des Nachlaufes der Windenergieanlagen auf den Luftverkehr am genannten Flugplatz darstellen sollen. Dabei ersetzt das zweite Gutachten von 2014 das ältere Gutachten aus dem Jahr 2012. Der neueste Text aus dem Jahr 2015 soll eine Ergänzung darstellen. In diesem Kapitel wird ausschließlich auf das Gutachten aus dem Jahr 2014 referenziert (die Seitenzahlen beziehen sich hierauf). [40]

Die Windenergieanlage wird für diese Untersuchung mittels des Wirkscheibenmodells (Seite 4) simuliert. Somit können kritische komplexe, zeitlich unstetige Effekte im Nachlaufwirbelfeld nicht beschrieben werden. Die Eingangsparameter für die Wirkscheibe sind die Schub- und Leistungskoeffizienten bekannter und vermessener Windenergieanlagen. Da offensichtlich die Impulstheorie dem Wirkscheibenmodell zugrunde liegt (veröffentlicht von Rankine 1865 und Froude 1885), werden weder Drall, Verluste, Turbulenzen noch Blattspitzenwirbel berücksichtigt. Weshalb nicht zumindest aktuellere Ansätze, insbesondere zur radialen Rotorblattbelastung, beispielsweise von Prandtl, Goldstein oder Adkin verwendet worden sind, obwohl diese eine Standardimplementierung in Programmen zur numerischen Strömungssimulation sind, bleibt unklar. Stattdessen wird die Annahme getroffen, die Rotorkräfte „gleichmäßig“ (Seite 5) über die Zellen der Wirkscheibe zu verteilen, anstatt die notwendige Gewichtung in Abhängigkeit des radialen Ortes durchzuführen. Wie aus Diagramm 5.4 hervorgeht, steigen die Kräfte zwischen dem Rotorblatt und der umgebenden Luft von der

Welle ausgehend nach außen bis ca. 80 % des Radius an, um danach steil in Richtung der Blattspitze abzufallen. Das verwendete Modell mit gleichmäßiger Lastverteilung entspricht also nicht der Realität. [41] [42]

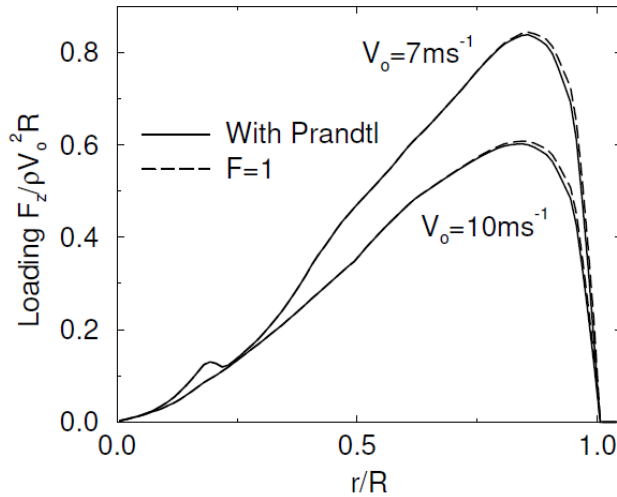


Diagramm 5.4: Radiale Lastverteilung eines realen Rotorblattes (Quelle: [41])

Die Ermittlung der maximal zu berücksichtigenden Böengeschwindigkeit ist auf Seite 6 beschrieben:

„Bei der hier gewählten Rechenmethode ist letztere ebenfalls nur im zeitlichen Mittel zugänglich, und auch nur als skalare Größe. Richtung und Frequenz der Fluktuation um den Mittelwert sind demnach nicht aus den Simulationsergebnissen extrahierbar.“

Die berücksichtigte Böengeschwindigkeit ergibt sich aus der Verzögerung des Nachlaufes und der zuvor beschriebenen, zeitlich gemittelten mittleren Abweichung der Nachlaufgeschwindigkeit von der Nachlaufgeschwindigkeit (Fluktuation). Hierbei handelt es sich jedoch um einen zeitlichen Durchschnittswert. Dieser wird jedoch mindestens in 32 % der Zeit überschritten, sofern man eine Normalverteilung zugrunde legt. Für eine sichere Abwägung hätte man den Turbulenzanteil vervierfachen müssen, damit diese Böengeschwindigkeit nur in 1/15 000 der Zeit überschritten wird. [43]

Auf Seite 7 wird ein Auftriebsanstieg von 6,369 angegeben. Dieser Wert übersteigt den in der theoretischen Aerodynamik maximalen Wert von 2π ($=6,283$). Für reale Flügelprofile fällt dieser Wert gewöhnlich kleiner aus. [44]

Auf Seite 7 wird für Formel 12 von einem Anstellwinkel kleiner 10° für den linearen Bereich ausgegangen und mit Formel 13 wird die Kleinwinkelnäherung eingeführt. Auf der folgenden Seite 8 steht dann:

„Eine Überschreitung des Bereichs (13) ist wegen $U_{Böe} \ll V$ nicht zu erwarten.“

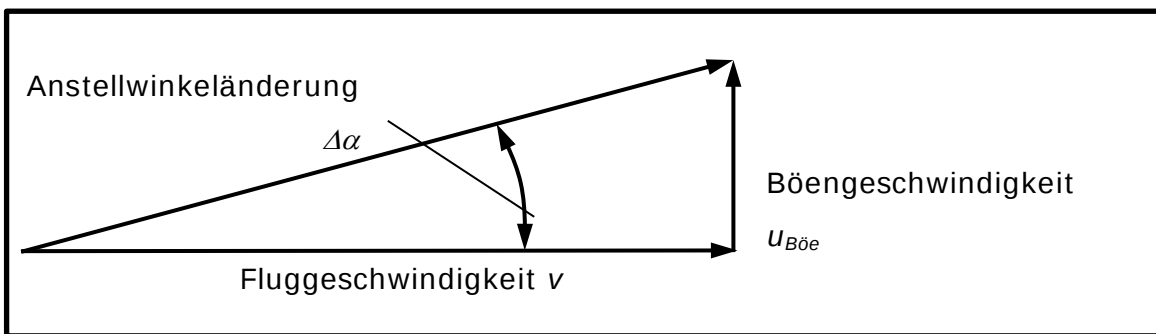


Abbildung 5.5: Anstellwinkeländerung durch vertikale Böe

Allerdings wird später mit 6 m/s vertikaler Böengeschwindigkeit bei 24 m/sec Fluggeschwindigkeit gerechnet. Dies ergibt eine Anstellwinkeländerung von 14° . Somit wird der Bereich nach Formel 13 verlassen. Unberücksichtigt bleibt, dass ein Flugzeug dieser Bauart in der Platzrunde mit ca. 5° Anstellwinkel fliegt. Zusammen mit den 14° Anstellwinkeländerung ergibt dies einen Anstellwinkel von 19° und somit höchstwahrscheinlich einen Strömungsabriss. Ein Strömungsabriss in Platzrundenhöhe ist gefährlich.

Eine ebenfalls mögliche horizontale Böe bleibt ebenfalls unberücksichtigt. Gründe hierfür sind nicht angegeben. Die Änderung des Staudruckes aufgrund einer Böe wird in diesem Gutachten jedoch nicht berücksichtigt, obwohl dies je nach Richtung eine Vergrößerung der Kräfte von mehr als 70 % zur Folge haben kann. Alternativ kann eine Böe von 6 m/s (wie in dem Gutachten angenommen) bei einer Fluggeschwindigkeit von 24 m/s zu einer Verzögerung der Anströmgeschwindigkeit von 18 m/s ($=(24-6)\text{m/s}$) führen. Dies ist wiederum in etwa die Geschwindigkeit für den Strömungsabriss.

Nach Seite 8, Formel 15 wird als Prüfkriterium die Design Dive Speed von 46 m/s angenommen. Dies ist im Flugbetrieb unzulässig. Turbulente Luft darf maximal mit dem Ende des grünen Bogens (Design Cruise Speed) von 34 m/s durchflogen werden. Sollte die angezeigte Geschwindigkeit diesen Wert in turbulenter Luft überschritten haben, ist zwingend eine Überprüfung der Flugzeugstruktur notwendig. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die in einem Flug in ruhiger (!) Luft erreicht werden darf, ist das Ende des gelben Bogens bei 41,6 m/s. Der Bereich bis 46 m/s ist eine letzte strukturelle Reserve, bevor ein katastrophales Strukturversagen eintreten darf. Nach einem Überschreiten von 41,6 m/s ist eine Überprüfung der Struktur notwendig. Bleibende Verformungen sind möglich.

Die auf Seite 11 ff vorgestellten Geschwindigkeitsprofile sind vornehmlich horizontale, zeitlich gemittelte Windgeschwindigkeiten und Turbulenzanteile. Es bleibt unklar, wie sich aus diesen Informationen vertikale Böen bestimmen lassen. Auffällig ist außerdem die Symmetrie. Zu erwarten gewesen wären Unterschiede zwischen auf- und abschlagendem Blatt und ein hieraus resultierender Drall. Dies lässt sich auch mit dem Wirkscheibenmodell simulieren. Das ist unterblieben (wie zu Beginn des Kapitels schon erklärt). Somit bleiben eben diese als kritisch zu betrachtenden asymmetrischen Effekte unberücksichtigt.

Nachfolgend ist das auf Seite 13 des Gutachtens abgebildete Diagramm für auftretende Beschleunigungen wiedergegeben. Modifiziert wurde es durch die eingezeichneten Grenzen für moderate und schwere Turbulenzen (siehe Kapitel 2.6).

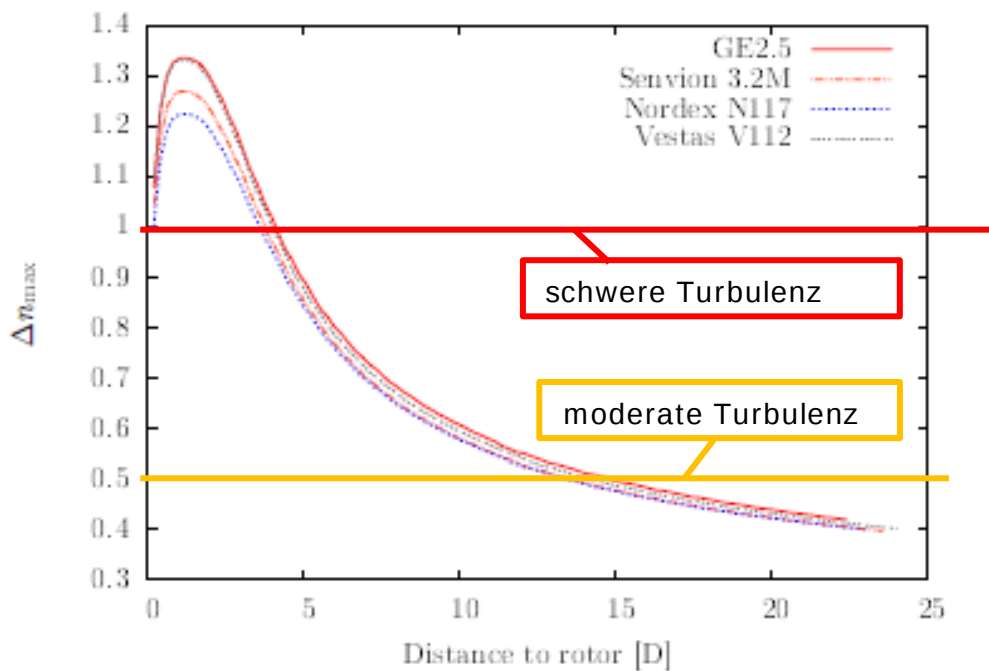


Diagramm 5.5: Maximale Turbulenzbelastung beim Durchfliegen eines Windenergieanlagennachlaufs (Quelle: [40])

Nach Berechnungen in diesem Gutachten sind somit Böen bis zum Fünffachen des Rotordurchmessers der Kategorie „schwer“, bis zum 15-Fachen des Rotordurchmessers der „moderaten“ Kategorie zu erwarten.

Entgegen anderer Aussagen im Bericht ist ein negativer Auftrieb aufgrund des in erster Näherung linearen Verhaltens vom Auftrieb an einer Tragfläche bis fünf Rotordurchmesser möglich. Der Durchflug von moderaten Turbulenzen verpflichtet zum Durchstarten (sofern in der Anflugvorbereitung nicht explizit berücksichtigt) und einem Pilotenbericht.

Auf Seite 16 wird der relevante Nachlaufbereich mit dem 20-Fachen des Rotordurchmessers angegeben. Von einem Flug durch diesen Bereich bei mehr als 20 kt Wind wird abgeraten. Das untersuchte UL darf gewöhnlich auch bei höheren Windgeschwindigkeiten betrieben werden.

Der abschließende Vorschlag, den Nachlauf von Windenergieanlagen bei Start und Landung zu unterfliegen, ist unpraktikabel und aus Gründen der Hindernisfreiheit gefährlich.

5.2.2 Flugempfehlungen für den UL-Sonderlandeplatz Boslar, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Oldenburg, 2015

Das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik hat als Ergänzung zu den Gutachten aus dem Jahr 2012 und 2014 im Jahr 2015 ein weiteres erstellt, mit dem Ziel spezielle Flugempfehlungen für den UL-Sonderlandeplatz Linnich-Boslar zu geben

Überraschend wird im gesamten Text ausführlich auf das Gutachten im Jahr 2012 referenziert, obwohl dieses zurückgenommen und durch das Gutachten im Jahr 2014 ersetzt worden ist. So hieß es 2014:

„Sie [die Studie aus dem Jahr 2014] entspricht dem aktuellen Stand der Forschung und ersetzt die frühere Studie. [...]

Die hier getroffenen Aussagen stehen teilweise im Gegensatz der Aussagen aus der im Jahr 2012 ebenfalls vom Fraunhofer IWES angefertigten Studie [aus dem Jahr 2012] zum Thema. Dieses liegt zum einen an einer Verbesserung der verwendeten Methoden der numerischen Strömungsberechnung und zum anderen an der hier präferierten, allgemeineren Herangehensweise. [...] Die hier präsentierten Ergebnisse und Schlussfolgerungen ersetzen demnach die [2012] getätigten Aussagen.“ [40]

Das Gutachten aus dem Jahr 2014 ist bereits im Kapitel 5.2.1 auf Plausibilität untersucht worden, sodass Aussagen, die hieraus übernommen worden sind, nachfolgend nicht weiter berücksichtigt und überprüft werden.

Im Gutachten des Jahres 2015 wird die veröffentlichte An- und Abflugstrecke (rot) hinsichtlich der Auswirkungen der Nachlaufturbulenzen auf ein Luftfahrzeug untersucht, obwohl in der Planung der An- und Abflugstrecken bereits der übliche 10° -Toleranzbereich ermittelt worden ist (siehe nachfolgende Grafik, blau). Zweckmäßig wäre daher eine Untersuchung des südlichen Randes des eingezeichneten Toleranzbereiches gewesen, da dies den kritischen Fall darstellt.

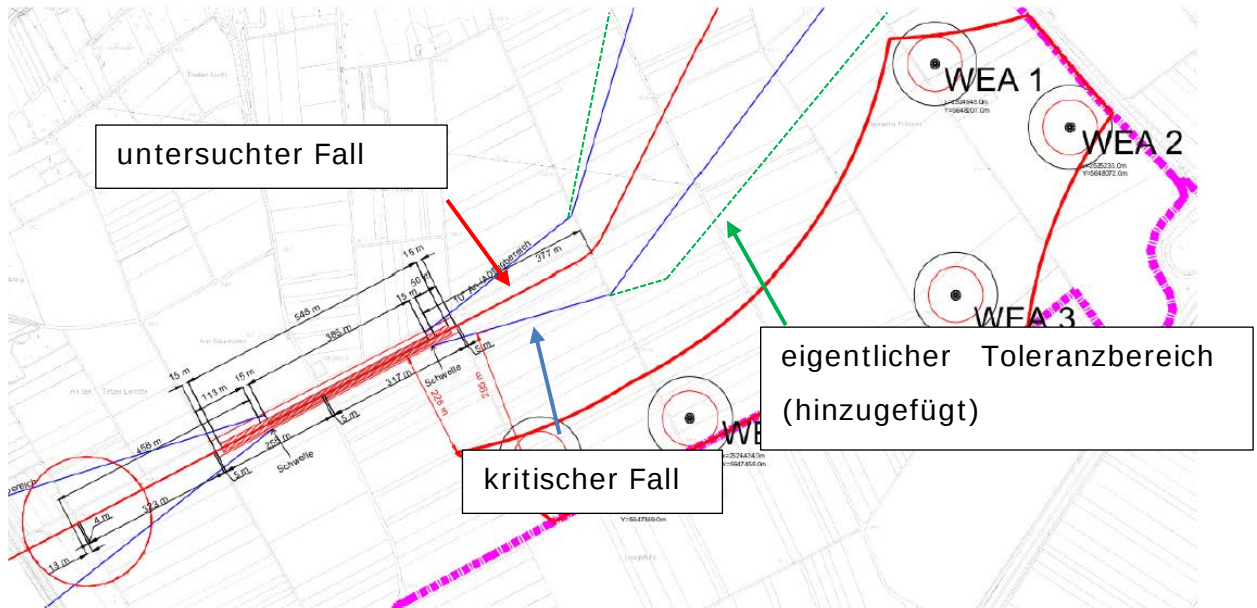


Abbildung 5.6: Planung Luftverkehr Linnich-Boslar (Quelle: [45])

Die Planung der Toleranzbereiche ist nach Vorgaben des deutschen Ultraleichtverbands erfolgt. Unklar ist, weshalb die bekannten Toleranzerweiterungen nach ICAO-Vorgaben aufgrund der flugtechnischen Toleranz (verspätetes Einkurven) und der Windabdrift unberücksichtigt bleiben. Außerdem ist ohne spezielle Führung nach einer Kurve mit einer Aufweitung der Toleranzzone von 15° zu rechnen [27], sodass sich in etwa die grünen Toleranzbereiche ergeben.

Nachfolgend wird vorgestellt, dass Windrichtungen aus allen Himmelsrichtungen untersucht werden. Sinnvoller wäre es gewesen, mit geringeren Winkelabständen aufgelöst, insbesondere Situationen zwischen Nordost und Südwest zu untersuchen. Aus der CFD-Untersuchung im Jahr 2014 ist bekannt, dass auf der Anströmungsseite einer Windkraftanlage kaum

Störungen zu erwarten sind, sondern vor allem im Nachlauf. Der auf den ersten Blick kritischste Fall, Wind aus 165° , wird so nicht als Einzelfall untersucht.

„Dazu wird der Interpolationsfaktor γ für verschiedene als 10-Minuten-Mittelwerte in 10 m Höhe gemessene Windgeschwindigkeiten aus Tabelle 2 in Studie [2] [Studie aus dem Jahr 2014] entnommen.“ [45]

Der kritische Fall ist weiterhin eine Böe und nicht der Durchschnittswert. Somit werden die Auswirkungen des Nachlaufes unterschätzt.

„Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 8 m/s in 10 m Höhe startet im Allgemeinen kein UL-Flieger, solche Bedingungen wurden also nicht untersucht.“ [45]

Unklar bleibt, weshalb Windgeschwindigkeiten > 8 m/s (15 kt) in 10 m Höhe unberücksichtigt bleiben. Ultraleichtflugzeuge (auch eine C22) können auch bei höheren Windgeschwindigkeiten fliegen, starten und landen. Der kritische Fall ist wahrscheinlich der Punkt der maximalen Leistung (siehe Diagramm 3.1) der Windkraftanlage.

Die nachfolgend getroffene Annahme, dass während des An- und Abfluges keine negative Beschleunigung auftreten soll, ist durchaus sehr sinnvoll, da Ultraleichtflugzeuge mit ausgefahrenen Landeklappen keine negativen Beschleunigungen aufgrund von Strukturschäden erfahren dürfen. Außerdem ist ein derartiges Durchsacken in so niedriger Höhe als gefährlich anzusehen.

„Häufig spielt der negative Bereich des Diagramms bei Akrobatikflügen [Anmerkung: Aerobatikflügen] eine Rolle, etwa beim Flug über Kopf. Dann sorgt die Flügelunterseite für den benötigten Auftrieb.“ [45]

Fachlich richtig entstehen Auftriebskräfte am Tragflügel aufgrund des Differenzdruckes zwischen Tragflächenober- und -unterseite. Kunstflug ist mit Ultraleichtflugzeugen in Deutschland verboten, sodass dies ein nicht zu berücksichtigendes Belastungsereignis ist.

Eine „von oben einwirkende Böe“ [45] reduziert viel mehr den Anstellwinkel unter Umständen so weit, dass die Tragfläche Abtrieb erzeugt. Eine „Vorzeichenumkehr“ dagegen ist ein unstetiger Vorgang, bekannt aus der Mathematik oder Informatik. „Sog“ ist definitiv das falsche Wort hierfür, da es vielmehr einen Relativdruck beschreibt.

„Tatsächlich kann der unerwünschte Effekt im Normalfall in der Praxis durch ein Gegensteuern des Piloten verringert oder vermieden werden. Dabei wird einerseits der effektive Wert des Auftriebskoeffizienten c_A verändert, und damit die Steigung der Böenlinie im V-n-Diagramm, und andererseits der Anstellwinkel der Böenwirkung angepasst.“ [45]

Der Pilot hat keinen Einfluss auf die beschriebenen Flugbereichsgrenzen. Der Pilot hat keinen direkten Einfluss auf den Auftrieb, da über die Flugsteuerung nur Momente um den Schwerpunkt aufgebracht werden können. So kann bestenfalls die Längsneigung verändert werden und somit der Auftrieb angepasst werden.

Die Steigung der Böenlinie ist eine Funktion der Flugzeugmasse m , des Tragflächeninhaltes S , der Auftriebsänderung in Abhängigkeit der Anstellwinkeländerung $\frac{dc_A}{d\alpha}$ und der Erdbeschleunigung g . [46]

$$\Delta n = q \cdot S \cdot \frac{dc_A}{d\alpha} \cdot \frac{1}{m \cdot g} \quad (5.1)$$

Somit hat der Pilot entgegen des Zitates keinen Einfluss auf die Steigung der Böenlinie und keinen direkten Einfluss auf den Auftrieb der Tragfläche.

„Hier und in den vorangegangenen Studien [1, 2] werden Auftriebskoeffizient und der böenkorrigierte Anstellwinkel als konstant angenommen, eine Veränderung der Flugeigenschaften durch Manöver werden also nicht berücksichtigt.“ [45]

Dies wäre aber notwendig, da beispielsweise durch einen Kurvenflug die Geschwindigkeit des Strömungsabrisses durch die zusätzliche Kurvenbeschleunigung signifikant steigt.

Nachfolgendes Zitat fasst die Grenzen des Gutachtens zusammen:

„Die Berechnung des realistischen Flugzeugverhaltens im Windfeld des Windparks jenseits der Untersuchung der Grenzen des V-n-Diagramms bedürfte einer detaillierten Flugsimulation, also der Lösung der entsprechenden Bewegungsgleichungen (vgl. [3, 4]) für ein numerisches Flugzeugmodell. Dieses übersteigt den Rahmen dieser und der bisherigen vom IWES durchgeführten Untersuchungen.

[...]

Eine realistische Simulation der Flugzeugdynamik in Gegenwart von WEA-Nachläufen steht allerdings nach wie vor aus und ist nicht Teil der vorliegenden Beurteilung.

[...]

Für ihre weitergehende Untersuchung wären eine detaillierte Simulation des Fluges durch das vom Windpark geprägte Windfeld oder Flugversuche vonnöten, die den Rahmen dieser Untersuchung übersteigen.

[...]

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass nicht berücksichtigbare [sic!] Phänomene zu zusätzlichen Belastungen führen können, etwa ungünstige Wetterbedingungen.“ [45]

5.2.3 “The influence of wind turbine induced turbulence on ultralight aircraft”, a CFD analysis, Von Karman Institute for Fluid Dynamics

Am belgischen Von Karman Institute for Fluid Dynamics sind für eine E82-2MW-Windenergieanlage mit 82 m Rotordurchmesser die Auswirkungen des Nachlaufes auf ein Ultraleichtflugzeug untersucht worden, das diesen durchfliegt. Es sind dabei die statischen und dynamischen Reaktionen des Luftfahrzeuges auf die Störung der Anströmung durch den Nachlauf der Windenergieanlage bestimmt worden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass bei 13 m/s Windgeschwindigkeit in 20 m über dem Erdboden ein Sicherheitsmindestabstand von 1200 m einzuhalten sei. Hierbei stellen sich nicht die vertikalen Beschleunigungen als kritischer Faktor heraus, sondern die Tatsache, dass die abschwimmenden Turbulenzballen der Anlage eine ähnliche Größenordnung wie das Luftfahrzeug haben und somit die Rollsteuerbarkeit verloren geht.

Die Windenergieanlage wird wiederum mittels einer Wirkscheibe simuliert. Der Einfluss auf das Windfeld wird mittels der Goldstein-Propellertheorie simuliert.

Wiederum wird lediglich mit einer maximalen Turbulenz in Größenordnung der Standardabweichung gerechnet. Wie in 5.3.1 bereits erklärt, wäre eine Vervierfachung dieses Turbulenzwertes eine sinnvolle Annahme für eine konservative Abschätzung. [43]

Im weiteren Verlauf wird als kritischer Fall betrachtet, dass abschwimmende Wirbel asymmetrisch eine Tragfläche mit der maximalen positiven Geschwindigkeit und die andere mit der maximalen negativen Geschwindigkeit treffen. Aus 3 % Turbulenzintensität bei 12 m/s Windgeschwindigkeit, die als äußerst gering anzusehen ist (siehe Kapitel 5.2), ergibt sich eine Turbulenzgeschwindigkeit von 0,4 m/s. Bezogen auf die Fluggeschwindigkeit von 33 m/s ergibt sich jedoch dadurch ein Anstellwinkel von 1° (nicht $0,25^\circ$). Der kritische Fall wäre jedoch der Landeanflug mit unter 20 m/s Fluggeschwindigkeit. Dann wären deutlich höhere Rollraten zu erwarten. [47]

5.2.4 „CAA Windturbine Wake Encounter Study“, University of Liverpool

Am East Midland Airport in UK befinden sich mehrere Windenergieanlagen vom Typ WTN250 mit 30 m Rotordurchmesser. Sie stehen im Abstand von 22,5 Rotordurchmesser (675 m) Entfernung zur Start- und Landebahn. Untersucht worden ist mittels einer Laserströmungsmessung, wie weit der Nachlauf hinter den Anlagen messbar ist. Es konnte in fünffachem Rotordurchmesser noch über 10 min gemittelt eine Verzögerung der Strömung um 25 % (2 m/s) festgestellt werden. In Simulatoruntersuchungen wurde der Durchflug durch den stetigen Anteil des Nachlaufes in verschiedenen Entfernungen zum Rotor simuliert. Dies führte zu Gierbewegungen von bis zu 10°.

[48]

5.2.5 “Wind Farm Turbulence Impacts on General Aviation Airports in Kansas”. Roll Hazard Analysis

An der University of Kansas ist eine Untersuchung durchgeführt worden, bei der der Bereich bestimmt worden ist, in dem die abschwimmenden Blattspitzenwirbel aufgrund ihrer Intensität ein unkontrollierbares Rollen von Kleinflugzeugen auslösen können.

Hierfür ist folgende Annahme getroffen worden:

“The wind turbine wake model is based on a theoretical helical vortex model and the decay rate is calculated following the aircraft wake decay rate in the atmosphere.” [49]

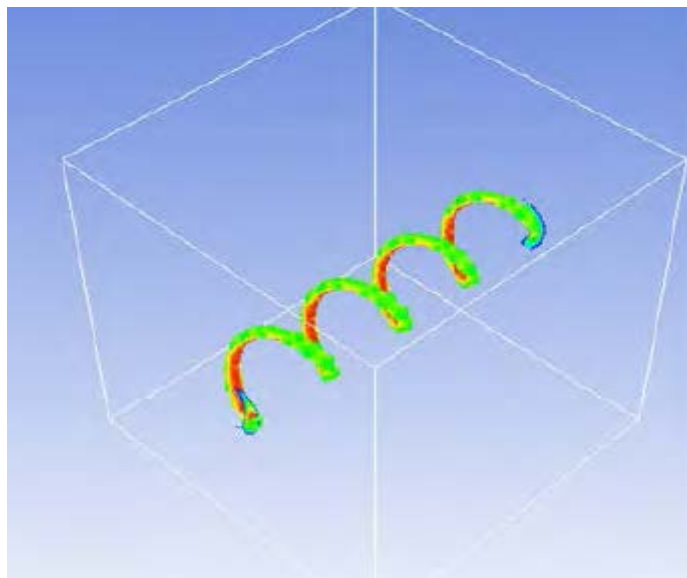


Abbildung 5.7: Simulierter abschwimmender Blattspitzenwirbel (Quelle: [49])

Voranstehende Abbildung zeigt die helixförmige abschwimmende Wirbelschlepe, wie sie zur Simulation verwendet wird. Allerdings bleibt unberücksichtigt, dass bei einem Dreiblattrotor insgesamt drei Wirbelschleppen von den Blattspitzen abschwimmen und dass es ein weiteres System um die Rotorachse gibt, wie in nachfolgender Abbildung 5.8 ersichtlich wird. Auch arbeiten die einzelnen Wirbelschleppen aufgrund ihrer räumlichen Nähe und ihrer Drehrichtung gegeneinander, sodass sie sich wohl deutlich schneller auflösen (siehe Kapitel 5.1).

Eine Gefährdung durch unkontrollierbare Rollbewegungen der Flugzeuge wurde für eine Entfernung bis 2,8 Meilen (=4508 m) festgestellt.

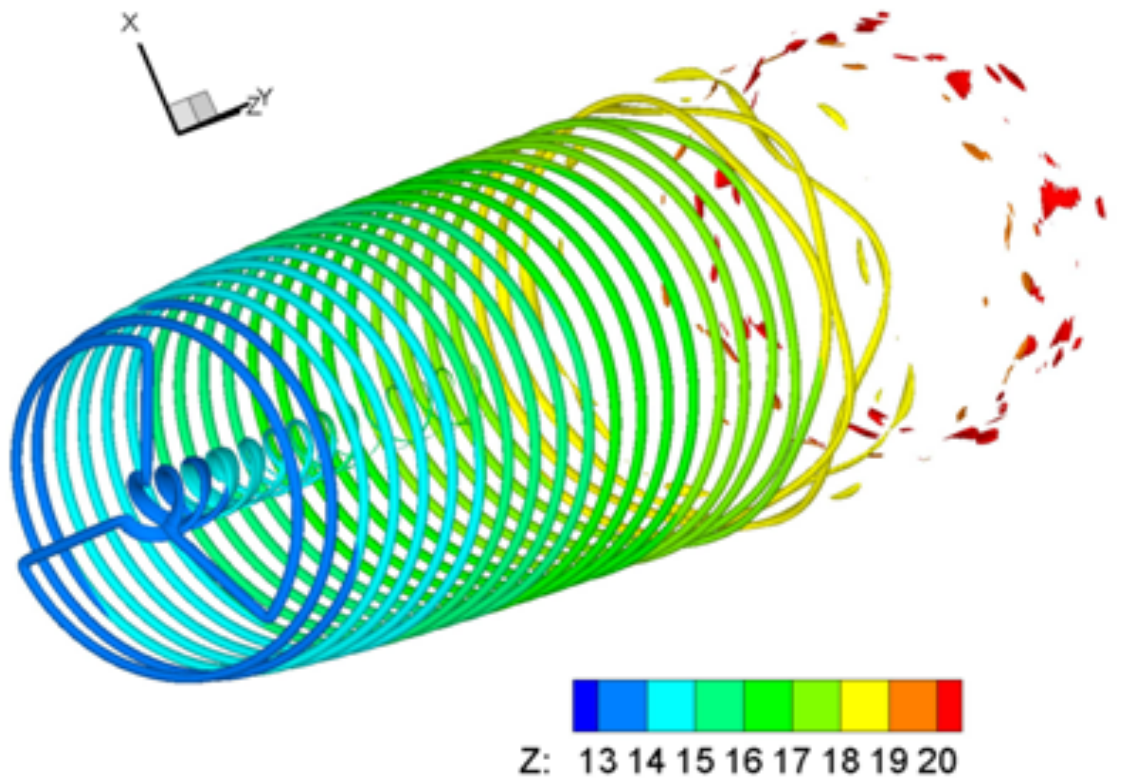


Abbildung 5.8: aufwändige CFD Studie zu Wirbelschleppen einer Windkraftanlage (Quelle: Stefan Ivanell, University of Uppsala [50])

In Abbildung 5.9 (Quelle: [49]) ist durch die Farbe Rot dargestellt in welchem Bereich des Flugplatzes die aussteuerbare Rollrate überschritten werden kann. Die Wirbelstärke ist unabhängig der Windgeschwindigkeit gerechnet worden – in der Realität nimmt mit zunehmender Windgeschwindigkeit die Wirbelintensität jedoch ab, da die Windenergieanlagen leistungslimitiert sind. Somit weist die Studie einen sehr konservativ angenommenen gefährdeten Bereich aus. [49]

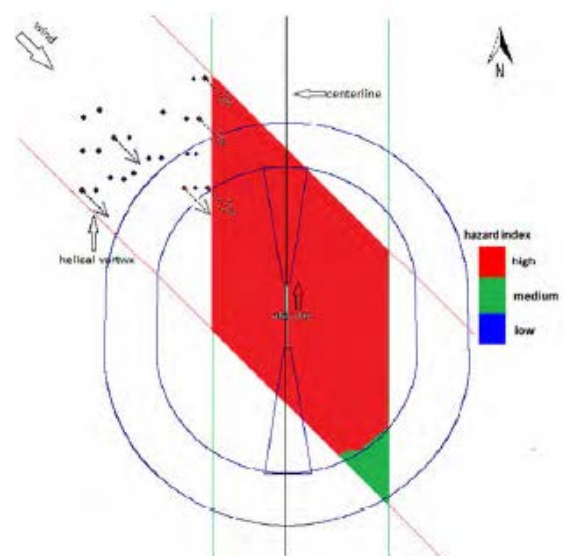


Abbildung 5.9: Gefährdungsbereich abschwimmende Wirbelschleppe

5.2.6 „Untersuchung zum Nachlaufeinfluss von Windenergieanlagen auf Segelflugzeuge“, Diplomarbeit, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik

Am Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart ist eine Diplomarbeit mit dem Titel „Untersuchung zum Nachlaufeinfluss von Windenergieanlagen auf Segelflugzeuge“ verfasst worden. Zur Untersuchung des Nachlaufes wurde eine umfangreiche CFD Untersuchung mit verschiedenen Anströmbedingungen einer vollständig modellierten Windenergieanlage der 5-MW-Klasse mit 125 m Rotordurchmesser durchgeführt.

In einer detaillierten CFD-Studie ist für verschiedene Anströmbedingungen aufgrund möglicher Bodengrenzschichten unter anderem folgender vertikaler Schnitt der Geschwindigkeitsverteilung für die Durchströmung der Windenergieanlage entstanden.

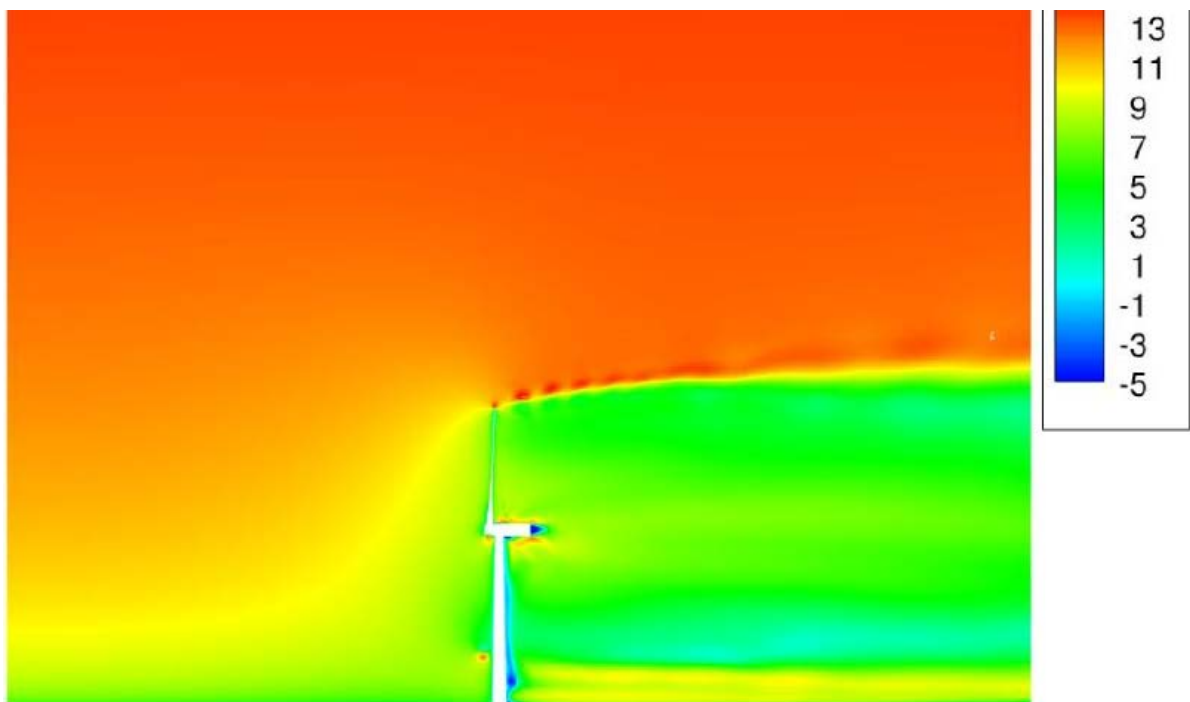


Abbildung 5.10: Beispiel CFD Untersuchung (Quelle: [51])

Gut zu erkennen ist, dass der Nachlauf gegenüber der Anströmung um 6 m/s im oberen Bereich und bis zu 8 m/s im unteren Bereich verzögert ist.

Untersucht worden ist, welchen Kräften, Beschleunigungen und Änderungen der Anströmung ein schweres Segelflugzeug vom Typ Discus (530 kg) und ein schweres Motorsegelflugzeug vom Typ eGenius (930 kg) ausgesetzt sind.

Nachfolgende Angaben beziehen sich auf die umfangreicher dargestellten Berechnungsergebnisse für das Discus Segelflugzeug.

In der Arbeit wird dargestellt, dass das Flugzeug sowohl vertikal als auch horizontal mit bis zu einem Drittel der Erdbeschleunigung beschleunigt wird. Dies entspricht moderaten Turbulenzen. Darüber hinaus kommt es zu einer Änderung des Schiebewinkels von $>20^\circ$. Dies ist mit erheblichen Drehbeschleunigungen des Luftfahrzeuges verbunden.

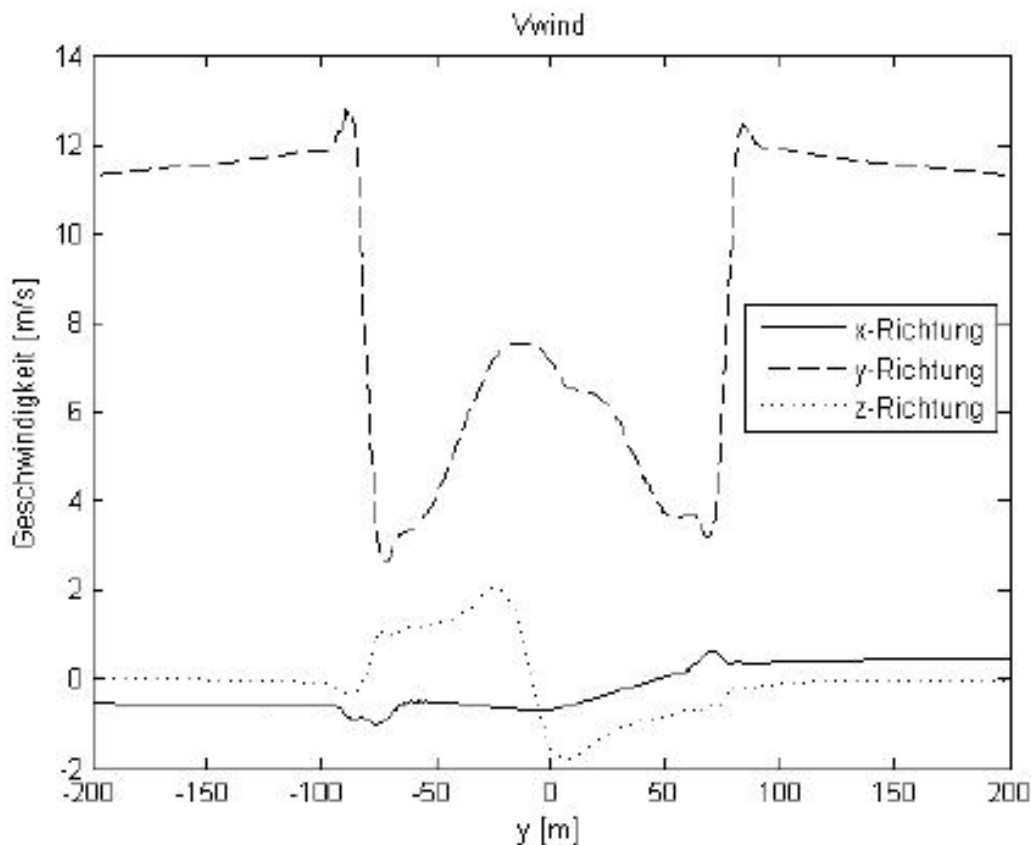


Diagramm 5.6: Anströmungsgeschwindigkeit beim Durchflug im Abstand von 126 m des Windenergieanlagennachlaufes, aufgeteilt in die Raumrichtungen (Quelle: [51])

Aus voranstehendem Diagramm aus der Diplomarbeit ist zu erkennen, dass die horizontale Anströmung sich innerhalb von 25 m um ca. 10 m/s und die vertikale Anströmung um bis zu 4 m/s ändern. Beides ist als moderate Böe einzustufen.

Im Diagramm 5.7 ist die Änderung des Anstellwinkels und des Schiebewinkels dargestellt. Insbesondere der Schiebewinkel ändert sich innerhalb einer Sekunde um 35° . Dies stellt eine gefährliche Belastung der Struktur dar. Der Pilot wird hierdurch signifikant belastet.

[51]

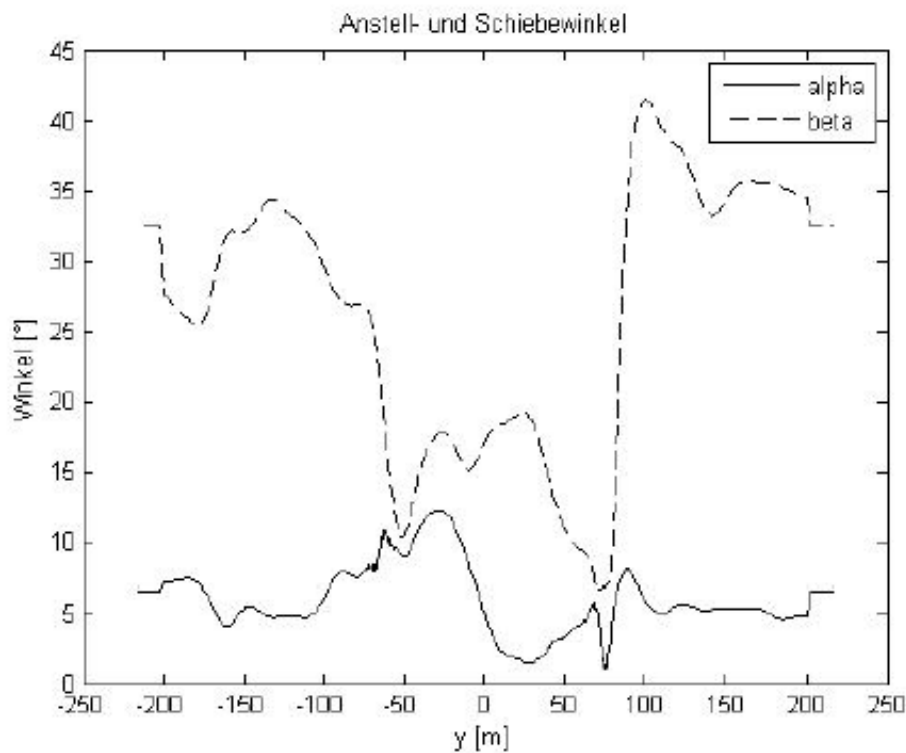


Diagramm 5.7: Änderung des Anstellwinkels und des Schiebewinkels (Quelle: [51])

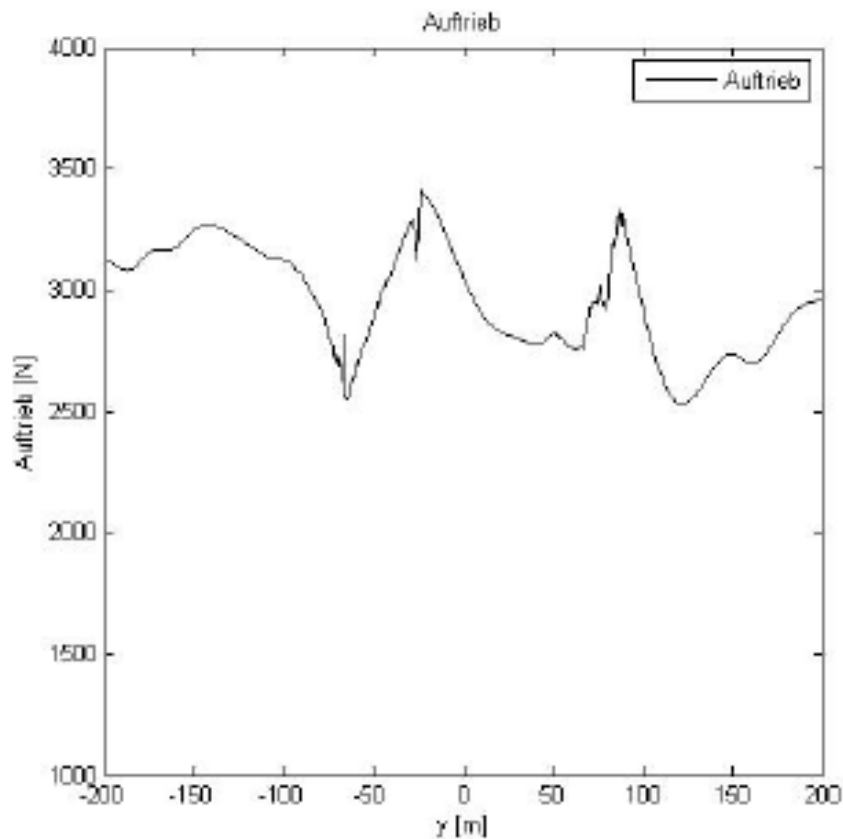


Diagramm 5.8: Änderung des Auftriebs bei einem Rotordurchmesser Abstand
(Quelle: [51])

Der Auftrieb ändert sich im Laufe des Durchfluges um bis zu 900 N. Dies hat moderate Auswirkungen auf das Luftfahrzeug. In größerem Abstand zum Rotor sind sogar größere Einbußen beim Auftrieb zu erwarten.

Als Spitzenwerte können das +2,4-Fache und -0,6-Fache der Erdbeschleunigung angenommen werden. Dies müsste schon als schwere Störung klassifiziert werden.

Auftretende Querkräfte erreichen 1500 N und sind somit auch als moderat einzustufen.

5.2.7 Zusammenfassung

Es ist offensichtlich, dass die Simulation und die Berechnung der Belastung von Luftfahrzeugen durch den Nachlauf von Windenergieanlagen nur mit starken Vereinfachungen machbar sind. Die umfassendste und von der Methodik plausibelste Untersuchung ist die Diplomarbeit von Hannah Schimmels. Diese liefert die am besten gesicherten Ergebnisse, sofern die Diagrammverläufe geglättet betrachtet werden. In dieser Arbeit wurde deutlich gezeigt, dass für ein Luftfahrzeug beim Durchfliegen des Nachlaufes erhebliche Beschleunigungen zu erwarten sind und dass der Flug erheblich gestört wird.

Aus den Arbeiten wird deutlich, dass der Nachlauf auch im Abstand einiger Rotordurchmesser deutliche Auswirkungen auf ein Luftfahrzeug hat. Die Angaben schwanken zwischen fünf Rotordurchmesser (CAA) über 15 Rotordurchmesser (Von Karman-Institut) bis zu 20 Rotordurchmesser (Kansas, Fraunhofer).

5.3 Potenzielle Auswirkungen des Nachlaufes auf das Luftfahrzeug

Mögliche Auswirkungen des Nachlaufes von Windenergieanlagen auf ein Luftfahrzeug sollen anhand der im Kapitel 2.6 vorgestellten Definitionen für Turbulenz und Windscherung und dem in Kapitel 5.1 vorgestellten Windfeld des Nachlaufs abgeleitet werden. Kriterium für zu meidende Bereiche ist dabei die Einstufung mit „moderaten Auswirkungen“ auf ein mittelgroßes Verkehrsflugzeug.

Die größten Turbulenzen und die größte Windscherung können bei der niedrigsten Windgeschwindigkeit, die zur maximalen Leistungsausbeute genügt, erreicht werden. Anlagenabhängig beträgt diese gewöhnlich etwa 12 m/s.

5.3.1 Kriterium Böen und Windscherung

Aus Kapitel 2.6 ist bekannt, dass eine Böe dann ein moderates Niveau für ein Verkehrsflugzeug darstellt, wenn sie eine Größe von 6 m/s hat. Bei einer Geschwindigkeit des freien Windfeldes von 12 m/s ist dies eine Halbierung der Strömungsgeschwindigkeit. Dies bedeutet, dass die Windgeschwindigkeit im Nachlauf auf die Hälfte der Anströmgeschwindigkeit abgefallen ist. Dies ist für einen Abstand bis 7 Rotordurchmesser im Nachlauf der Fall, wie aus nachfolgender Grafik mittels der roten senkrechten Linie erkenntlich wird.

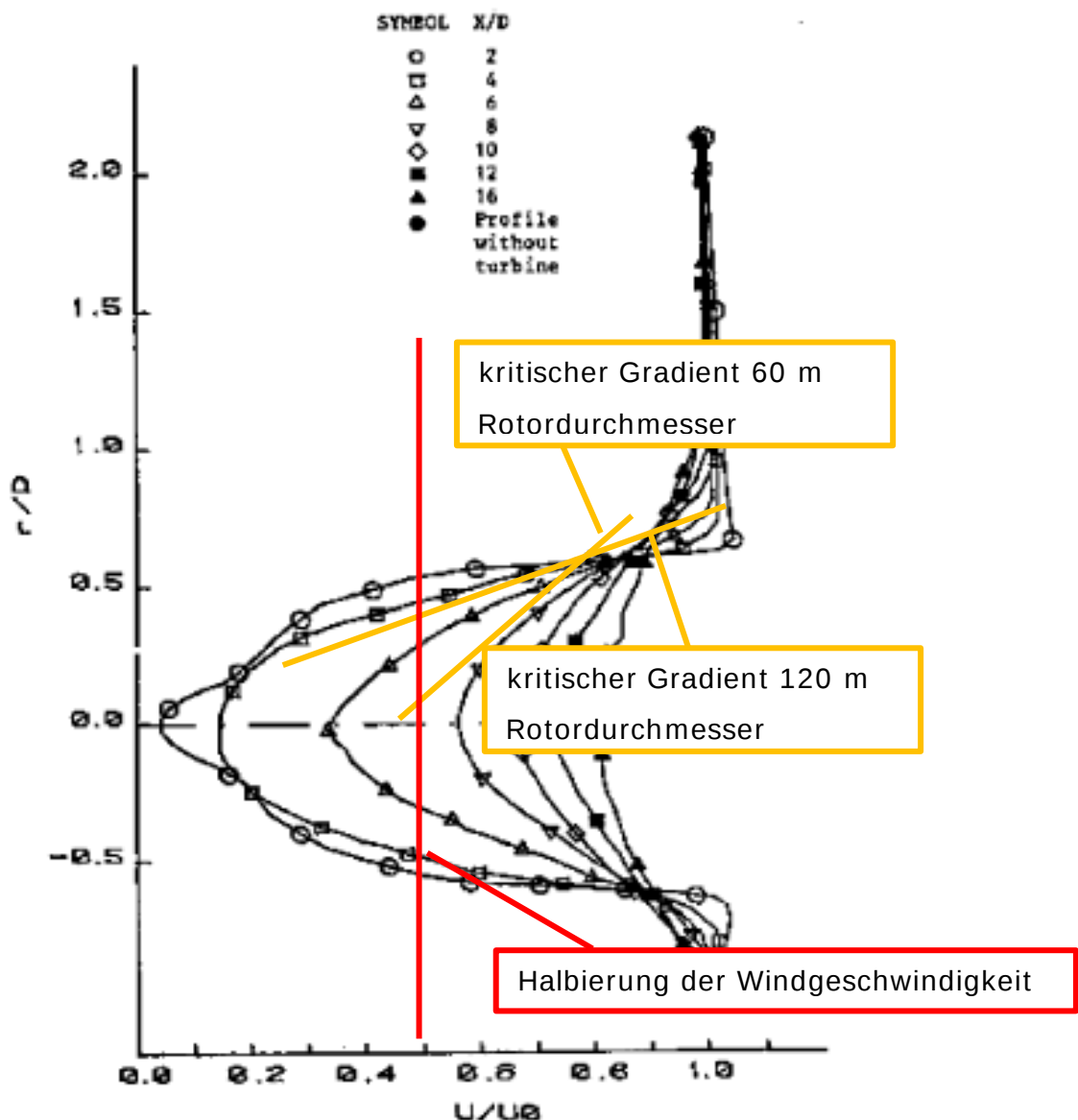


Diagramm 5.9: Geschwindigkeitsverteilung hinter einer Windenergieanlage
(Quelle: [39])

Alternativ wird der Wert für die vertikale Windscherung als kritischer Wert untersucht. Hiernach ist ein Gradient von 4 m/s je 30 m als kritisch anzusehen. Bei 12 m/s Anströmungsgeschwindigkeit bedeutet dies mit Hinblick auf das Diagramm 5.9 dies für eine Windenergieanlage mit 60 m Rotordurchmesser, dass der Anstieg von $u/u_0=0,33$ je $0,5=r/D$ ist. Für eine Windenergieanlage mit 120 m Rotordurchmesser muss der Anstieg $u/u_0=0,67$ je $0,5 r/D$ sein. Eine Windenergieanlage mit 60 m Rotordurchmesser erfüllt dieses Kriterium bis zum achtfachen Rotordurchmesser. Eine Windenergieanlage mit 120 m Rotordurchmesser erfüllt dieses Kriterium bis zum sechsfachen Rotordurchmesser (siehe in Diagramm 5.9 eingezeichnete gelbe Tangenten).

5.3.2 Kriterium Eddy Dissipation Rate

Zur Klassifizierung des Turbulenzniveaus der Luft wird in der Luftfahrt die sogenannte Eddy Dissipation Rate verwendet. Dargestellt werden Werte der dritten Wurzel der Eddy Dissipation Rate. Dieses Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es unabhängig von möglichen Veränderungen von Windgeschwindigkeiten durch Böen eine klare Aussage zur Turbulenzhaftigkeit der umgebenden Luft macht. Im Diagramm 5.10 ist die Eddy Dissipation Rate abhängig von der Windgeschwindigkeit als blaue Linie und Punkte abgebildet. Die untere Kurve steht dabei für den Fall der natürlichen Turbulenz auf Nabenhöhe. Die obere Kurve repräsentiert die Messdaten für den Nachlauf einer Windenergieanlage in zwei Rotordurchmesser Abstand.

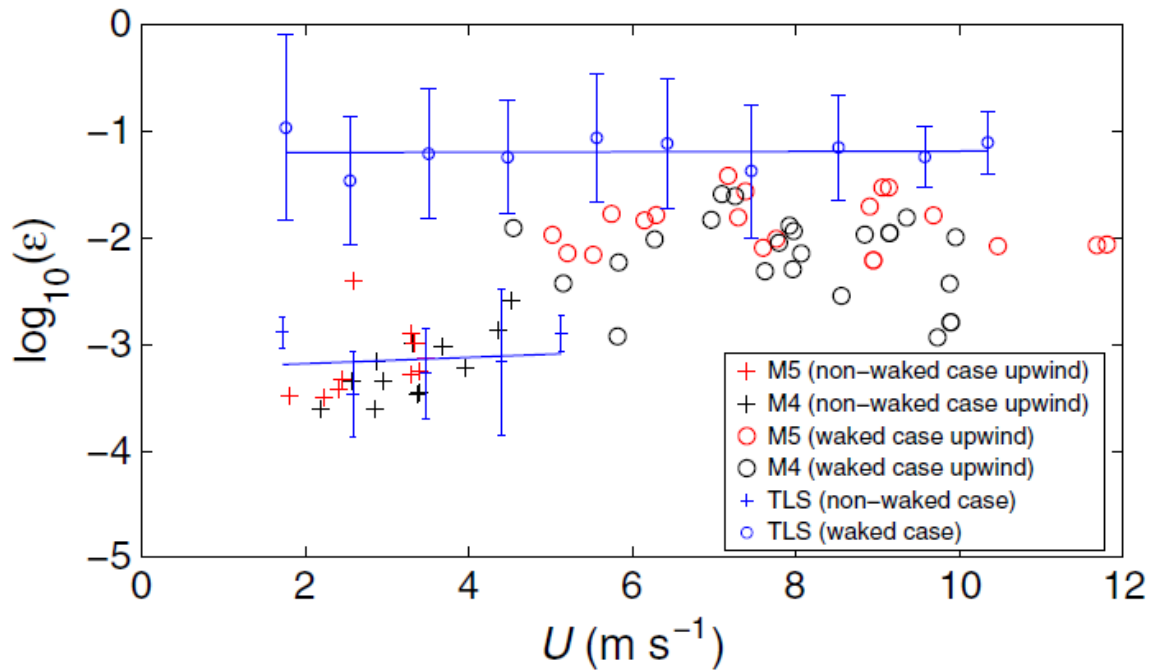


Diagramm 5.10: Eddy Dissipation Rate (Quelle: [52])

Zu erkennen ist, dass die *EDR* für den Nachlauf einer Windenergieanlage relativ unabhängig von der Windgeschwindigkeit ist. Die natürliche Turbulenz dagegen steigt leicht an. Es kann festgestellt werden, dass die dritte Wurzel der EDR für die natürliche Turbulenz $0,1 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$ beträgt (und somit unterhalb der leichten Turbulenz liegt). Im Abstand von zwei Rotordurchmessern beträgt der Wert im Nachlauf jedoch $0,5 \text{ m}^{2/3}/\text{s}$. Dies entspricht moderaten Turbulenzen für ein mittelgroßes Verkehrsflugzeug. Die Auswirkungen auf Kleinflugzeuge sind deutlich größer. [53]

5.3.3 Zusammenfassung

Aus den vorangehenden Untersuchungen muss geschlussfolgert werden, dass für Abstände < 7 Rotordurchmesser im Nachlauf einer Windenergieanlage eine konkrete Gefahr für ein Luftfahrzeug besteht. Dieser Bereich muss gemieden werden. Das Kriterium hierfür sind die zu erwartenden signifikanten Böen und Windscherungen, die ein erhebliches Aussteuern durch den Piloten verlangen. Dies lenkt die Aufmerksamkeit von den eigentlichen Aufgaben in Flugplatznähe, beispielsweise das Beobachten anderer Verkehrsteilnehmer und die Landevorbereitung, unzulässig ab.

Ergänzend kann für den Bereich von Windscherungen und Turbulenzen folgende Empfehlung aus dem ICAO Manual on Low Level Wind Shear wiedergegeben werden.

“It should be borne in mind, however, that pilots are not encouraged to attempt to fly in known or suspected wind shear conditions; on the contrary, the overwhelming advice is AVOID AVOID AVOID. [Es sollte immer im Gedächtnis bleiben, dass es nicht ausreicht, Piloten nahe zulegen, nicht in bekannte Windscherungsgebiete zu fliegen. Vielmehr muss der Ratschlag bekräftigt werden, dass diese zwingend zu vermeiden sind.]” [54]

Die ICAO gibt also den Ratschlag, Gebiete, in denen Windscherung zu erwarten ist, zwingend zu vermeiden. Weiterhin wird in diesem Manual der Ratschlag gegeben, dass mit dem Einflug in eine Windscherung unverzüglich durchgestartet werden soll, um diesen Bereich wieder zu verlassen.

6. Experimentelle Untersuchung

6.1 Untersuchungshorizont

Zur experimentellen Untersuchung der Pilotenbelastung, die bei dem Vorbeiflug an Hindernissen entsteht, sind Testflüge mit verschiedenen Piloten an zwei verschiedenen baulichen Luftfahrthindernissen durchgeführt worden.

Diese Testflüge dienten sowohl der Erfassung der individuellen Pilotenbelastung, als auch der Erfassung der Abstandseinschätzung der Piloten an Hindernissen.

Die experimentelle Untersuchung soll die Gegenüberstellung von Pilotenbelastung und Abstandseinschätzung bei statischen Objekten (Funkturn) und Windenergieanlagen aufzeigen.

6.2 Vorgehensweise

Die Testflüge beinhalteten mehrere Aufgaben, die absolviert werden mussten. Die Piloten wussten vor dem Flug nicht, welche Aufgaben folgen. Vor dem Flug bekamen sie lediglich eine Einführung in den NASA Task Load Index (NASA-TLX) mit dem Hinweis, dass dieser getestet und ausprobiert werden solle. [55]

Zum Start wurde der Bereich für die folgenden Manöver angesagt. Es wurde zuerst entweder in Richtung eines Windparks oder eines Funkturmes geflogen. Nachdem das jeweilige Hindernis erreicht wurde, erhielten die Piloten eine Aufgabenstellung. Diese galt es zu erledigen. Im Anschluss daran gab es weitere Anweisung. Sobald alle Aufgaben an einem Hindernis erfüllt waren, ging es weiter zu dem jeweils anderen. Dort erfolgte dann die gleiche Vorgehensweise.

Nach Durchführung eines Aufgabenblocks, entweder der Aufgaben an den Windenergieanlagen oder am Funkturn, wurden den Probanden verschiedene Fragen gemäß dem NASA Task Load Index gestellt, um die Belastung der Piloten ermitteln zu können.

Nach Durchführung des gesamten Testfluges wurde der Pilot zum Schweigen verpflichtet und durfte nicht über Ergebnisse und Abläufe seines Testfluges sprechen, um die Leistung weiterer Testteilnehmer nicht zu beeinflussen.

Während des gesamten Fluges wurde die Flugbahn mit einem GPS-Tracker aufgezeichnet.

6.3 Grundlagen

Die Abfragen wurden auf Grundlage des NASA Task Load Index, im weiteren Verlauf NASA-TLX genannt, durchgeführt.

Der NASA-TLX liefert uns eine Methode zur Ermittlung der Pilotenbelastung auf multidimensionaler und subjektiver Ebene. Er vereinigt die Hauptkomponenten der subjektiven Belastung.

Diese Komponenten sind:

1. Mentale Beanspruchung

Damit ist gemeint, wie hoch die geistige Beanspruchung des Probanden zum Ausführen der Aufgabe war. Hierzu gehören Aspekte wie Denken, Rechnen oder Entscheiden.

2. Körperliche Beanspruchung

Hierbei spielt die physische Aktivität eine Rolle. Dabei geht es darum, wie stark der Proband zum Beispiel drücken oder ziehen musste. Außerdem wird hier abgefragt, wie belastend, ermüdend oder strapazierend eine Aufgabe war.

3. Zeitliche Beanspruchung

Bei der zeitlichen Beanspruchung soll der Proband angeben, wie groß der eventuell gefühlte Zeitdruck beim Ausführen der Aufgabe war.

4. Leistung

Der Aspekt der Leistung dient der Selbsteinschätzung des Probanden. Dabei soll er seine Leistung bei der Ausführung der Aufgabe selbst einschätzen.

5. Aufwand

Hier soll der gesamte Aufwand, den der Proband bei der Ausführung der Aufgabe aufzubringen hatte, dargestellt werden. Dazu soll er angeben, wie groß der körperliche aber auch der mentale Aufwand war, die Aufgabe zu erfüllen.

6. Frustration

Bei diesem Aspekt geht es darum, wie gestresst, irritiert oder genervt der Proband während der Aufgabe war.

Die TLX-Technik erfordert dabei, dass die Probanden nach jedem Aufgabenblock, der durchgeführt wurde, auf einer fünfstufigen Skala von 0 bis 100 eine Bewertung nach eigenem Ermessen abgeben müssen.

Zum Beispiel:

Wie hoch war die mentale Beanspruchung während der Aufgabe?

(0 = sehr gering, 100 = sehr hoch)

Des Weiteren werden dem Probanden alle möglichen paarweisen Kombinationen der Hauptkomponenten subjektiver Belastung genannt und er soll bewerten, welcher von beiden er jeweils die größere Bedeutung zuspricht.

Zum Beispiel:

Leistung ↔ zeitliche Beanspruchung

Mit diesen Angaben kann dann ermittelt werden, wie hoch die Belastung des Probanden bei der Aufgabendurchführung gewesen ist. Der Fragebogen sieht wie folgt aus.

NASA-TLX-Fragebogen:

Gewichtung der Kriterien nach Relevanz:

1. Physical Demand / Mental Demand	Körperliche / Geistige Beanspruchung
2. Temporal Demand / Mental Demand	Zeitliche / Geistige Beanspruchung
3. Performance / Mental Demand	Leistung / Geistige Beanspruchung
4. Frustration / Mental Demand	Frustration / Geistige Beanspruchung
5. Effort / Mental Demand	Aufwand / Geistige Beanspruchung
6. Temporal Demand / Physical Demand	Zeitliche / Körperliche Beanspruchung
7. Performance / Physical Demand	Leistung / Körperliche Beanspruchung
8. Frustration / Physical Demand	Frustration / Körperliche Beanspruchung
9. Effort / Physical Demand	Aufwand / Körperliche Beanspruchung
10. Temporal Demand / Performance	Zeitliche Beanspruchung / Leistung
11. Temporal Demand / Frustration	Zeitliche Beanspruchung / Frustration
12. Temporal Demand / Effort	Zeitliche Beanspruchung / Aufwand
13. Performance / Frustration	Leistung / Frustration
14. Performance / Effort	Leistung / Aufwand
15. Effort / Frustration	Aufwand / Frustration

Einschätzung der Kategorien bei der jeweiligen Aufgabe auf einer Skala von 0 bis 100, unterteilt in Fünfer-Schritten:

Beispiel:

Wie haben Sie sich während der Durchführung der Aufgabe gefühlt?

0 = sehr entspannt

100 = sehr gestresst

Okay los geht'!:

1. Mental Demand:

Wie hoch war die mentale Beanspruchung während der Aufgabe?

0 = sehr gering

100 = sehr hoch

2. Physical Demand:

Wie hoch war die körperliche Beanspruchung während der Aufgabe?

0 = sehr gering

100 = sehr hoch

3. Temporal Demand:

Wie hastig, oder hektisch war das Tempo während der Aufgabe?

0 = sehr gering

100 = sehr hoch

4. Performance:

Wie schätzen Sie Ihren Erfolg ein, hinsichtlich der Aufgabe, die an Sie gestellt wurde?

Wie gut haben Sie die Aufgabe ausgeführt?

0 = Perfekt

100 = Verfehlt

5. Effort:

Wie hoch war Ihr Aufwand, um dieses Leistungslevel zu erreichen?

0 = sehr gering

100 = sehr hoch

Frustration:

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und gereizt waren Sie?

0 = sehr gering

100 = sehr hoch

Nachdem die Befragung wie beschrieben gemäß NASA Task Load Index durchgeführt worden ist, wurden die Daten wie folgt ausgewertet.

Zuerst wurden die Wertigkeiten der einzelnen Kategorien tabellarisch erfasst. Dazu wurde den Kategorien jeweils ein Punkt zugerechnet, wenn diese bei der Gegenüberstellung vom Probanden priorisiert wurde. Das heißt, wenn zum Beispiel die geistige Beanspruchung (MD) fünfmal die Priorität gegenüber einem anderen Aspekt erhielt, bekommt sie die Wertigkeit 5.

Beispielsweise:

PD / MD	TD / PD	TD / FR
TD / MD	OP / PD	TD / EF
OP / MD	FR / PD	OP / FR
FR / MD	EF / PD	OP / EF
EF / MD	TD / OP	EF / FR

MD	5
PD	0
TD	2
OP	3
EF	4
FR	1
Summe	15

Tabelle 6.1: Beispielwertung NASA Task-Load-Index

Mit dieser Gewichtung und den sechs abschließenden Fragen, bei denen die Probanden die einzelnen Kategorien auf einer Skala von 0 bis 100 bewerten mussten (Rating), kann die Pilotenbelastung ermittelt werden. Dazu wird zunächst das Produkt aus Rating und Wertigkeit ermittelt. Anschließend werden alle Produkte summiert. Im letzten Schritt wird dann die Summe durch die Summe aller Gewichte (15) geteilt.

Das Ergebnis ist ein Wert zwischen 0 und 100. Erreicht ein Proband bei einer Aufgabe eine Wertigkeit von 100, also das Maximum, so ist er zu 100 % ausgelastet und kann keine weiteren Aufgaben mehr ausführen – es steht kein Potenzial mehr zur Verfügung.

Stellt sich beim Probanden nach Durchführung der Summierung eine Wertigkeit von 0 heraus, so war er zu 0% ausgelastet und hatte noch 100% seines Belastungspotenzials übrig für weitere Aufgaben.

Beispielsweise:

Kategorien	Rating	Wertigkeit	Produkt
MD	80	5	400
PD	10	0	0
TD	20	2	40
OP	0	3	0
EF	50	4	200
FR	90	1	90
Summe			730
Weights Total			15
Mean Score			48,6666667

Tabelle 6.2: Beispielrechnung NASA Task Load Index

Somit erhält man die Belastungswertung. Hier entspricht sie dem Wert 48,67.

6.4 Versuchsbeschreibung

6.4.1 Vorbeiflug in Nabenhöhe (Aufgabe 1)

Die erste zu absolvierende Aufgabe bestand darin, an einem Windpark auf Nabenhöhe der Windenergieanlagen (500 ft über Grund) parallel zur Rotationsebene mit einem Abstand von 300 m vorbeizufliegen. Dabei wurde die zu fliegende Höhe vorgegeben und der Abstand sollte von den Piloten geschätzt werden.

6.4.2 Vorbeiflug in Höhe der Rotorblattspitzen (Aufgabe 2)

Bei der zweiten Aufgabe galt es, an den Windenergieanlagen parallel zur Rotationsebene in Höhe der Blattspitzen (700 ft) mit einem Abstand von 300 m vorbei zu fliegen. Wie bei Aufgabe 1 wurde hier nur die Höhe vorgegeben und der Abstand musste abermals geschätzt werden.

6.4.3 Überflug

Bei Durchführung der dritten Aufgabe mussten die Piloten die Windenergieanlagen in einer Höhe von 1300 ft (600 ft über der Blattspitze) überfliegen. Hierbei ging es darum, den Piloten einen Abstandseindruck zu vermitteln.

6.4.4 Referenzflug (Aufgabe 3)

Der Referenzflug stellte unseren zweiten Aufgabenblock dar. Als Referenz diente ein Funkturm. Hier mussten die Piloten einen Vorbeiflug in Höhe der Turmspitze (800 ft) absolvieren und danach den Turm in einer Höhe von 1400 ft (600 ft über der Turmspitze) überfliegen.

6.4.5 Piloten

In folgender Tabelle sind die Flugerfahrungen der Testkandidaten zusammengefasst.

Pilot	Alter	Flugerfahrung [Flugstunden]	Status
Pilot A	49	>1000	Fluglehrer
Pilot B	26	1000	Pilot
Pilot C	27	350	Pilot
Pilot D	22	380	Pilot
Pilot E	41	1	Flugschüler
Pilot F	22	35	Hobbypilot
Pilot G	56	700	Fluglehrer

Tabelle 6.3: Pilotendaten

6.5 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse vorgestellt.

6.5.1 Versuche 1 und 2

6.5.1.1 Einschätzung der Horizontalabstände

In folgenden Diagrammen sind die tatsächlich geflogenen Abstände der Versuche 1 und 2 dargestellt:

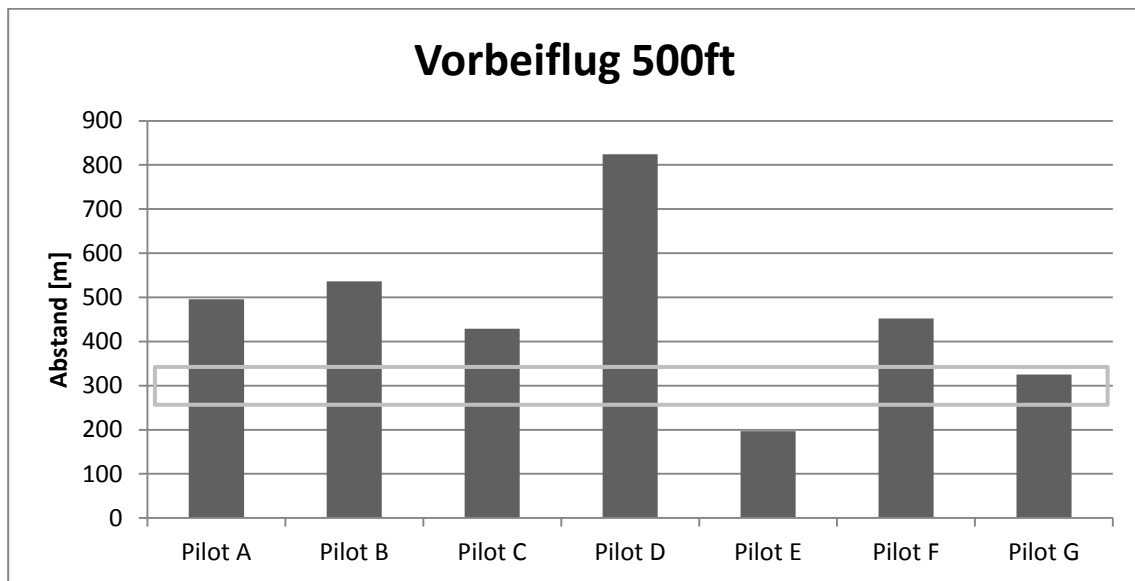


Diagramm 6.1: Abstände Aufgabe 1

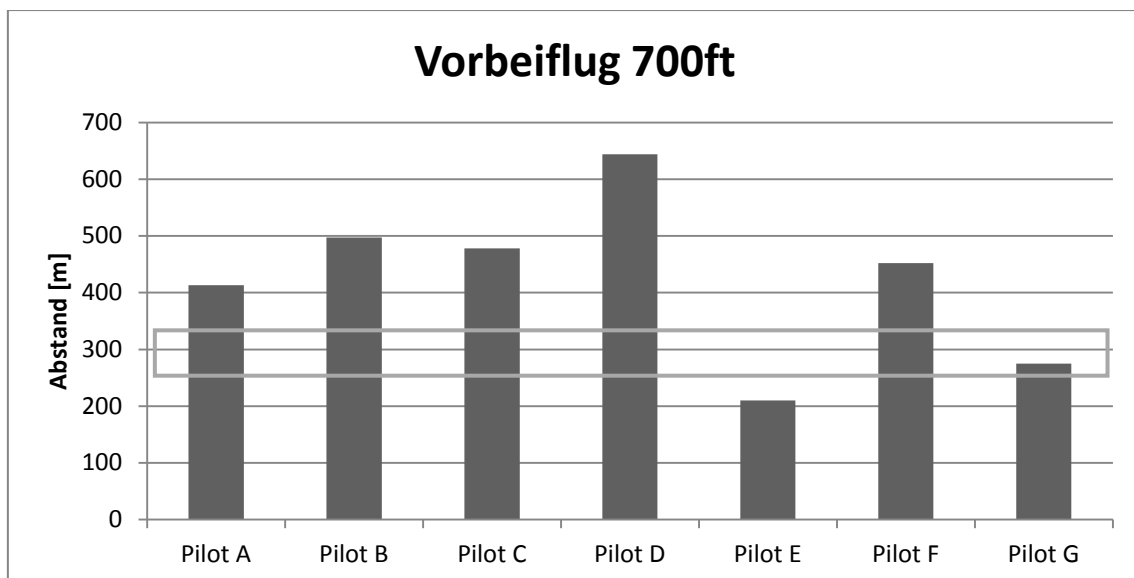


Diagramm 6.2: Abstände Aufgabe 2

Der geflogene Abstand ist nachfolgend bezogen auf die Flugerfahrung dargestellt:

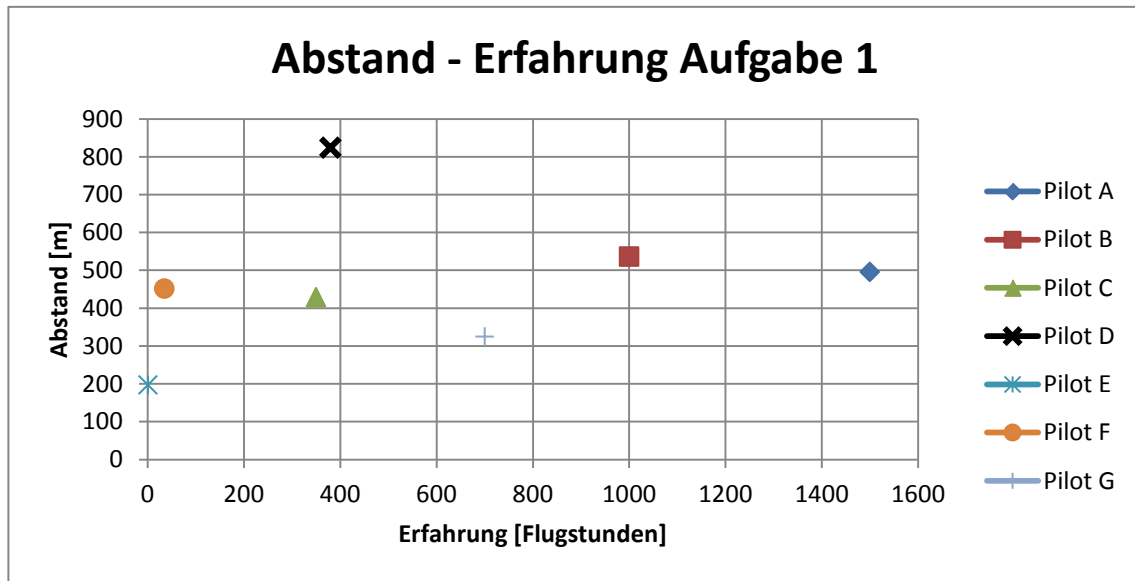


Diagramm 6.3: Abstand - Erfahrung Aufgabe 1

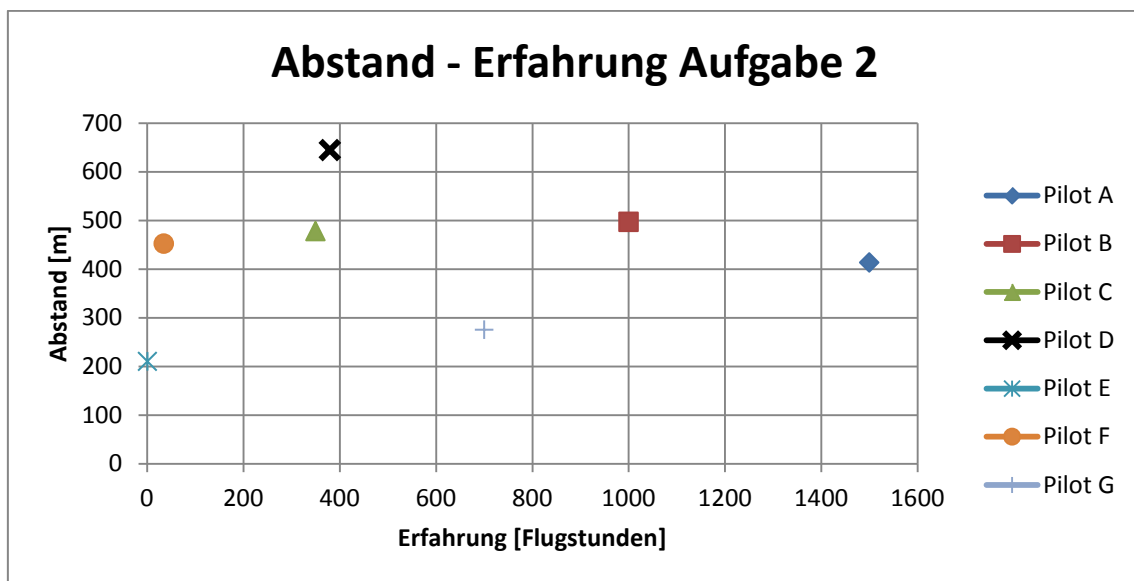


Diagramm 6.4: Abstand - Erfahrung Aufgabe 2

Im Folgenden sollen die Abstände der einzelnen Piloten zu den Hindernissen/
Windenergieanlagen mittels der GPS-Aufzeichnung dargestellt werden.

Pilot A:



Abbildung 6.1: Pilot A Abstand
Aufgabe 1



Abbildung 6.2: Pilot A Abstand
Aufgabe 2

Pilot B:



Abbildung 6.3: Pilot B Abstand
Aufgabe 1



Abbildung 6.4: Pilot B Abstand
Aufgabe 2

Pilot C



Abbildung 6.5: Pilot C Abstand Aufgabe 1



Abbildung 6.6: Pilot C Abstand Aufgabe 2

Pilot D:



Abbildung 6.7: Pilot D Abstand Aufgabe 1



Abbildung 6.8: Pilot D Abstand Aufgabe 2

Pilot E:



Abbildung 6.9: Pilot E Abstand Aufgabe 1



Abbildung 6.10: Pilot E Abstand Aufgabe 2

Pilot F:



Abbildung 6.11: Pilot F Abstand Aufgabe 1



Abbildung 6.12: Pilot F Abstand Aufgabe 2

Pilot G:



Abbildung 6.13: Pilot F Abstand Aufgabe 1

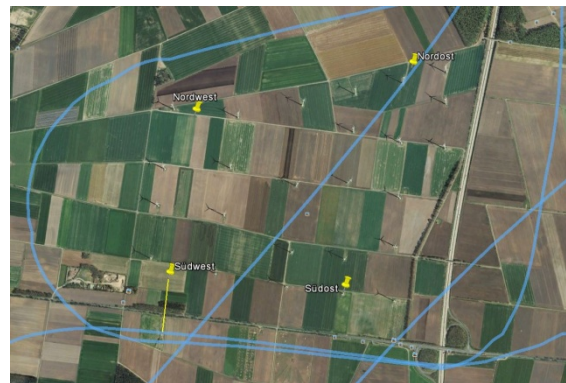


Abbildung 6.14: Pilot F Abstand Aufgabe 2

6.5.1.2 Pilotenbelastung

In den nächsten Diagrammen ist die mittels des NASA-TLX ermittelte Pilotenbelastung der jeweiligen Testkandidaten dargestellt:

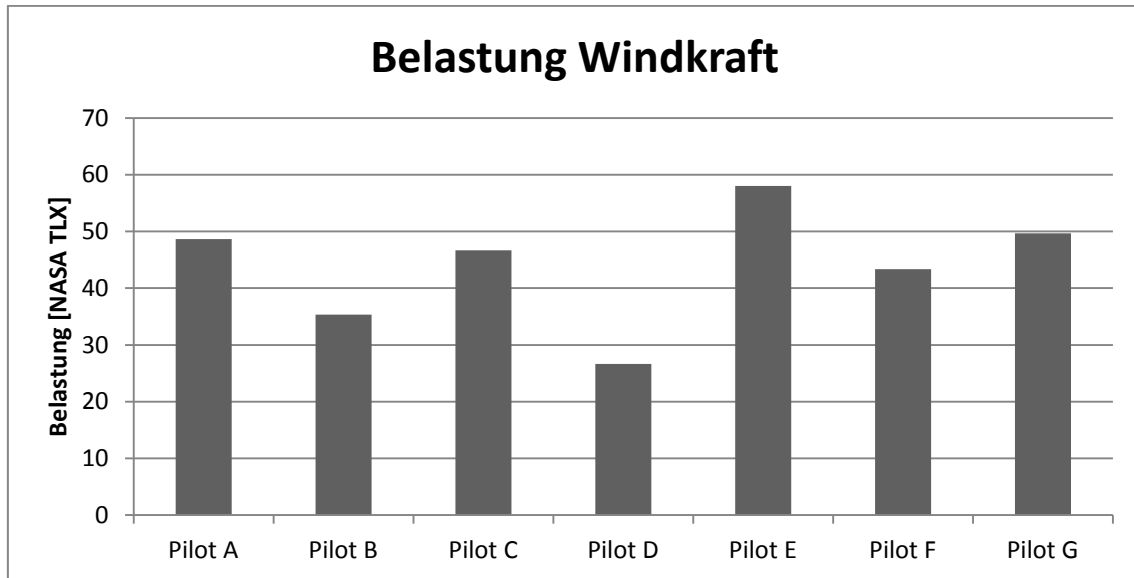


Diagramm 6.5: Pilotenbelastung Windenergieanlagen

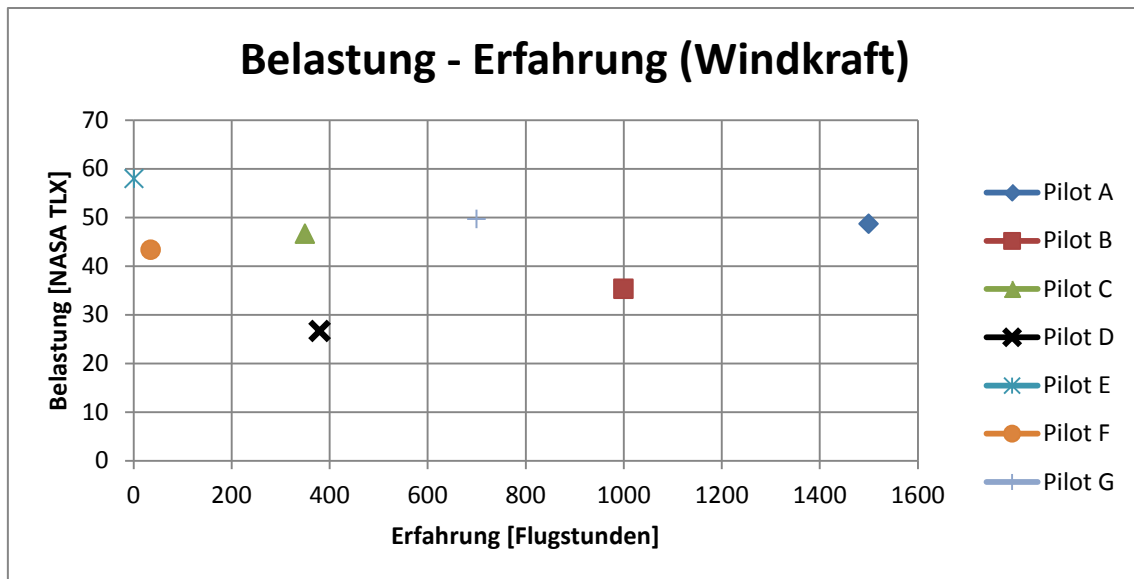


Diagramm 6.6: Belastung - Erfahrung Windenergieanlagen

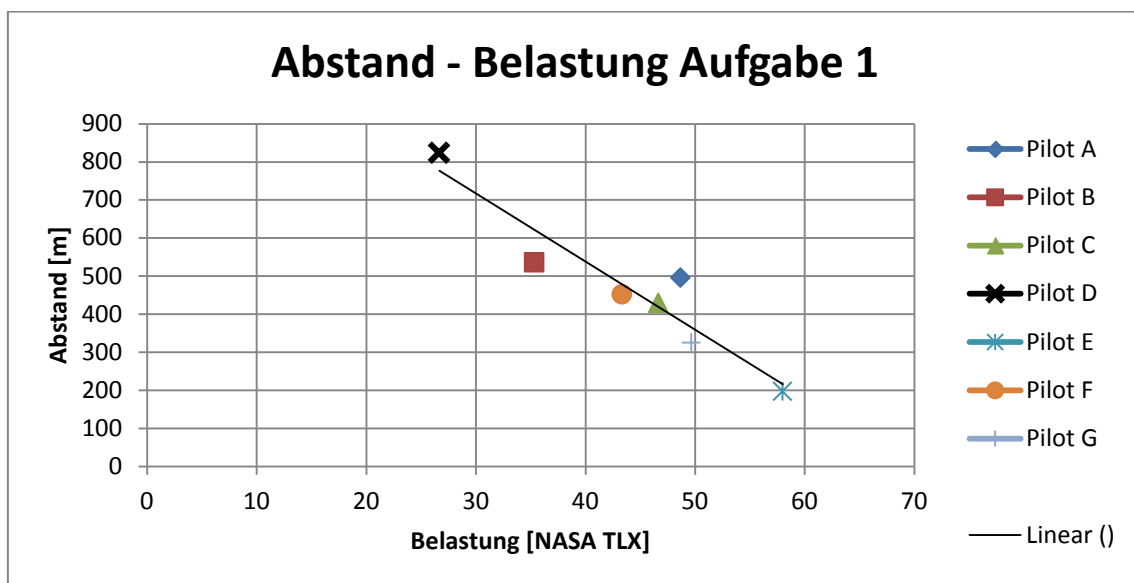


Diagramm 6.7: Abstand - Belastung Aufgabe 1

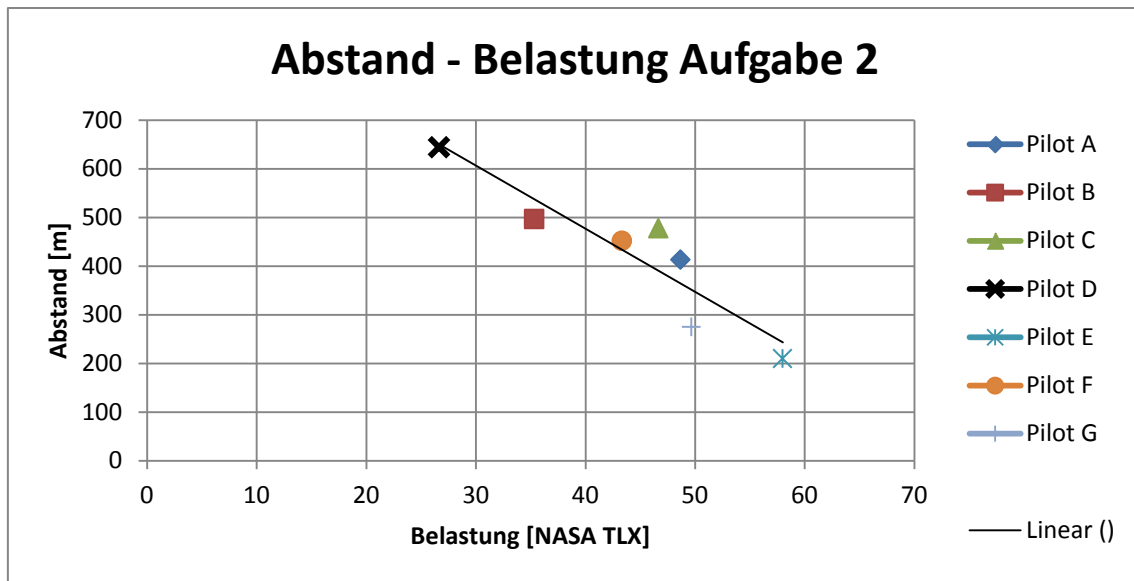


Diagramm 6.8: Abstand - Belastung Aufgabe 2

6.5.2 Versuch 3

Auch für den Versuch 3 sind die bekannten Diagramme zur Auswertung erstellt worden:

6.5.2.1 Abschätzung der Horizontalabstände

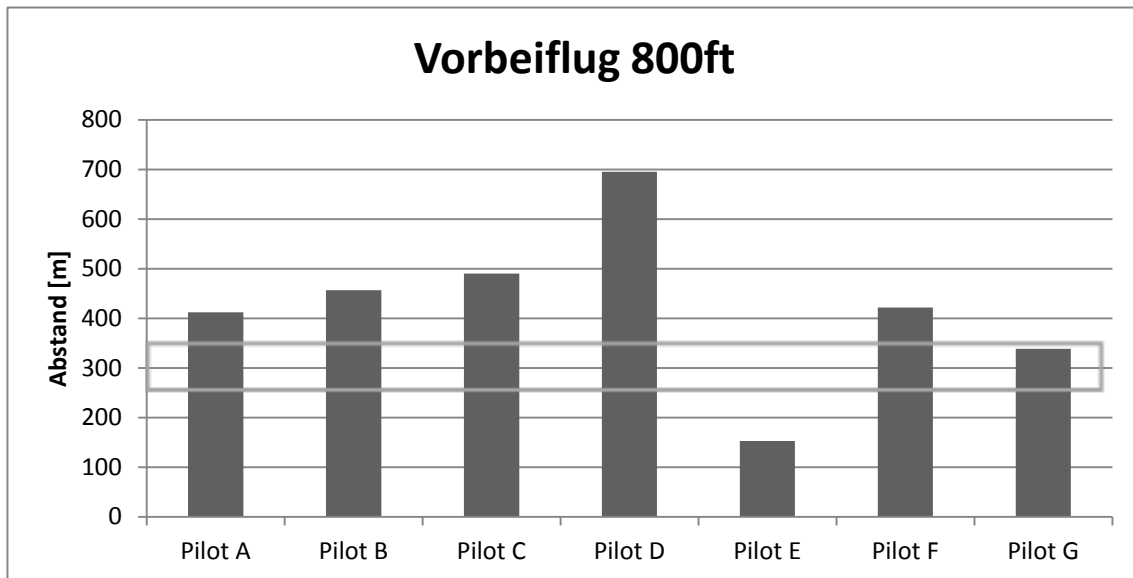


Diagramm 6.9: Abstände Aufgabe 3

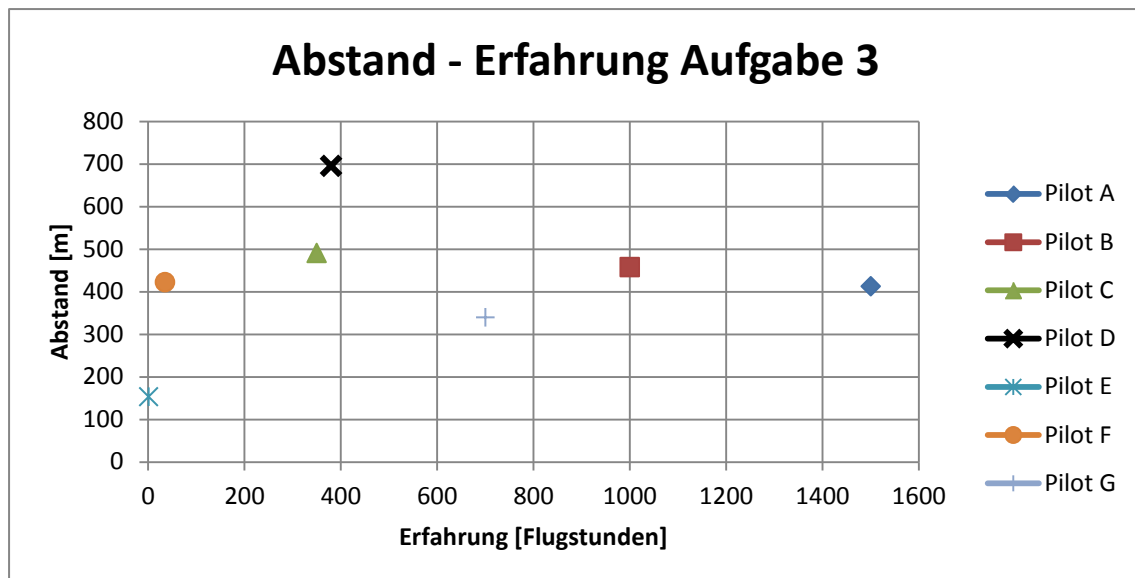


Diagramm 6.10: Abstand - Erfahrung Aufgabe 3

Im Folgenden sollen die Abstände der Piloten zu dem Funkturm dargestellt werden.

Pilot A:

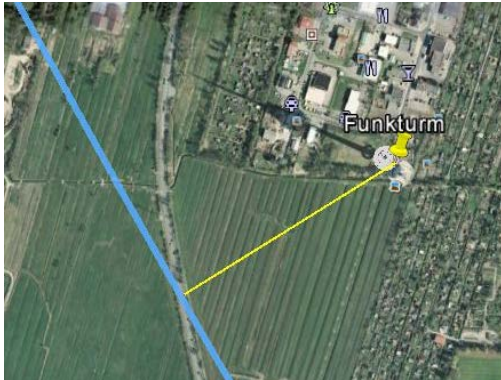


Abbildung 6.15: Pilot A Abstand
Aufgabe 3

Pilot B:



Abbildung 6.16: Pilot B Abstand
Aufgabe 3

Pilot C:



Abbildung 6.17: Pilot C Abstand
Aufgabe 3

Pilot D:



Abbildung 6.18: Pilot D Abstand
Aufgabe 3

Pilot E:



Abbildung 6.19: Pilot E Abstand
Aufgabe 3

Pilot F:



Abbildung 6.20: Pilot F Abstand
Aufgabe 3

Pilot G:

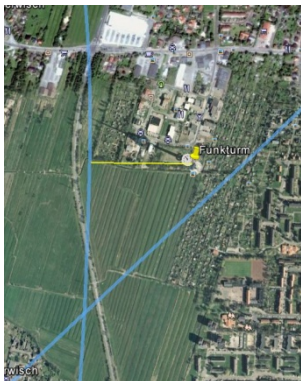


Abbildung 6.21: Pilot G Abstand
Aufgabe 3

6.5.2.2 Pilotenbelastung

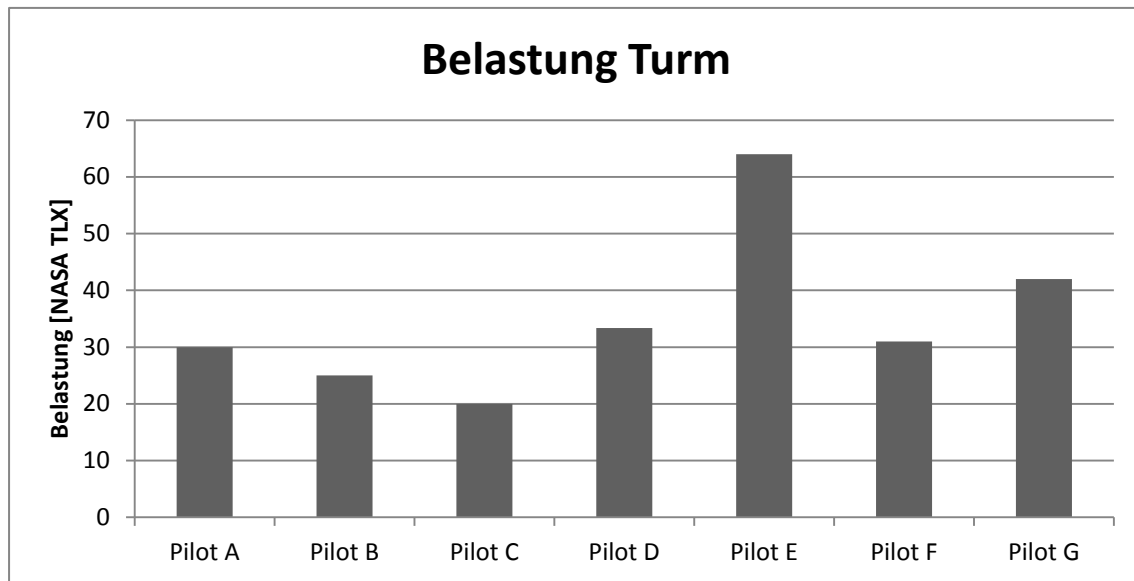


Diagramm 6.11: Pilotenbelastung Turm

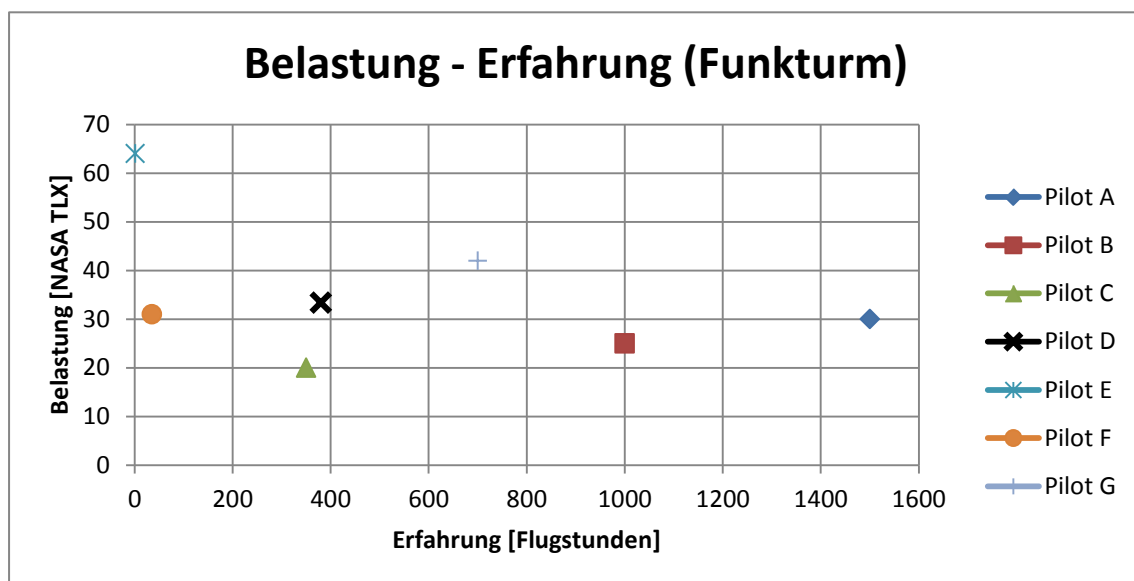


Diagramm 6.12: Belastung - Erfahrung Funktturm

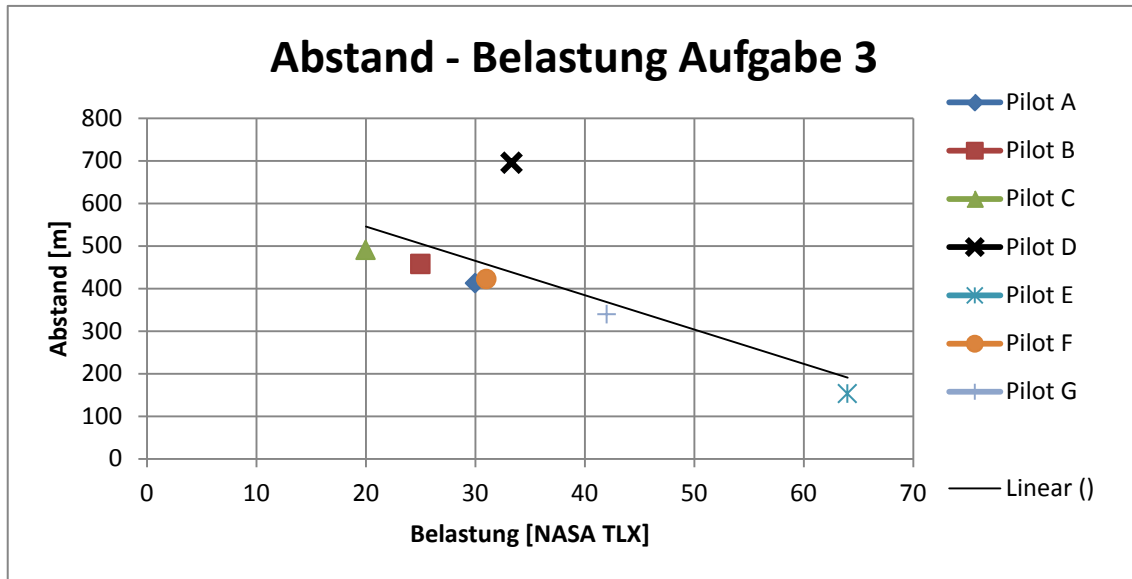


Diagramm 6.13: Abstand - Belastung Aufgabe 3

6.5.3 Gegenüberstellung Windenergieanlagen - Funkturm

6.5.3.1 Einschätzung der Horizontalabstände

Pilot	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3
Pilot A	496 m	413 m	412 m
Pilot B	536 m	497 m	457 m
Pilot C	429 m	478 m	490 m
Pilot D	824 m	644 m	695 m
Pilot E	197 m	210 m	153 m
Pilot F	452 m	452 m	422 m
Pilot G	325 m	275 m	339 m

Tabelle 6.4: Abstände gegenübergestellt

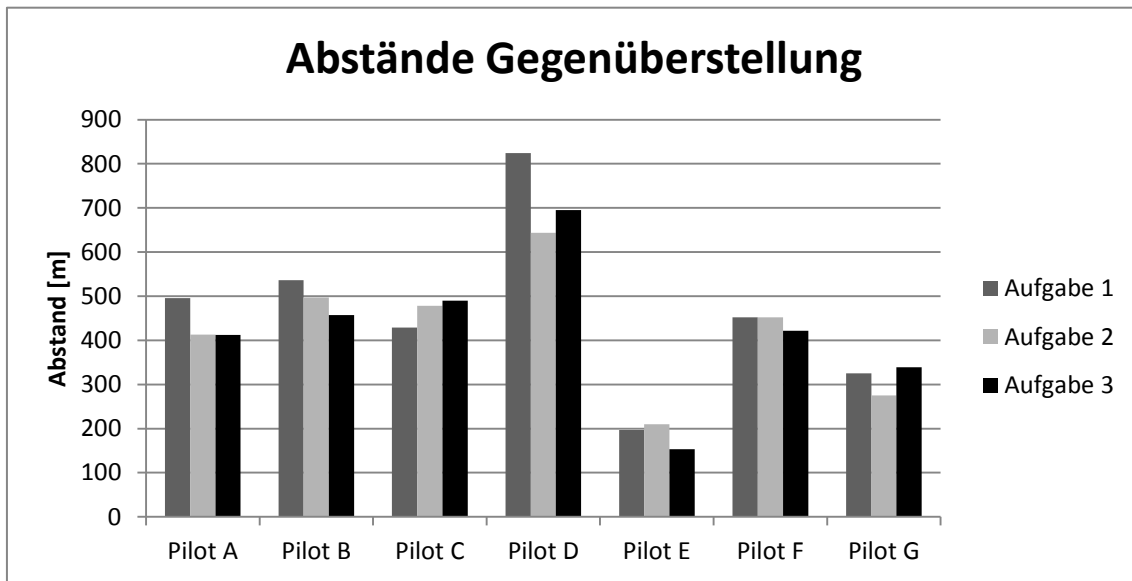


Diagramm 6.14: Gegenüberstellung der Abstände

Pilot C flog näher an die Windenergieanlage als an den Turm. Hierbei ist der Unterschied zwischen den Abständen aber sehr gering. Allerdings hat er die Abstände relativ gut eingehalten.

Pilot D flog in enormen Abständen zu beiden Hindernissen unter der kommunizierten Annahme, dass er viel zu nah sei. Dabei fällt auf, dass der Abstand bei der Bewältigung der Aufgabe 1 größer war als bei der Bewältigung der Aufgabe 2.

Pilot E flog viel zu nah an die Hindernisse heran, wobei der Abstand zum Turm noch etwas geringer war als der zu der Windenergieanlage.

Pilot F flog an beiden Hindernissen mit etwa den gleichen Abständen vorbei, wobei er dem Funkturm etwas näher kam als der Windenergieanlage.

Pilot G war bei der Einschätzung der Ergebnisse am erfolgreichsten, denn er hielt die vorgegebenen Abstände quasi genau ein.

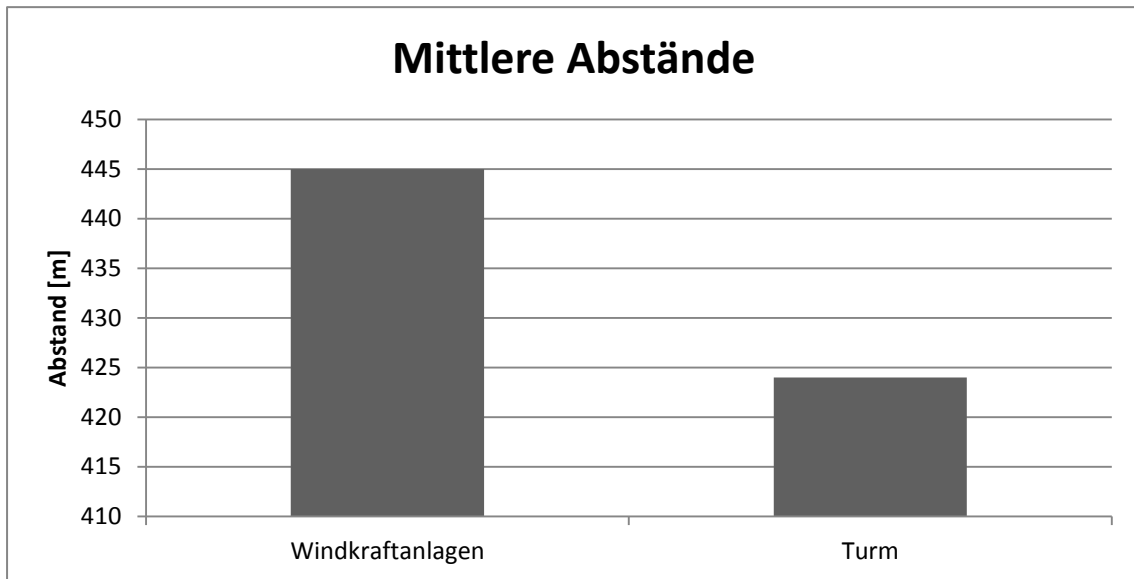


Diagramm 6.15: Mittlere Abstände

6.5.3.2 Pilotenbelastung

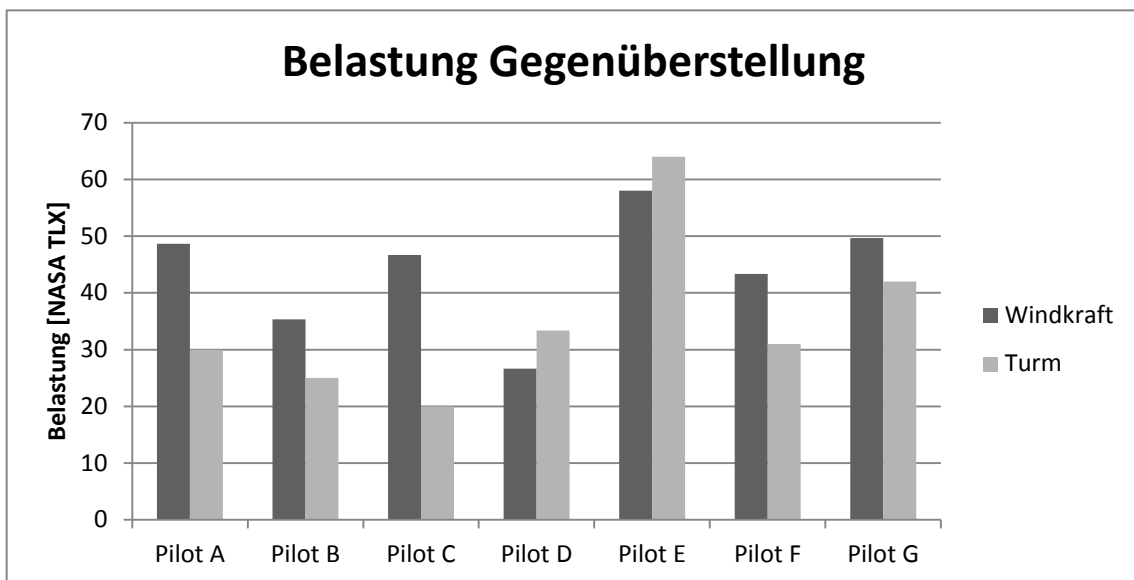


Diagramm 6.16: Gegenüberstellung der Belastung

Bei Pilot C fällt auf, dass der Belastungswert an der Windenergieanlage mehr als doppelt so hoch ist wie beim Turm.

Bei Pilot D war die Belastung am Turm etwas höher als an der Windenergieanlage. Eine mögliche Begründung hierfür ist, dass die Aufgabe am Funkturm beim ersten Anlauf aufgrund eines Regenschauers abrupt abgebrochen werden musste. Als Folge musste ein Ausweichmanöver geflogen werden, was für den Piloten eine schwierige Situation dargestellt

haben könnte. Bei erneuter Durchführung der Aufgabe war der Pilot möglicherweise noch durch das Ausweichmanöver zusätzlich angespannt bzw. belastet.

Bei Pilot E war ebenfalls die Belastung am Turm höher als an der Windenergieanlage. Hier liegt allerdings nur ein geringer Unterschied bei der Belastung an den beiden Hindernissen vor. Ein möglicher Grund der höheren Belastung am Funkturm könnte darin liegen, dass der Pilot bei der Bewältigung der Turm-Aufgabe mit starkem Seitenwind zu kämpfen hatte. Dies erforderte eine höhere Seitenruderaktivität als bei der Windenergieanlage. Daraus resultiert ein Anstieg der Belastung während der Ausführung der Aufgabe.

Pilot F war am Turm wesentlich weniger belastet ($\approx 25\%$) als an der Windenergieanlage.

Pilot G war auch am Turm messbar weniger belastet als an der Windenergieanlage.

6.5.4 Eye Tracker

Für Pilot G wurde untersucht, wie lange dieser anteilig auf die Instrumente geblickt hat und wie lange er nach außen in Richtung des Hindernisses schaut.

Dazu wurden die Aufnahmen des Eye Tracker in Abschnitte von je 30 Sekunden unterteilt. In diesen Abschnitten wurde jeweils ausgewertet, wie lange anteilig das Hindernis betrachtet wurde und wie lange die Instrumente im Cockpit betrachtet wurden.

Hat der Pilot dann zum Beispiel 20 der 30 Sekunden nach draußen geblickt, entspricht dies einem Wert von ungefähr 66% Außenblickdauer.

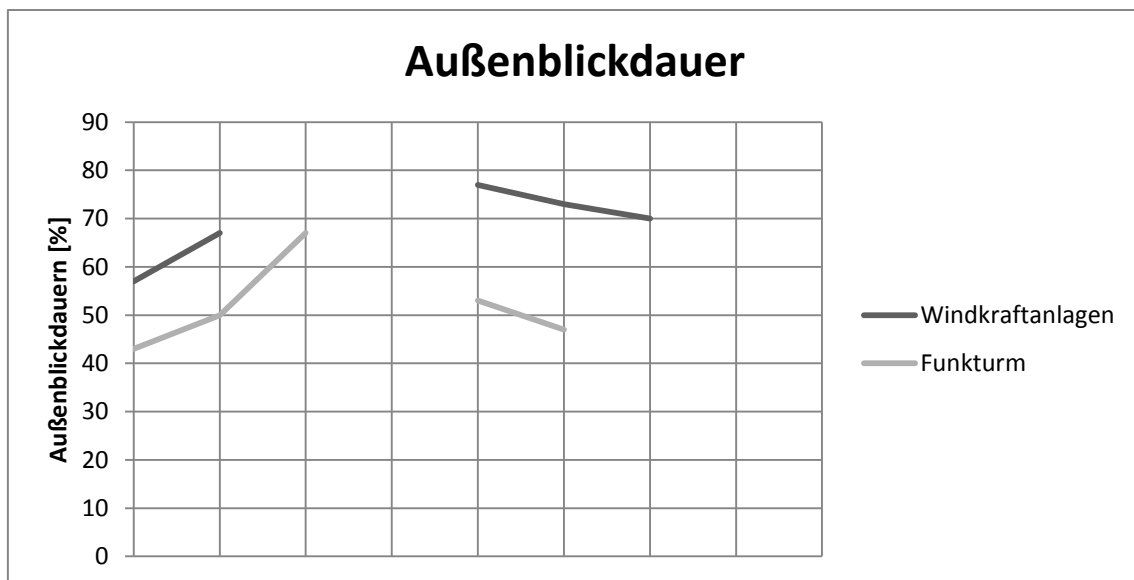


Diagramm 6.17: Außenblickdauer

6.6 Schlussfolgerung

6.6.1 Abstandsabschätzung

Bei der Abschätzung der Abstände zu den Hindernissen ist deutlich geworden, dass die Abschätzung der Abstände zu der Windenergieanlage deutlich schwieriger war als die Abschätzung der Distanz zum Funkturm. Das erkennt man daran, dass der geschätzte gemittelte Abstand zum Turm geringer ist als der geschätzte gemittelte Abstand zu dem dynamischen Hindernis Windenergieanlage. Hinzu kommt, dass eine relativ genaue Abstandsabschätzung unabhängig von der Flugerfahrung der einzelnen Piloten nicht möglich ist. Tendenziell stellen Windenergieanlagen für Flugschüler ein noch höheres Sicherheitsrisiko dar. Dies hat das Verhalten von Pilot E gezeigt. Denn dieser flog viel zu nah an die Windenergieanlage heran.

Des Weiteren muss hier beachtet werden, dass bei der Aufgabenbewältigung das Halten der Höhe viel einfacher ist als das Halten des vorgegebenen Abstandes. Denn für die Höhe kann man den Höhenmesser im Cockpit nutzen, während es für den Abstand keine Messmethode gibt.

6.6.2 Pilotenbelastung

Die experimentellen Untersuchungen haben ergeben, dass die Pilotenbelastung bei der Durchführung der Aufgaben im Bereich der Windenergieanlage wesentlich höher war als im Bereich des Funkturms. Das bedeutet, dass die Piloten wesentlich mehr an Belastungspotenzial zur Durchführung der Aufgaben aufwenden mussten, als beim Funkturm und somit weniger Potenzial zur Verfügung stand, um weitere Aufgaben durchzuführen.

Im Diagramm 6.16 ist zu erkennen, dass bei Pilot C dieser Effekt besonders stark auftritt. Bei den Piloten A, B, F und G ist dieser Sachverhalt in etwa dem gleichen Maß von etwa 25 % vorzufinden. Die Piloten D und E springen aus der Reihe. Jedoch ist hier anzumerken, dass diese beiden bei Durchführung der Testaufgaben am Funkturm mit besonderen Situationen

konfrontiert waren. So rief einerseits starker Seitenwind und andererseits ein notwendiges Ausweichmanöver eine erhöhte Belastung hervor.

Außerdem wird hier ersichtlich, dass bei der Durchführung der Aufgaben am Funkturm die Belastung der meisten Probanden in einem Wertigkeitspektrum von 15 Belastungspunkten (20 bis 35) liegt und sich die Aufgaben in etwa gleich auf die Piloten auswirken. Bei der Aufgabendurchführung an den Windenergieanlagen verteilen sich die Belastungswerte der Piloten auf ein Spektrum der Breite von etwa 25 Belastungspunkten (25 bis 50). Die Windenergieanlagen riefen nicht nur eine höhere Pilotenbelastung bei den Probanden hervor, sondern wirkten zusätzlich noch unterschiedlich stark auf die Probanden ein, sodass sich kein einheitliches Verhalten abzeichnet.

6.6.3 Belastung – Erfahrung

Ein sehr interessanter Sachverhalt ergab sich bei der Gegenüberstellung von Pilotenbelastung und Erfahrung. Hinsichtlich des Fliegens in der Nähe von Hindernissen hat die Flugerfahrung keine Auswirkungen auf die Pilotenbelastung. Auch Piloten mit sehr viel Flugerfahrung waren bei der Bewältigung der Aufgaben sehr stark belastet.

6.6.4 Abstandsabschätzung – Erfahrung

Die Untersuchung des Zusammenhangs von Flugerfahrung und Abstandsabschätzung hat bei allen Aufgabenstellungen ergeben, dass kein nachweisbarer Einfluss der Flugerfahrung auf die Abstandsabschätzung eines Piloten vorliegt. Eine größere Anzahl an Flugstunden, die ein Pilot nachweisen kann, verbessern also nicht sein Vermögen Abstände korrekt zuschätzen.

6.6.5 Abstand – Belastung

Bei der Analyse des Zusammenhangs von Abstandsabschätzung und Belastung hat sich herausgestellt, dass mit geringer werdendem Abstand zum Objekt die Belastung des Piloten ansteigt.

Weiterhin fällt auf, dass die gezogene Ausgleichsgerade durch die drei Diagramme bei der Windenergieanlage deutlich steiler verläuft als beim Funkturm. Dies liegt einerseits sicherlich an der schon festgestellten höheren Belastung beim Fliegen in der Nähe der Windenergieanlagen. Andererseits zeigt dies auch, dass Windenergieanlagen eine viel stärkere Erhöhung der Belastung bewirken, wenn man ihnen näher kommt, als das bei einem statischen Hindernis der Fall ist.

Beispielsweise ruft ein Abstand von ca. 400 Metern zum Funkturm eine Pilotenbelastung der Wertigkeit 40 hervor (vgl. Diagramm 6.13). Diese Wertigkeit wird bei den Windenergieanlagen schon bei einem Abstand von ca. 520 Metern erreicht.

6.6.6 Eye Tracker

Insgesamt schaut der Pilot bei der Bewältigung der Aufgaben an den Windenergieanlagen häufiger nach draußen als bei den Aufgaben am Turm. Dies ist daran zu erkennen, dass die Kurve der Außenblickdauer nahe der Windenergieanlage höher liegt als die der Ausblickdauer nahe des Turms.

Bei der Durchführung der Überflug-Aufgabe guckt der Pilot zu 20% öfter auf das Hindernis als bei der gleichen Aufgabe am Funkturm. Dies bestätigt unser Ergebnis der erhöhten Pilotenbelastung hinsichtlich der Windenergieanlagen. Dies stellt eine Gefahr dar, da sich der Pilot nicht mehr so sehr auf das Fliegen, sondern mehr auf das Hindernis konzentriert. Dies wird bei Flügen nach Sichtflug unter Umständen zu gefährlichen Situationen führen.

6.6.7 Unterscheidung statischer und dynamischer Hindernisse

Ein nicht zu vernachlässigender Sachverhalt stellt jener dar, dass Windenergieanlagen vorwiegend als Ballung von Systemen vorkommen. Aufgrund dessen stellen sie, im Gegensatz zu einem Gebäude wie beispielsweise einem Funkturm, kein Einzelhindernis dar.

Das bedeutet, dass Windenergieanlagen eine erhöhte Gefahr für Piloten darstellen, weil ihr Bau vorwiegend als Gruppensystem in Form eines Windenergieanlagenparks verwirklicht wird.

Flugmanöver, wie beispielsweise Ausweichmanöver, sind in der Nähe eines Windenergieanlagenparks wesentlich schwerer auszuführen als an einem Einzelhindernis. Dies liegt an dem höheren Luftraumvolumen, das die Windenergieanlagen im Park zusammen einnehmen.

Aufgrund dieses Sachverhaltes und der Gefahren, die ein Überflug mit sich bringt, sollte das Überfliegen von Windenergieanlagen bei Start und Landung von Luftfahrzeugen streng untersagt und vermieden werden. Zudem muss ein Mindestsicherheitsabstand zu einer Ballung von Hindernissen, wie Windenergieanlagenparks sie darstellen, neu definiert und umgesetzt werden.

Hindernisse, die in Gruppen auftreten, dürfen keineswegs wie Einzelhindernisse betrachtet und behandelt werden.

Unsere experimentelle Untersuchung ergibt, dass dynamische Hindernisse wie Windenergieanlagen nicht wie statische Hindernisse, beispielsweise also ein Funkturm, betrachtet und behandelt werden dürfen.

Dynamische Hindernisse erhöhen bei Über- und Vorbeiflug das Belastungsniveau wesentlich mehr als statische Hindernisse. Sie erfordern damit eine viel größere Aufmerksamkeit, die für andere Aufgaben, wie beispielsweise die Beobachtung des Luftraums, dann nicht mehr in gleichem Maße zur Verfügung steht wie beim Über- und Vorbeiflug statischer Hindernisse. Unsere Ergebnisse stellen diesen Sachverhalt heraus.

Dynamische Hindernisse beeinflussen Piloten anders als statische Hindernisse und das sowohl hinsichtlich der Flugleistung und Pilotenbelastung als auch hinsichtlich ihres Vorkommens und der vollkommen anderen visuellen Wahrnehmung dieser Hindernisse.

Abschließend ist deshalb nochmals ausdrücklich festzuhalten:

Dynamische Hindernisse wie Windenergieanlagen dürfen aufgrund der in dieser Arbeit aufgeführten Ergebnisse und Erkenntnisse keine Gleichstellung mit statischen Hindernissen wie Funktürmen hinsichtlich Betrachtung und luftfahrttechnischem Umgang erfahren.

7. Herleitung der Abstandsregelung

Aufbauend auf den vorangehenden Untersuchungen werden nachfolgend Vorschläge für Sicherheitsabstände gemacht, die unter Berücksichtigung des Stands der Technik einen sicheren, lärmarmen und effizienten Flugbetrieb für den Bau von Windenergieanlagen in der Regel nicht verwendet werden sollten. Zugrunde liegen hierfür die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln, insbesondere den Kapiteln 5 und 6. Die Grundlagen hierfür sind in Kapitel 2 und 4 vorgestellt worden.

7.1 Windenergieanlage als Luftfahrthindernis

Eine Windenergieanlage fällt wegen ihrer besonderen äußeren Eigenschaften nicht unter die Einordnung eines gewöhnlichen Luftfahrthindernisses und muss entsprechend anders behandelt werden. Wegen des sich drehenden Rotors und den insbesondere nach EU VO 139/2014 zu berücksichtigen turbulenten Nachlaufs ist es ein dynamisches Hindernis im Gegensatz zu den klassischen starren Hindernissen.

Zuallererst ist es Piloten nur schwer möglich, den genauen Abstand zu einer Windenergieanlage exakt einzuschätzen, da im Gegensatz zu der starren Struktur eines Turms oder Kamins die Rotoren nicht starr sind und sich die Blattspitzen mit hoher Geschwindigkeit bewegen. Die im Kapitel 6 beschriebenen Untersuchungen haben dies gezeigt. Deutlich höhere Mindestabstände sind daher unabdingbar. Außerdem ist die räumliche Ausdehnung in größeren Höhen signifikant größer.

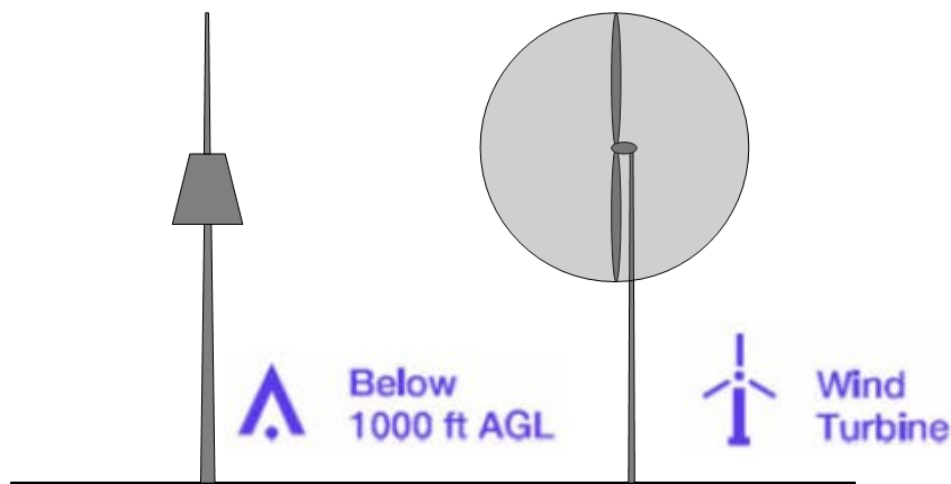


Abbildung 7.1: Vergleich Silhouetten Turm und Windenergieanlage

Zweitens stellt die Windenergieanlage wegen ihres Zweckes, dem Wind Energie zu entziehen, ein besonders zu behandelndes Luftfahrthindernis dar. Eine Beschränkung auf die Kollisionsgefahr ist unzureichend, da auch der Nachlauf eine konkrete Gefahr für Luftfahrzeuge darstellt.

Aus den Untersuchungen, beschrieben in Kapitel 5.3, hat sich ergeben, dass der Nachlauf bis zu einem Abstand vom siebenfachen Rotordurchmesser ($7D$) von Flächenflugzeugen gemieden werden muss. Flugbetrieb mit Gleitschirmen und Ballonen ist bei Windstärken $>7 \text{ m/s}$ (25 km/h) in Bodennähe unüblich, da in diesen Bedingungen schon Schwierigkeiten beim Starten und Landen bestehen würden, sodass ebenfalls der siebenfache Rotordurchmesser hier ausreichend schützt, obwohl prinzipiell eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Turbulenz und Windscherung besteht. Hängegleiter sind anfälliger gegenüber Böen als Flächenflugzeuge, können aber auch bei höheren Windgeschwindigkeiten fliegen. Sie sind daher besonders schutzbedürftig, so dass auch auf Grund des Abklings der Nachlaufturbulenz Mindestabstände von zwölf Rotordurchmessern angebracht sind.

Unter Berücksichtigung des Betzschen Kriteriums (Abströmgeschwindigkeit ist 67 % der Anströmgeschwindigkeit) kommt es zu einer Erweiterung des Nachlaufdurchmessers um 30 % gegenüber dem Rotordurchmesser. Hieraus ergibt sich für die größte Höhe des Nachlaufes eine Gesamthöhe aus der

Anlagenhöhe zuzüglich 15 % des Rotordurchmessers. Diese Daten gelten für ideales, flaches Gelände. Ansteigendes Gelände hat auch ein Ansteigen des Nachlaufs in gleichem Maße wie das Gelände zur Folge. Bei abfallendem Gelände sind derartige Aussagen nicht möglich, da die Luftströmung nicht zwangsweise der abfallenden Oberfläche folgen muss. Auch ist eine Talinversion möglich, sodass der Wind und somit der Nachlauf nicht ins Tal abfällt, bei einer anderen Luftschichtung jedoch durchaus ins Tal reicht.

Da der Wind aus jeder Richtung kommen kann, ergibt sich so für das dynamische Luftfahrthindernis Windenergieanlage ein virtueller Zylinder, wie folgt dargestellt, der nicht von Luftfahrzeugen genutzt werden kann und somit nicht in die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Flächen hineinreichen darf. Dieser Zylinder hat einen Durchmesser von 14 Rotordurchmessern und eine Höhe von der Gesamthöhe der Windenergieanlage zuzüglich 15 % des Rotordurchmessers für Motorflugzeuge.

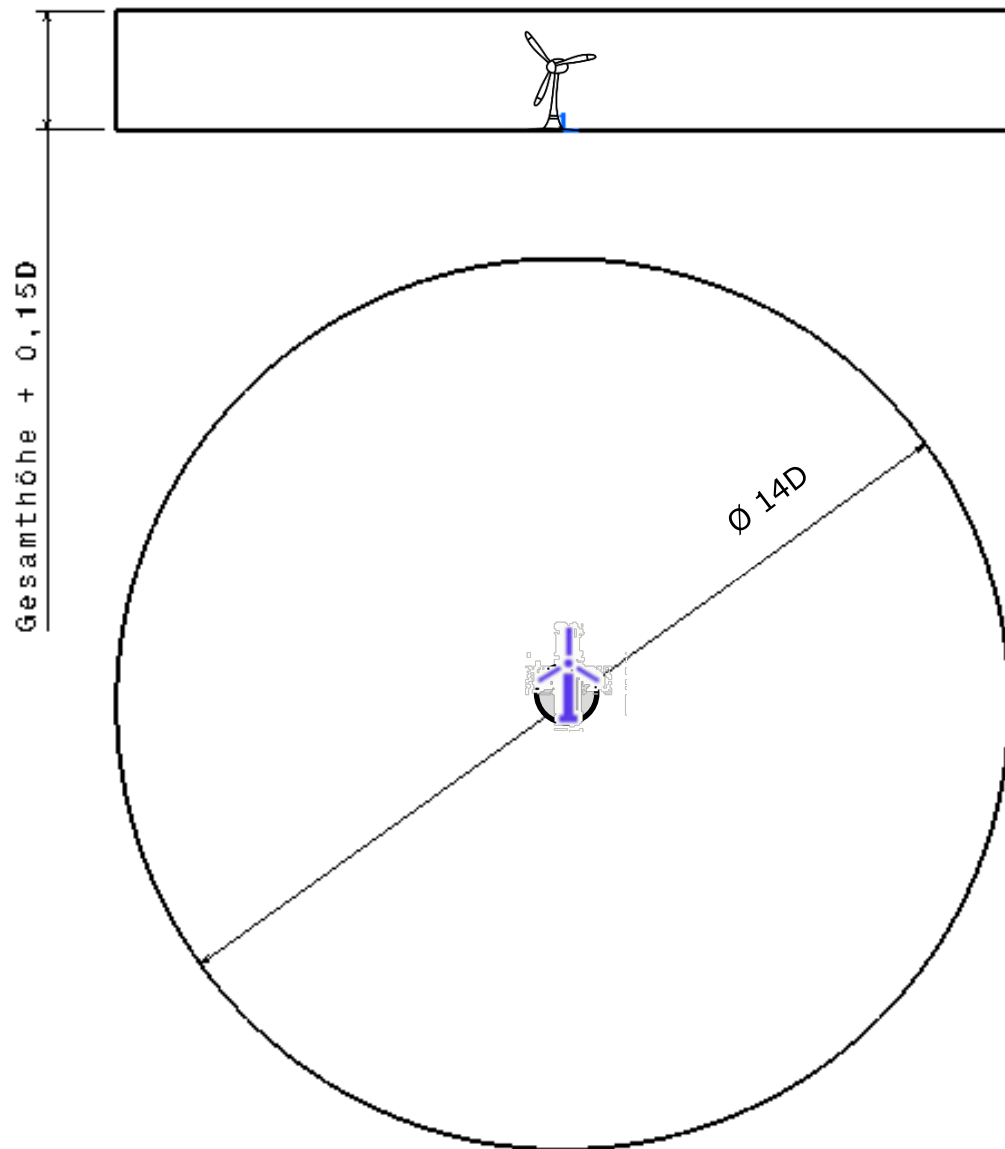


Abbildung 7.2: Schutzraum um ein dynamisches Hindernis

7.2 Hindernisfreiflächen Motorflugbetrieb

Nachfolgend werden die Flächen dargestellt, die nach Kapitel 7.1 frei vom Einfluss von Windenergieanlagen bleiben müssen.

7.2.1 Platzrunde

Im Gutachten „Platzrundenkorridor am Flugplatz Bonn-Handlar“ [56] im Auftrag des Landesverkehrsministeriums NRW ist nachgewiesen worden, dass eine laterale Abweichung von unter 250 m beim Folgen einer Platzrunde selbst vom idealen, fehlerfreien Piloten anhand äußerer Merkmale nicht erkannt werden kann. Hieraus ergibt sich, dass die Platzrunde, auf der Karte als Linie gekennzeichnet, als ein Bereich mit einer Halbbreite von 250 m (500 m Gesamtbreite) für den Querabflug, Gegenanflug und Queranflug betrachtet werden muss. Diese Toleranz nimmt auch die Deutsche Flugsicherung als Sachverständigen-Organisation an.

Im Endanflug und im Abflug ist ein von den Sicherheitsflächen ausgehender, mit 10 % divergierender Bereich als mögliche Flugstrecke anzusehen, da eine sehr präzise visuelle Referenz zur Landebahn (im Endanflug) existiert und im Abflug der größte Fehler aus der Windabdrift resultiert.

7.2.2 Vollkreise im Gegenanflug

In der Platzrunde fliegen Flugzeuge mit zum Teil erheblich unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten. Daher muss die Möglichkeit bestehen, zu vorausfliegenden langsameren Flugzeugen Abstand zu gewinnen. Das Standardverfahren hierfür sieht vor, im Gegenanflug nach außen Vollkreise zu fliegen. Bei 100 kt Fluggeschwindigkeit und einer Standard Zwei-Minuten-Kurve ergibt sich ein Radius von 1000 m und somit ein Durchmesser von 2000 m.

7.2.3 Einflugkorridor Gegenanflug

Das Standardverfahren für den Einflug in die Platzrunde sieht vor, dass in der Mitte des Gegenanfluges diese angeflogen wird (weiteres siehe Kapitel 4.1.1). Hierfür ist ein Korridor von mindestens der Breite der Platzrunde

vorzusehen. Sofern dieser Korridor auch als Ausflugkorridor aus der Platzrunde vorgesehen ist, muss er die doppelte Breite haben.

Die Länge des Korridors ergibt sich daraus, dass der schwächste Verkehrsteilnehmer sicher durch diesen Korridor über ein Hindernis am Ende des Korridors steigen können muss. Der zugrunde gelegte Steiggradient beträgt 3%.

7.2.4 Flug bei minimalen Wetterbedingungen

Die Nutzung eines Flugplatzes im Luftraum G ist möglich bei einer Wolkenuntergrenze von 500 ft über Grund bei 1500 m Sichtweite. Es muss daher möglich bleiben den Flugplatz auch dann zu nutzen. Hieraus resultiert auch die Schlussfolgerung, dass der Platzrundenbereich frei von Windenergieanlagen bleiben muss, da diese unweigerlich bei minimalen Wetterbedingungen aufgrund ihres Nachlaufes und der schlecht einzuschätzenden Silhouette zu einer konkreten Gefährdung führen würden.

7.2.5 Sicherheit und Training

Der Bereich innerhalb der Platzrunde soll frei von Windenergieanlagen bleiben (analog NFL I 92/13). Die Platzrunde ist ein äußerst stark frequentierter Luftraum. Insbesondere aufgrund von technischen Problemen, die direkt nach dem Start auftreten, muss es möglich sein, auch auf einer verkürzten Platzrunde zum Flugplatz zurückzukehren.

Darüber hinaus wird dieser Bereich im Rahmen der Pilotenausbildung beispielsweise für simulierte Triebwerksausfälle genutzt.

7.2.6 Sicherheitsbereich um die Platzrunde

Um den 250 m Toleranzbereich der Platzrunde herum ist ein weiterer Sicherheitsbereich von 300 m vorzusehen, da ungewollte Abweichungen von der Platzrunde möglich sind, aber auch ein gezieltes Abweichen aus verschiedensten Gründen notwendig sein kann, ohne dass es zu einer Gefährdung kommen darf.

7.2.7 Zusammenfassung

In nachfolgender Abbildung ist der Text der Kapitel 7.2.1 bis 7.2.6 grafisch aufbereitet.

minimaler Abstand Windkraftanlagen mit Rotordurchmesser:

60 m, 100 m, 120 m, 150 m

Toleranzbereich idealer Pilot

Sicherheitsbereich

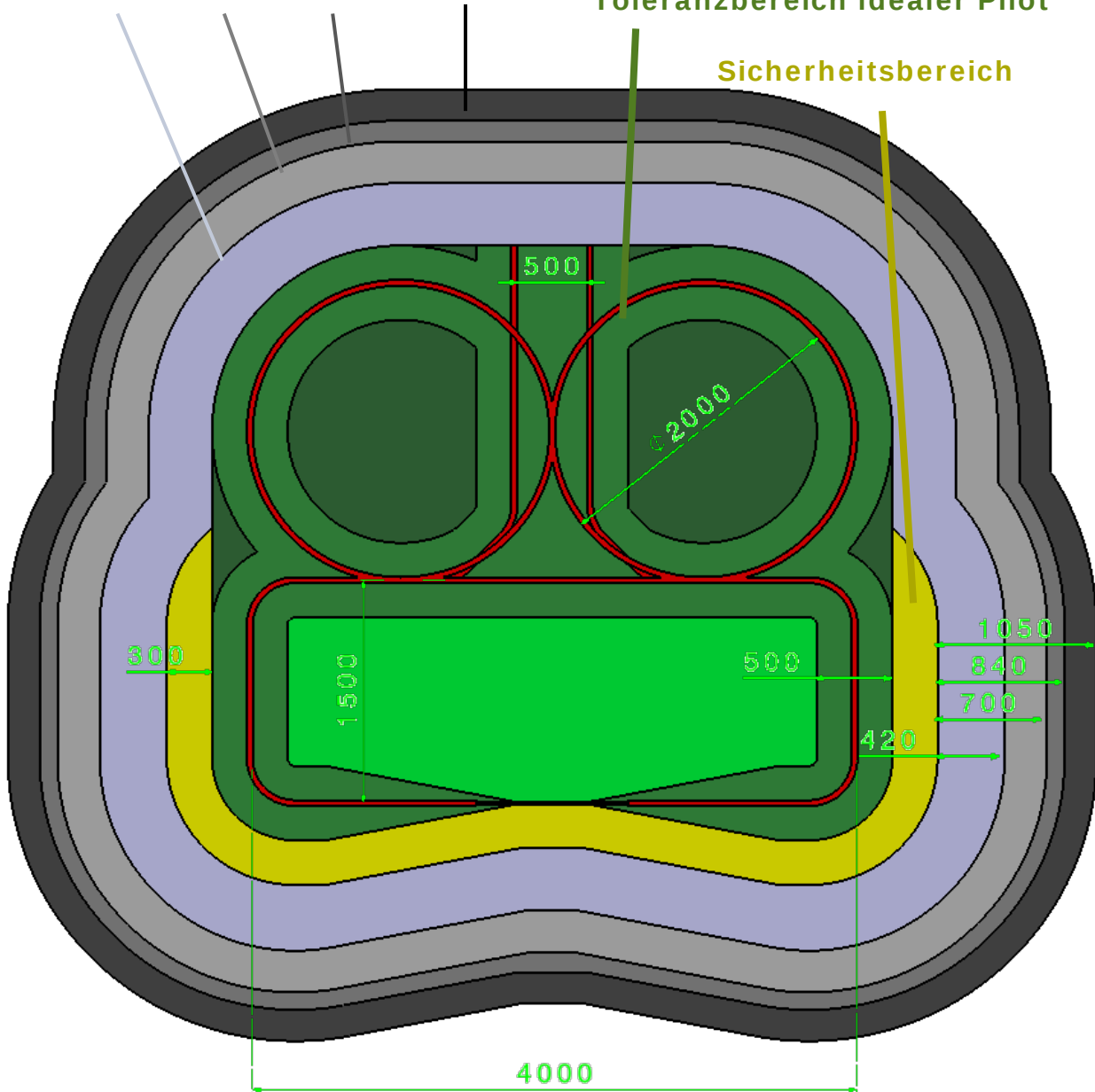


Abbildung 7.3: Flugplatz Mindestabstände zu Windenergieanlagen mit Sicherheitsbereich

7.3 Hindernisfreiflächen Ultraleichtflug

Analog zum Kapitel 7.2 werden nachfolgend die Flächen hergeleitet die frei vom Einfluss von Windenergieanlagen wie nach Kapitel 7.1 für eine Platzrunde von Ultraleichtflugzeugen bleiben müssen. Zusätzliche Erklärungen sind im vorangegangenen Kapitel zu finden.

7.3.1 Platzrunde

Moderne Ultraleichtflugzeuge nähern sich von der Geometrie und Flugleistung her den Motorflugzeugen an, so dass dieselben Toleranzen wie unter 7.2 gelten. So ergibt sich für die Platzrunde ein 500 m breiter Streifen.

Im Endanflug und Abflug ist ein von den Sicherheitsflächen ausgehender mit 10% divergierender Bereich als mögliche Flugstrecke anzusehen, da eine sehr präzise visuelle Referenz zur Landebahn (im Endanflug) existiert und im Abflug der größte Fehler aus der Windabdrift resultiert.

7.3.2 Vollkreise im Gegenanflug

In der Platzrunde fliegen Flugzeuge mit zum Teil erheblich unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten. Daher muss die Möglichkeit bestehen zu vorausfliegenden langsameren Flugzeugen Abstand zu gewinnen. Das Standardverfahren hierfür sieht vor, im Gegenanflug nach außen Vollkreise zu fliegen. Bei 60 kt Fluggeschwindigkeit und einer Standard-Zwei-Minuten-Kurve ergibt sich ein Radius von 590 m und somit ein Durchmesser von insgesamt 1180 m.

7.3.3 Einflugkorridor Gegenanflug

Das Standardverfahren für den Einflug in die Platzrunde sieht vor, dass in der Mitte des Gegenanfluges in diese eingeflogen wird (Weiteres siehe Kapitel 4.1.1). Hierfür ist ein Korridor von mindestens der Breite der Platzrunde vorzusehen. Sofern dieser Korridor auch als Ausflugkorridor aus der Platzrunde vorgesehen ist, muss er die doppelte Breite haben.

7.3.4 Flug bei minimalen Wetterbedingungen

Die Nutzung eines Flugplatzes im Luftraum G ist bei einer Wolkenuntergrenze von 500 ft übergrund und bei 1500 m Sichtweite zulässig. Deshalb muss der Platzrundenbereich frei von Windenergieanlagen bleiben, da diese unweigerlich bei minimalen Wetterbedingungen auf Grund ihres Nachlaufes und der schlecht einzuschätzenden Silhouette zu einer konkreten Gefährdung führen würden.

7.3.5 Sicherheitsbereich um die Platzrunde

Um den 250 m - Toleranzbereich der Platzrunde herum ist ein weiterer Sicherheitsbereich von 300 m vorzusehen, da ungewollte Abweichungen von der Platzrunde möglich sind, aber auch ein gezieltes Abweichen aus verschiedensten Gründen notwendig sein kann, ohne dass es zu einer Gefährdung kommen darf.

7.3.6 Sicherheit und Training

Der Bereich innerhalb der Platzrunde soll frei von Windenergieanlagen bleiben. Dieser Bereich wird regelmäßig in der Pilotenausbildung im Rahmen von simulierten Triebwerksausfällen genutzt. Darüber hinaus wird er benötigt, um im Falle eines flugbetrieblichen Zwischenfalls auf kürzestem Weg zum Flugplatz zurückzukehren.

7.3.7 Zusammenfassung

Die Kapitel 7.3.1 bis 7.3.6 sind nachfolgend in einer Grafik aufbereitet.

minimaler Abstand Windkraftanlagen mit Rotordurchmesser:

60 m, 100 m, 120 m, 150 m

Toleranzbereich idealer Pilot

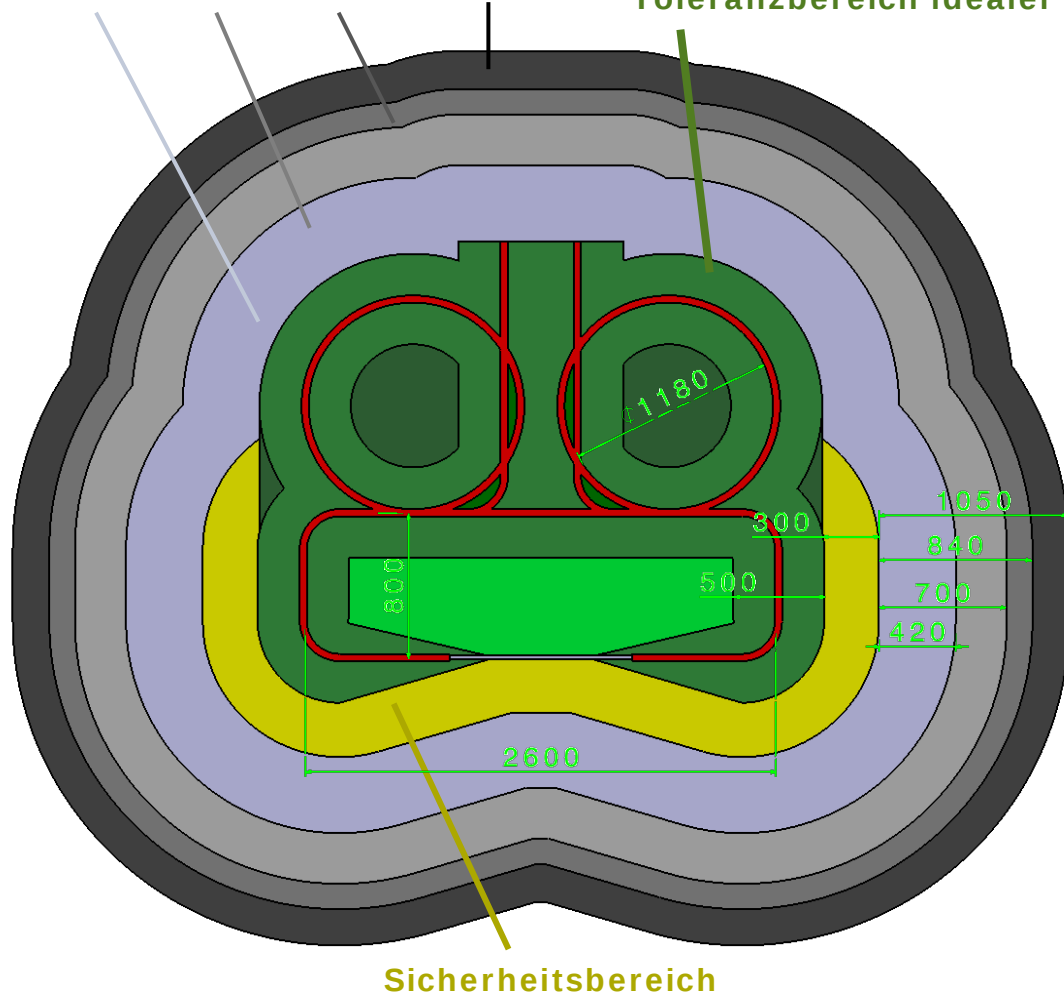


Abbildung 7.4: Sicherheitsbereich UL-Platzrunde

7.4 Hindernisfreiflächen Segelflugbetrieb

Nachfolgend werden die notwendigen Hindernisfreiflächen für den Segelflugbetrieb vorgestellt.

7.4.1 Schleppstrecken

Ein typisches Startverfahren im Segelflug ist der Flugzeugschlepp. Dabei wird das Segelflugzeug von einem Motorflugzeug geschleppt und so auf Höhe gebracht. Abhängig der Flugzeugklasse, die als Schleppflugzeug eingesetzt wird (z.B. Motorflugzeug oder Ultraleichtflugzeug), müssen größere Bereiche von Windenergieanlagen freigehalten werden, als sie für die Platzrunde von Motorflugzeugen beziehungsweise Ultraleichtflugzeugen in den vorangegangenen Kapiteln angegeben worden sind. Auf reinen Segelflugplätzen müssen zumindest die gleichen Bereiche wie im Motorflugbetrieb frei von Hindernissen bleiben.

7.4.2 Platzrunde

Da Segelflugzeuge über keinen eigenen Antrieb verfügen, müssen sie ihren Flugweg an vertikale Windbewegungen anpassen und den Flugweg durch Verlängern oder Verkürzen anpassen können, um in der richtigen Höhe einen bestimmten Ort erreichen zu können. Die Platzrunde und Strecken, die aus dem Windenstart zu bekannten Bereichen mit Thermik zum Einstieg und zurückführen und die wichtigsten Bereiche mit Thermik müssen auf einer Halbbreite von 500 m frei von den äußeren Begrenzungen der Windenergieanlagen-Einflussbereiche bleiben. Ebenfalls ist der Bereich in der Platzrunde von Windenergieanlagen frei zu halten, da nach einem Riss des Windenseils zumeist eine verkürzte Platzrunde geflogen werden muss.

7.4.3 Sicherheitsbereich um die Platzrunde

Um den 150 m – Toleranzbereich der Platzrunde herum, ist ein weiterer Sicherheitsbereich von 300 m vorzusehen, da ungewollte Abweichungen von der Platzrunde möglich sind, aber auch ein gezieltes Abweichen aus verschiedensten Gründen notwendig sein kann, ohne dass es zu einer Gefährdung kommen darf.

7.4.4 Übungsraum

Im Rahmen der Pilotenausbildung müssen Flugschüler auf Alleinflügen, aber in Sichtweite des Platzes nachweisen, dass sie selbstständig bestimmte Manöver, beispielsweise das Einkreisen in Thermik, durchführen können. An jedem Segelflugplatz existiert hierfür ein bekanntes Gebiet mit zuverlässigem Auftreten von Aufwinden. Dieses Gebiet muss frei vom Einfluss von Windenergieanlagen bleiben. So ist eine sichere Rückkehr sichergestellt.

7.4.5 Rückkehr zum Platz

Die Rückkehr zum Platz erfolgt für das Segelflugzeug über die sogenannte Position. Dies ist ein Ort gewöhnlich 200 m über Platzniveau querab zur Landebahn, der entgegen der Richtung des Endanfluges passiert wird und von dem standardisiert der Landeanflug durchgeführt wird. Die Position soll aus jeder Richtung aus anfliegbar sein unter der Annahme eines Sinkgradienten von 2 %. Außerdem soll ein Direktanflug aus der Verlängerung der Lande- und Startbahn möglich sein, sodass in Verlängerung der Bahnenden ein Bereich, um 3 % ansteigend und mit 10° horizontaler Divergenz frei von den äußeren Begrenzungsflächen der Windkraftanlagen bleiben muss.

7.4.6 Zusammenfassung

In der Abbildung 7.5 sind die Kapitel 7.4.2 bis 7.4.5 aufbereitet.

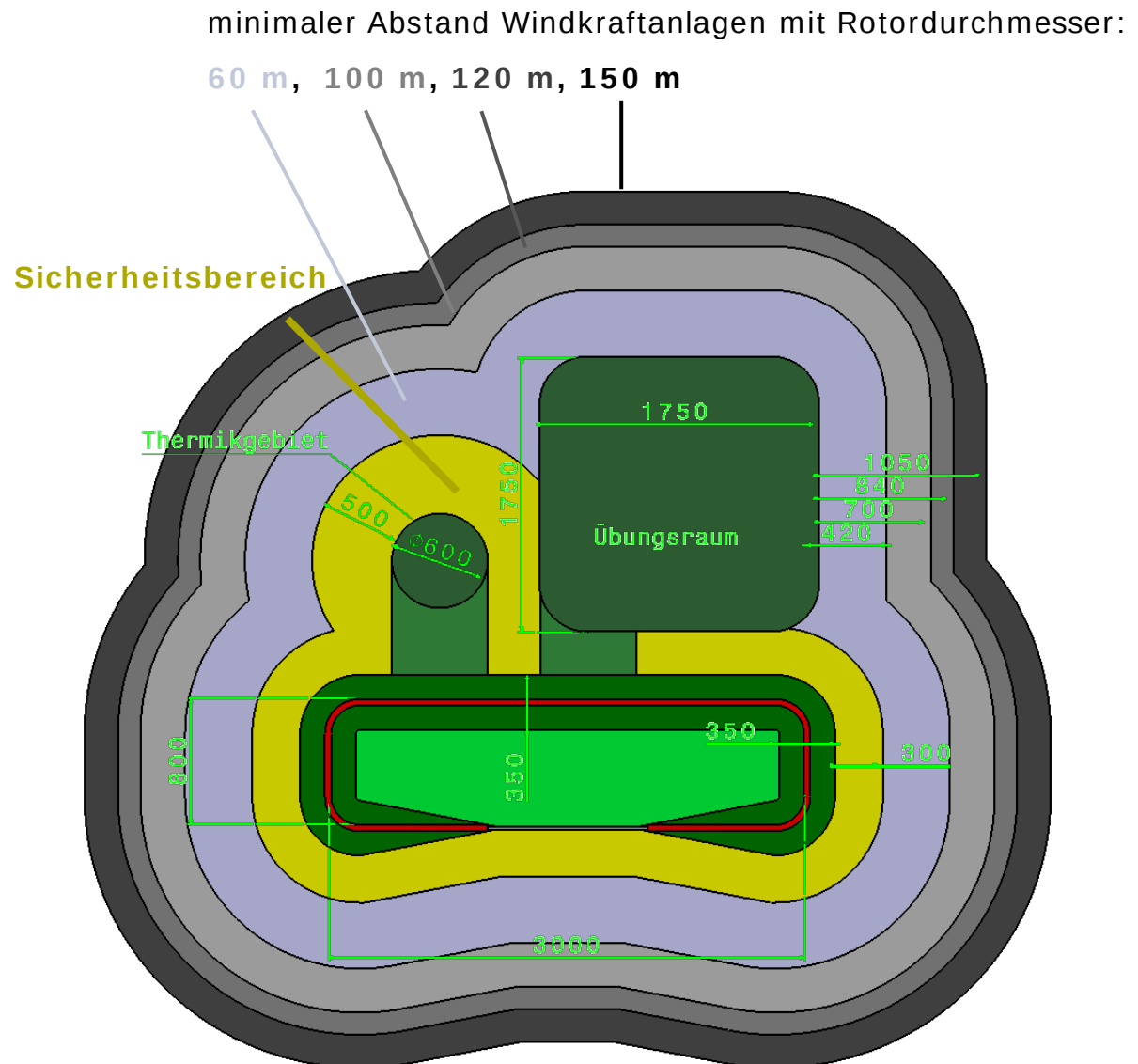


Abbildung 7.5: Sicherheitsbereich Segelflugplatz

7.5 Hindernisfreiflächen Gleitschirme und Hängegleiter

Gleitschirme können motorisiert auf einem Flugplatz starten und landen. Die relevante virtuelle Zylinderoberfläche vom Einflussbereich von Windenergieanlagen hat für sie dabei einen Radius von 7 Rotordurchmessern. Für Hängegleiter ist ein Mindestabstand von 12 Rotordurchmessern einzuhalten. Aufgrund ihrer niedrigen Fluggeschwindigkeit, können sie sich nicht oder nur schwer in auch für Ultraleichtflugzeuge beziehungsweise Segelflugzeuge vorhandene Platzrunden einordnen. Eigene An- und Abflugwege sind daher normal. Diese Korridore müssen mindestens 400 m breit sein.

minimaler Abstand Windkraftanlagen mit Rotordurchmesser:

60 m, 100 m, 120 m, 150 m

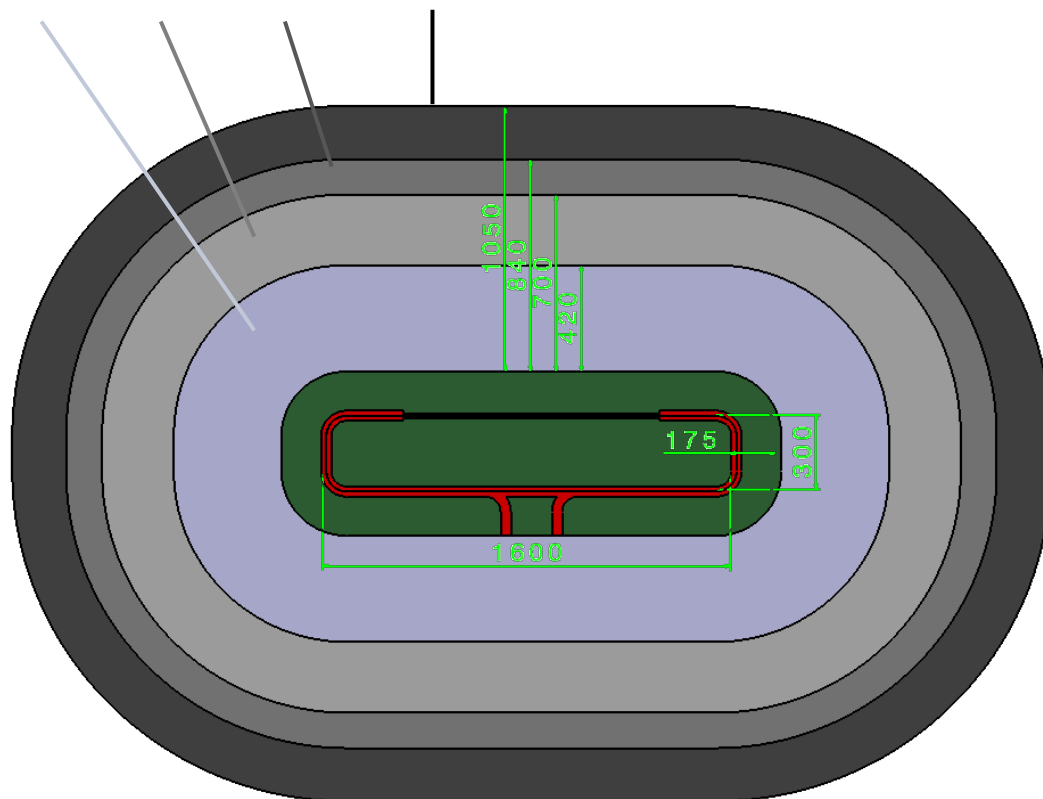


Abbildung 7.6: Sicherheitsbereich Gleitschirm

7.6 Hindernisfreiflächen Ballone und Fallschirmspringer

Da Ballone von einem Flugplatz aus gewöhnlich nur starten, müssen lediglich Freiflächen ausgehend von der Ballonfläche existieren, die einen sicheren Start ermöglichen. Dabei ist davon auszugehen, dass Ballone und Fallschirmspringer sich zu oder von der Start bzw. Landefläche mit einer minimalen Neigung von 1:4 bewegen. Bei einer Anlagenhöhe von 120 m ergibt sich somit eine Strecke von 480 m von den Seitenrändern des Start- bzw. Landebereiches.

minimaler Abstand Windkraftanlagen mit Rotordurchmesser:

60 m, 100 m, 120 m, 150 m

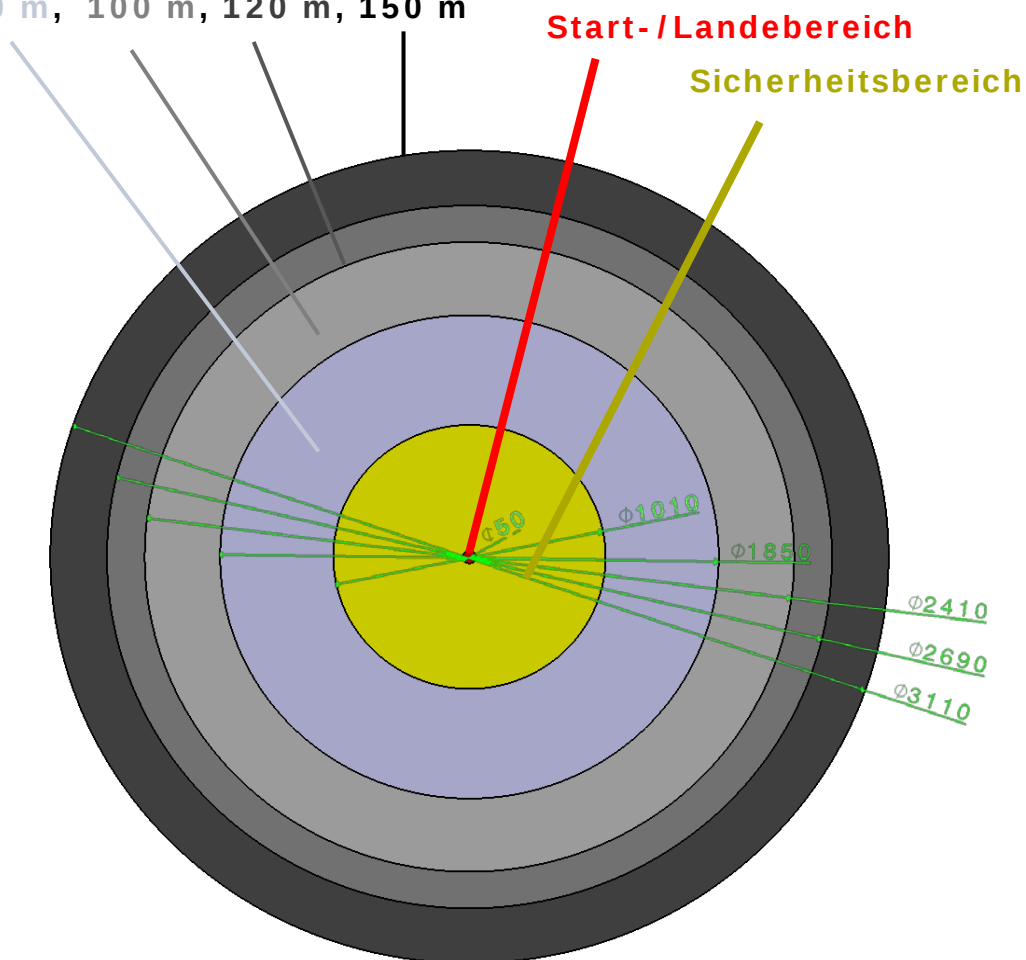


Abbildung 7.7: Sicherheitsbereich Fallschirmspringer/Ballonstartfläche

7.7 Beispiel Kombination

Nachfolgend wird grafisch ein Beispiel für die freizuhaltenden Sicherheitsflächen an einem Flugplatz gegeben, der einen Flugbetrieb mit allen zuvor ermittelten Flugbetriebsarten hat.

minimaler Abstand Windkraftanlagen mit Rotordurchmesser:

60 m, 100 m, 120 m, 150 m

Toleranzbereich idealer Pilot

Sicherheitsbereich

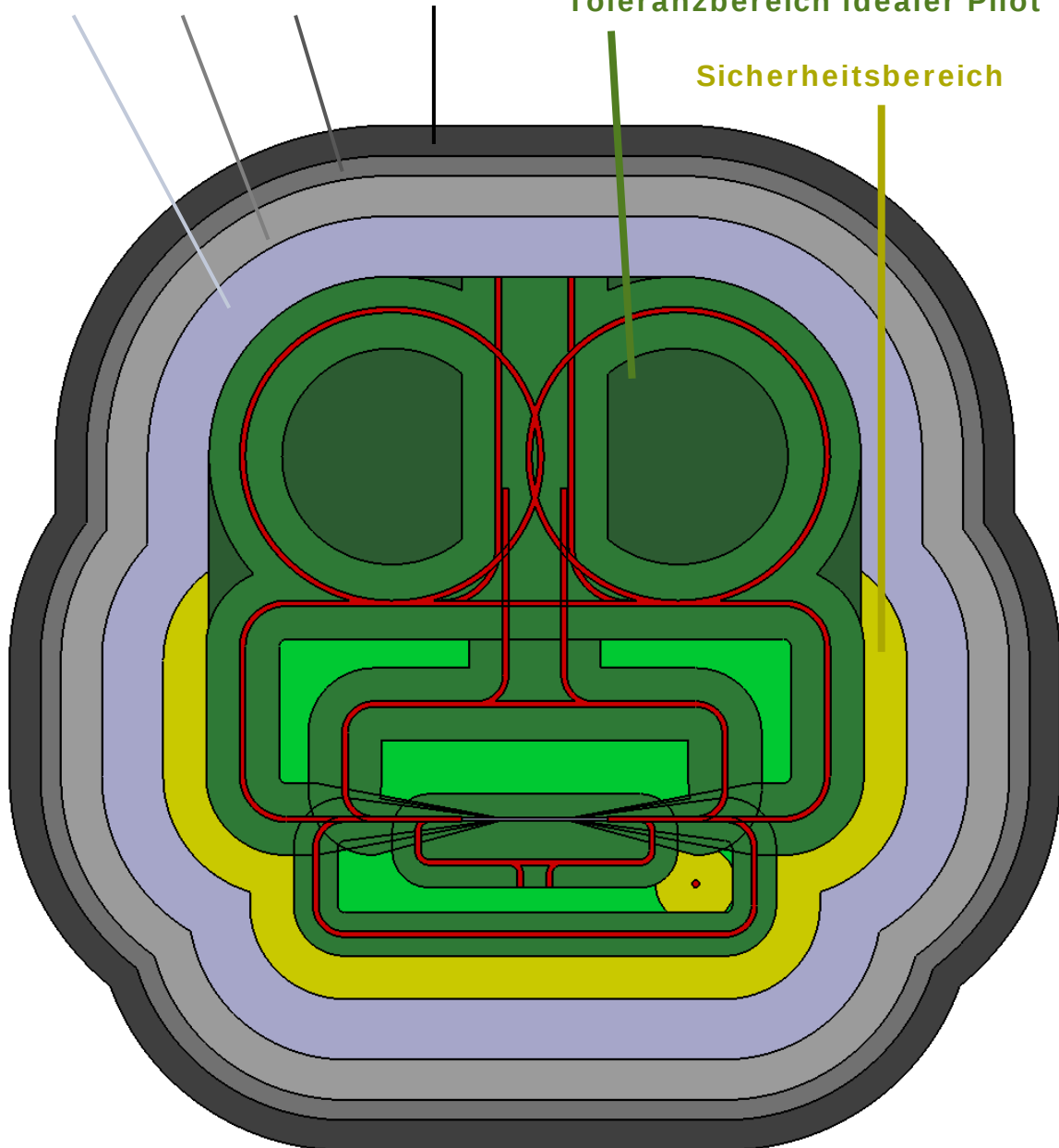


Abbildung 7.8: Übersicht Schutzbereiche kombinierte Verkehrsarten

7.8 Einfluss Topografie

Die vorangehenden Herleitungen und grafischen Darstellungen basieren auf der Grundlage, dass sich der Flugplatz auf einem absolut flachen Land befindet. Insbesondere für Flugplätze, die sich in Tälern befinden, müssen Anpassungen getroffen werden. In diesem Fall sind An- und Abflugstrecken auf der gesamten Länge, bis das Tal verlassen ist und der Flugweg unabhängig der Topografie gewählt werden kann, vom Einfluss von Windenergieanlagen gebieten frei zu halten. Die beschriebenen Ein- und Ausflugstrecken sind daher wie die Platzrundenführung zu betrachten und auf ihrer vollständigen Strecke zu beiden Seiten auf 550 m Halbbreite von dem Einfluss von Windenergieanlagen frei zu halten.

8. Fazit

Die „friedliche Koexistenz“ von Windkraftanlagen und Landeplätzen wird in den kommenden Jahren wesentliche Bedeutung für die Realisierung der Energiewende und die dafür notwendig bereitzustellenden Freiflächen, aber auch für den Schutz insbesondere der Allgemeinen Luftfahrt, für eine sichere und unfallfreie Ausbildung und für die Ausübung sämtlicher Luftsportarten haben. Den An- und Abflugverfahren, der Platzrunde sowie Start und Landung wird dabei eine wesentliche Bedeutung zuteil.

Getragen von diesem Gedanken, konnten die wesentlichen Interaktionen zwischen Luftfahrzeugen und Windkraftanlagen im vorliegenden Gutachten beleuchtet werden und daraus eine, aus dem Spannungsfeld von Hindernisfreiheit, Pilotenbelastung und sicherer „Fliegbarkeit“ entwickelte, folgerichtige Empfehlung abgeleitet werden. Es wurde auch gezeigt, dass einige, aus der aerodynamischen Optimierung der Windkraftanlagen abgeleitete, Strömungsfelder im Nachlauf für die Beurteilung der Auswirkungen auf den Flugweg eher untauglich sind. Es bleibt in einer zukünftigen Untersuchung ggf. experimentell zu klären, inwieweit die vorliegenden, in ihrer Kernaussage sehr unterschiedlichen, numerischen Ergebnisse im Detail verifiziert und auf das hochkomplexe Gebiet der „Systemantwort“ der verschiedenen Fluggeräte auf das Strömungsfeld von Windkraftanlagen übertragen werden können.

Der aktuelle Vorschlag berücksichtigt nun sinnvollerweise die Größe des Rotorkreises ebenso wie die sich aus den einzelnen Flugphasen ergebenden unterschiedlichen Mindestabstände. Natürlich werden gerade in diesem Zusammenhang die Festlegung von Platzrunden, Übungsräumen und Anflugstrecken sowie die exakte Durchführung der einzelnen Flugabschnitte wesentlich zur Sicherheit beitragen müssen.

Die Mindestabstände von Hindernissen zur Platzrunde, festgelegt in den NfL 1 92/13, von 400 m zum Gegenanflug und 850 m zu allen übrigen Platzrundenteilen sind nicht geeignet, um einen sicheren Flugbetrieb für alle Verkehrsteilnehmer sicherzustellen. Insbesondere die Standardverfahren zum

Einflug in die Platzrunde im Gegenanflug, aber auch das Fliegen von Vollkreisen im Gegenanflug sind mit derart geringen Abständen nicht möglich. Hindernisse im Abstand von 400 m zur Platzrunde nehmen in unzulässiger Weise Möglichkeiten zum Vermeiden von Kollisionen durch Ausweichen.

Windenergieanlagen müssen aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften als dynamische Luftfahrthindernisse aufgefasst werden - im Gegensatz zum klassischen statischen Hindernis. Windenergieanlagen verursachen eine signifikante Störung des Windes, der in einem Bereich mit einem Radius von bis zu sieben Rotordurchmessern (Hängegleiter zwölf Rotordurchmesser) eine Gefährdung für den Luftverkehr darstellt. Eine Windenergieanlage muss daher bei der Betrachtung als Luftfahrthindernis als ein Zylinder mit sieben Rotordurchmessern im Radius und einer Höhe von der Gesamthöhe der Anlage zuzüglich 15 % des Rotordurchmessers aufgefasst werden.

Ein Pilot kann die Entfernung zu Windenergieanlagen – insbesondere aufgrund ihrer drehenden Rotoren, aber auch wegen der gleichen äußeren Form bei signifikanten Größenunterschieden – nur sehr schwer abschätzen. Die unterbewusste Gefährdung ist signifikant höher, sodass mehr Aufmerksamkeit für die Wahrung eines ausreichenden Abstandes verwendet wird. In Platznähe unterbleiben so die ordentliche Anflugvorbereitung und Beobachtung des übrigen Verkehrs. Hieraus ergibt sich eine konkrete Unfallgefahr.

Der unter 2. (bzw. Kapitel 7.1) beschriebene Zylinder darf dem Gebot der Rücksichtnahme entsprechend nicht in die Schutzzonen hineinragen, wie sie in Kapitel 7.2.8 beschrieben sind.

Die Bauschutzbereiche in heutiger Form schützen Flugplätze nicht vor unzumutbaren Einschränkungen aufgrund neu errichteter Windenergieanlagen in der Umgebung. Sie sind in ihrer Geometrie und von ihren Eigenschaften her nicht mit Hinblick auf Windparks und dynamische Hindernisse in Form von Windenergieanlagen ausgelegt.

Bauschutzbereiche können den Luftverkehr nur dann vor den Auswirkungen von Windenergieanlagen schützen, wenn der im Kapitel 7.1 hergeleitete Zylinder als Referenz genommen wird.

Das Verletzen von Hindernisfreiflächen aufgrund von Windenergieanlagen kann nicht allein aufgrund der Geometrie der Windenergieanlage analysiert werden, sondern der in Kapitel 7.1 dargestellte Zylinder muss der Bewertungsmaßstab sein.

Der in Kapitel 7.1 hergeleitete Zylinder von Windenergieanlagen darf nicht in die Visual Segment Surface eines Anfluges nach Instrumentenflugregeln eindringen. Die bloße äußere Form der Windenergieanlage darf nicht das Bewertungskriterium sein.

9. Literaturverzeichnis

- [1] "EU DVO 923/2012 (SERA A/B) Allgemeines Info-Briefing,"
- [2] ICAO, *Phase of Flight Definitions English*, 2013.
- [3] ECCAIRS Aviation 1.3.0.12 Data Definition Standard Attribute Values: ECCARIS 1.3.0.12, 2013.
- [4] jstarkey, *Aviation Occurence Categories*, 2011.
- [5] ICAO, "Definitions,"
- [6] *Durchführungsverordnung (EU) Nr. 923/2012 der Kommission vom 26. September 2012 zur Festlegung gemeinsamer Luftverkehrsregeln und Betriebsvorschriften für Dienste und Verfahren der Flugsicherung und zur Änderung der Durchführungsverordnung (EG) Nr. 1035/2011 sowie der Verordnungen (EG) Nr. 1265/2007, (EG) Nr. 1794/2006, (EG) Nr. 730/2006, (EG) Nr. 1033/2006 und (EU) Nr. 255/2010* Text von Bedeutung für den EWR: Nr. 923/2012, 2012.
- [7] muefr111, *Bekanntmachung über Flugbetrieb nach Instrumentenflugregeln im Luftraum der Klasse G: NFL 1-293-14*, 2014.
- [8] muefr111, *Zukünftiger IFR-Flugbetrieb an unkontrollierten Flugplätzen - Einrichtung von "Radio Mandatory Zones (RMZ)": AIRC VFR 01*, 2014.
- [9] VO (EU) Nr. 1178/2011, *Anhang 1: Part-FCL*, 2014.
- [10] S. B. Pope, "Turbulent Flows," 2000.
- [11] "6-1992_G-BTPE_Append,"
- [12] P. Markowski and Y. Richardson, "On the Classification of Vertical Wind Shear as Directional Shear versus Speed Shear," (en).
- [13] "Turbulence and Gusts," (en).
- [14] CitizenSailor, "Light, Moderate or Severe Turbulence...How Are They Defined?," 30 Aug, 2009.
- [15] R. E. Arkell, "Differentiating between types of wind shear in aviation forecasting," (en).
- [16] "Wind shear and turbulence,"
- [17] *Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation Meteorological Service for International Air Navigation: Part I Core SARPs Part II Apendices and Attachments*, 2007.

- [18] H. Fricke, *Hindernisuntersuchung zur Errichtung von Windenergieanlagen im Flughafennahbereich*. Available:
<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/406563/> (2015, Sep. 20).
- [19] muefr111, *Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb: NFL I 92/13*, 2013.
- [20] *Richtlinien für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb*, 2001.
- [21] *Richtlinien über die Hindernisfreiheit für Start- und Landebahnen mit Instrumentenflugbetrieb*.
- [22] *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen und Verwaltungsverfahren in Bezug auf Flugplätze: VO 139/2014*, 2014.
- [23] "ICAO doc 9137 Airport Services Manual Part 6:second edition," (en), 1983.
- [24] "CHAPTER 10 - Obstacles in Airspace," (en), 1999.
- [25] "Airport planning, design, operation and safety,"
- [26] atyo, *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation Aerodromes Volume 1 Aerodrome Design and Operations: Annex 14 Volume 1*, 2013.
- [27] ICAO, *Aircraft Operations. Volume I - Flight Procedures: DOC 8168; OPS/611*, 2006.
- [28] *Introduction To Wind Turbine | Wind Turbine Design | Wind Turbine Technology*. Available: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/1782-introduction-to-wind-turbine-wind-turbine-design-wind-turbine-technology/> (2014, Sep. 22).
- [29] R. Gasch and P. Bade, Eds, *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, 7th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [30] C. Ender, "Wind Energy Use in Germany - Status 31.12.2014: Windenergienutzung in Deutschland Stand 31.12.2014," (de), *DEWI Magazin*, no. 46, pp. 26–37, 2015.
- [31] Matt Whitby, *V164-8.0 MW breaks world record for wind energy production: MHI Vestas Offshore Wind's V164-8.0 MW prototype set a new benchmark for power production recently when the turbine produced 192,000 kWh in a*

- 24 hour period, enough to power approximately 13,500 Danish households, demonstrating the full capability of the world's most powerful wind turbine. Available: <http://www.mhivestasoffshore.com/v164-8-0-mw-breaks-world-record-for-wind-energy-production/>.
- [32] "Wind Turbines in Denmark,"
- [33] C. Ender, "Wind Energy Use in Germany - Status 31.12.2012: Windenergienutzung in Deutschland Stand 31.12.2012," (de), *DEWI Magazin*, no. 42, pp. 31–42, 2013.
- [34] IEA and International Energy Agency, "Technology Roadmap: Wind Energy - 2013 edition," (en).
- [35] *NfL II 37 2000 Grundsätze des Bundes und der Länder für die Regelung des Flugverkehrs an Flugplätzen ohne Flugverkehrskontrolle: NfL II 37 2000*, 2000.
- [36] H. Reichmann, *Segelfliegen: Die praktische Ausbildung*, 8th ed. Stuttgart: Motorbuch-Verl, 2013.
- [37] *Segelflugsport-Betriebs-Ordnung: SBO*, 2014.
- [38] T. Hahm, "Freileitung und Errichtung von Windenergieanlagen,"
- [39] L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, and A. Crespo, "Wind turbine wake aerodynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 39, no. 6-7, pp. 467–510, 2003.
- [40] Stoevesandt, "Böenbelastung von UL-Flugzeugen durch den turbulenten Nachlauf von Windenergieanlagen," Oldenburg, 2014.
- [41] R. Mikkelsen, "Actuator Dis Methods Applied to Wind Turbines," Dissertation, Fluid Mechanics, Technical University Denmark, Lyngby, 2003.
- [42] F. Massouh and I. Dobrev, "Exploration of the vortex wake behind of wind turbine rotor," (en), *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 75, p. 12036, 2007.
- [43] L. Papula, *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 10th ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [44] H. Schlichting and E. Truckenbrodt, *Aerodynamik des Flugzeuges: Erster Band: Grundlagen aus der Strömungstechnik Aerodynamik des Tragflügels (Teil I)*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
- [45] J. Schmidt, E. Daniele, and B. Stoevesandt, "FLUGEMPFEHLUNGEN FÜR DEN UL-SONDERLANDEPLATZ BOSLAR: Ergänzende Ergebnisauswertung zur

- Gefährdung von ULF durch WEA für den Standort Linnich-Boslar,” Mar. 2015.
- [46] B. W. McCormick, *Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics*, 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
 - [47] G. glabeke, A. Bonanni, B. Conan, and J. van Beeck, “The influence of wind turbine induced turbulence on ultralight aircraft, a CFD analysis,” (en).
 - [48] Y. Wang, M. White, Barakos, and Prof George, “caa wind turbine report,” (en).
 - [49] T. Mulinazzi and Z. C. Zheng, “Wind Farm Turbulence Impacts on General Aviation Airport in Kansas,” KU-13-6, Jan. 2014.
 - [50] S. Ivanell, *Stability of the tip spiral originating from a wind turbine*. Available: <http://space.hgo.se/ivanell/?q=node/6> (2015, Sep. 20).
 - [51] H. Schimmels, “Untersuchung zum Nachlaufeinuss von Windenergieanlagen auf Segelugzeuge,” Diplomarbeit, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014.
 - [52] M. E. Rhodes and J. K. Lundquist, “The Effect of Wind-Turbine Wakes on Summertime US Midwest Atmospheric Wind Profiles as Observed with Ground-Based Doppler Lidar,” (en), *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 149, no. 1, pp. 85–103, 2013.
 - [53] J. K. Lundquist and L. Bariteau, “Dissipation of Turbulence in the Wake of a Wind Turbine,” *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 154, no. 2, pp. 229–241, 2015.
 - [54] ICAO, *Manual on Low-level Wind Shear: DOC 9817 AN/449*, 2005.
 - [55] *NASA Task Load Index*.
 - [56] F. Janser, B. Hoeveler, and T. Zeybek, “Platzrundenkorridor am Flugplatz Bonn-Hangelar,” 2013.