



# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z\_GIS)  
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

## „Bereitstellung von meteorologischen Messungen aus Luftverkehrsdaten“

vorgelegt von

Diplom Meteorologe (FH),  
staatlich geprüfter Informatiker  
Tobias Klotz

102614, UNIGIS MSc Jahrgang 2012

Zur Erlangung des Grades  
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:  
Dr. Wolfgang Konle

Immenstaad den, 29.06.2015

## **Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit**

Hiermit versichere ich diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben.

Diese Master Thesis wurde eigens zur Erlangung des Titels MSc. (GIS) erarbeitet und wurde in gleicher oder ähnlicher Form bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Immenstaad am Bodensee, den 29.06.2015

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	14
2.	Kurzfassung .....	17
3.	Der Betrieb von meteorologischen Messnetzen und die aerologische Messung meteorologischer Größen in der Atmosphäre gemäß den Vorgaben der WMO .....	19
3.1.	Meteorologische Messung und Beobachtung .....	19
3.2.	Spezifikationen bodengebundener synoptischer Messnetze.....	20
3.3.	Messung von meteorologische Größen in der Atmosphäre.....	21
3.3.1.	Allgemeine Anforderungen an die Messgeräte .....	21
3.3.2.	Verbindliche Standards für meteorologische Messgeräte .....	21
3.3.3.	Einheiten, Symbolik und Konstanten von meteorologischen Messgeräten.....	22
3.3.4.	Genauigkeit bei meteorologischen Messungen .....	22
3.4.	Messmethoden und Vorgaben der WMO zur Durchführung von aerologischen Messungen .....	30
3.4.1.	Notwendigkeit und Verwendung von aerologischen Messungen.....	30
3.4.2.	Maschenweite des aerologischen Messnetzes .....	30
3.4.3.	Zu messende Größen bei aerologischen Messungen .....	30
3.4.4.	Häufigkeit und Termin der Messungen .....	31
3.4.5.	Messung der Temperatur .....	31
3.4.6.	Messung des Höhenwinds .....	32
3.4.7.	Das Global Positioning System .....	34

3.5.	Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) .....	34
3.5.1.	Funktionsweise von AMDAR an Bord eines Flugzeuges .....	34
3.5.2.	Generierte meteorologische Aussagen und Messfrequenz des AMDAR.....	35
3.5.3.	Gemessene und ermittelte meteorologische Größen des AMDAR – Systems an Bord von Flugzeugen.....	36
3.5.4.	Qualität der gemessenen Daten die mit AMDAR verarbeitet werden.....	40
3.5.5.	European Aircraft Meteorological Data Display (E-AMDAR).....	41
3.5.6.	Zukünftiges Nachfolgesystem für AMDAR.....	41
3.6.	Meteorologische Messungen an Luftfahrzeugen .....	42
3.6.1.	Regeln für die Messungen .....	42
3.6.2.	Zu meldende Messgrößen und Beobachtungen bei LFZ - Messungen .....	43
3.6.3.	Pilot Weather Reports (PIREP) .....	43
3.6.4.	Windmessung anhand von Mode S - Daten.....	44
3.7.	Anforderungen an meteorologische Messungen und Messgeräte .....	45
4.	Luftbewegungen in der freien Atmosphäre .....	46
4.1.	Der Wind als Vektor .....	46
4.2.	Eigenschaften des horizontalen Windfelds.....	47
4.2.1.	Translation .....	47
4.2.2.	Deformation .....	48
4.2.3.	Divergenz.....	49
4.2.4.	Konvergenz.....	49
4.2.5.	Relative Vorticity.....	51
4.3.	Der geostrophische Wind.....	52
4.4.	Der Thermische Wind und seine Bedeutung .....	52
4.5.	Der Jetstream an der Polarfront (Polarfrontjet) .....	55

5.	Systemeigenschaften des Sekundärradars als Basis zur Generierung meteorologischer Messgrößen.....	56
5.1.	Luftraumverwaltung in Deutschland mittels Transpondern .....	56
5.1.1.	Funktionsweise und Anwendung von ADS.....	56
5.1.2.	Standards für Sekundärradarverfahren .....	57
5.1.3.	Werte aus Flugüberwachungsdaten zur Generierung meteorologischer Aussagen	62
5.1.4.	Qualitätsanforderungen für die Luftraumüberwachung durch Radarbeobachtung	64
5.1.5.	Innereuropäischer Austausch von Luftverkehrsdaten.....	65
5.2.	Datenqualität der Mode S Messung.....	68
5.2.1.	Sekundärradar Gerätespezifikationen .....	68
5.2.2.	Einfluss der Genauigkeit der magnetischen Richtungsmessung auf die Windmessung.....	70
5.2.3.	Genauigkeit der Windmessung durch Staudruckmessung.....	71
5.2.4.	Genauigkeit des bei Airbus D&S verwendeten Tracking Systems zur Verarbeitung von Mode S Daten .....	72
5.2.5.	Fehlerquellen bei der Ableitung von Windrichtung und - Geschwindigkeit aus Mode S Daten .....	72
5.2.6.	Einfluss des Luftfahrzeugtyps auf die Windmessung.....	73
5.2.7.	Verwendung von ModeS Daten in der numerischen Wettervorhersage.....	73
5.2.8.	Studie über Wind- und Temperaturmessungen aus Mode S Daten am Flughafen Schiphol in den Niederlanden.....	74
5.3.	Zusammenfassung der Eignungsprüfung von Mode S Daten zur Windbestimmung.	77
6.	Praktische Studien zum Nachweis der Qualität und Anwendbarkeit von Luftverkehrsdaten basierten Windmessungen in der operationellen Meteorologie .....	78
6.1.	Bereitstellung von Windrichtung und - Geschwindigkeit aus Mode S Daten am 05.05.2015 ab 12.00 UTC für Deutschland aus meteorologisch synoptischer Sicht..	78
6.1.1.	Synoptische Lage für den 05.05.2015 .....	78
6.1.2.	Beschreibung des Messgebiets, Deutschland aus meteorologischer Sicht .....	79

6.1.3.	Flugbewegungen im deutschen Luftraum am 05.05.2015.....	80
6.1.4.	Charakterisierung des Windfelds über Deutschland am 05.05.2015.....	81
6.1.5.	Erzeugung von Kartenprodukten aus Mode S Daten vom 05.05.2015, 12.00 – 12.30UTC .....	82
6.1.6.	Deterministisches Verfahren zur Generierung einer kontinuierlichen Fläche.....	83
6.1.7.	Erstellung der Kartenprodukte mit dem Geoinformationssystem QGIS .....	87
6.2.	Mode S Windmessung als Parameter in der Flugwetterberatung für Inlandsflüge der Bundeswehr .....	105
6.2.1.	Meteorologische Beratung von Streckenflügen in der Bundeswehr am 05.05.2015.. .....	105
6.2.2.	Meteorologische Beratung von Streckenflügen mit Hilfe von Mode S Winddaten ... .....	106
6.2.3.	Zusammenfassung der Vergleiche zwischen den Mode S Messungen innerhalb der Flugkorridore und den Streckenflugberatungen .....	117
7.	Abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse .....	118
8.	Ausblick.....	120
9.	Anhang.....	121
9.1.	Windkarten für den 05.05.2015 .....	121
9.2.	Auszug aus dem ASTERIX Code.....	124
10.	Begriffserklärungen .....	125
10.1.	Das Flugflächensystem und seine Nomenklatur FLxxx .....	125
10.2.	Die Flugregeln und ihre Nomenklatur .....	125
10.3.	Synoptische Termine .....	126
10.4.	Synoptische Station.....	126
10.5.	Isotachen .....	126
10.6.	Flugeschwindigkeiten in der Luftfahrt .....	126

10.6.1. Wahre Fluggeschwindigkeit .....	126
10.6.2. Geschwindigkeit relativ zum Boden (Groundspeed).....	126
10.6.3. Mach Zahl	127
10.7. Kata - , Anafont .....	127
10.8. Windrichtung .....	127
11. Abkürzungsverzeichnis.....	128
12. Literaturverzeichnis: .....	130
13. Softwareverzeichnis.....	132

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.3-1: Normalverteilung und statistische Größen .....	24
Abb. 3.5-1: Architektur des AMDAR innerhalb der LFZ Systemumgebung .....	35
Abb. 3.5-2: Datenfluß, gemessene und berechnete meteorologische Größen im LFZ..	36
Abb. 3.5-3: wahrer Steuerkurs und wahre Fluggeschwindigkeit im Flug .....	38
Abb. 3.5-4: Zusammenhang zwischen Windvektor, True Track und True Air Speed ..	39
Abb. 4.1-1: Der Windvektor und seine Komponenten im 3- dimensionalen Koordinatensystem.....	46
Abb. 4.2-1: Translation eines Luftpakets im Zeitverlauf.....	47
Abb. 4.2-2: Deformation eines Luftpakets im Zeitverlauf .....	48
Abb. 4.2-3: Trajektorien eines Diffluenzfelds .....	48
Abb. 4.2-4: Trajektorien eines Konfluenzfelds .....	48
Abb. 4.2-5: Horizontaldivergenz des Luftpakets im Zeitverlauf.....	49
Abb. 4.2-6: Horizontalkonvergenz des Luftpakets im Zeitverlauf .....	49
Abb. 4.2-7: Geschwindigkeitsdivergenz des Windfelds.....	50
Abb. 4.2-8: Geschwindigkeitskonvergenz des Windfelds.....	50
Abb. 4.2-9: Richtungsdivergenz des Windfelds .....	50
Abb. 4.2-10: Richtungskonvergenz des Windfelds .....	50
Abb. 4.2-11: Zusammenhang von Divergenten und Konvergenten Bewegungen innerhalb der Atmosphäre in der Seitenansicht .....	51
Abb. 4.2-12: antizyklonale Rotation eines Luftpakets .....	51
Abb. 4.2-13: zyklonale Rotation eines Luftpakets .....	52
Abb. 4.4-1: Isothermen    Isohypsen und kalte Luft unter tieferem Potential.....	53
Abb. 4.4-2: Isothermen    Isohypsen und warme Luft unter tieferem Potential → Eine Richtungsänderung um 180° ist möglich.....	53
Abb. 4.4-3: Isothermen schneiden die Isohypsen → Der Wind weht aus Richtung der warmen Luft → WarmLuftAdvektion (WLA) .....	54

Abb. 4.4-4: Isothermen schneiden die Isohypsen → Der Wind weht aus Richtung der kalten Luft → KaltLuftAdvektion(KLA) .....	54
Abb. 4.5-1: Polarfrontjet im Querschnitt; .....	55
Abb. 5.1-1: Funktionsweise von ADS .....	56
Abb. 5.1-2: Luftraumstruktur in Deutschland für Instrumenten – und Sichtflug .....	58
Abb. 5.1-3: Mode S Sensoren in Deutschland und Umgebung .....	60
Abb. 5.1-4: Sensorabdeckung des deutschen Luftraums mit Flugspuren (Aufzeichnungsdauer 2min).....	61
Abb. 5.1-5: Vertikalprofil einer zweiminütigen Mode S Aufzeichnung des Deutschen Luftraums mit Blickrichtung .....	61
Abb. 5.1-6: Flugbewegungen im deutschen Luftraum in 2014 .....	63
Abb. 5.1-7: Luftverkehr nach Instrumentenflugregeln pro Jahr in Mio seit Einführung von Mode S .....	63
Abb. 5.2-1: Flugbahn eines Helikopters. ....	72
Abb. 6.1-1: relative Topografie 500/1000 gpdam (farblich als Isoflächen); Bodendruck in hPa und 500 hPa Druckfläche in gpdam (als Isolinien); Druckzentren; Modell GFS; .....	79
Abb. 6.1-2: Radiosondenstationen In Europa; [vgl.: 33] .....	80
Abb. 6.1-3: Vektorielle Ermittlung des Höhenwinds mit Hilfe von Luftverkehrsdaten .....	83
Abb. 6.1-4: Beispiel für Flugbewegungen innerhalb von 30min in einem Gebiet.....	84
Abb. 6.1-5: Aufteilung einer Gitterzelle in 64 Teilzellen.....	85
Abb. 6.1-6: Umgebung aus der, der gewichtete Wert für .....	86
Abb. 6.1-7: h1, FL050, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende.....	88
Abb. 6.1-8: h1, FL050 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD .....	89

Abb. 6.1-9: h2, FL100, Maßstab: 1:3 500 000 Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende.....	90
Abb. 6.1-10: h2, FL100 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD.....	91
Abb. 6.1-11: h3, FL200, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende.....	92
Abb. 6.1-12: h3, FL200 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD.....	93
Abb. 6.1-13: h4, FL300, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende.....	94
Abb. 6.1-14: h4, FL300 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD.....	95
Abb. 6.1-15: h5, FL400, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende.....	96
Abb. 6.1-16: h5, FL400 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD.....	97
Abb. 6.1-17: h1, FL050, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte.....	101
Abb. 6.1-18: h2, FL100, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte.....	102
Abb. 6.1-19: h3,FL200, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte.....	102
Abb. 6.1-20: h4, FL300, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte.....	103
Abb. 6.1-21: h5, FL400, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte.....	103
Abb. 6.1-22: Ausschnitt aus der Luftraumstruktur [vgl.: 18],.....	104

Abb. 6.2-1: Messpunkte der Mode S Messung entlang der Flugstrecke von Laupheim nach Fritzlar .....	106
Abb. 6.2-2: Windgeschwindigkeit während des Flugs von Laupheim nach Fritzlar...	107
Abb. 6.2-3: Windrichtung während des Flugs von Laupheim nach Fritzlar .....	107
Abb. 6.2-4: Abb. 6.2-5: Formular DB518 Streckenflugberatung Bundeswehr gemäß der gültigen Beratungsvorschrift für Streckenflüge der Bundeswehr für den Flug von Laupheim nach Fritzlar .....	108
Abb. 6.2-6: Messpunkte der Mode S Messung entlang der Flugstrecke von Wunstorf nach Berlin .....	110
Abb. 6.2-7: Windgeschwindigkeit während des Flugs von Wunstorf nach Berlin .....	111
Abb. 6.2-8: Windrichtung während des Flugs von Wunstorf nach Berlin .....	111
Abb. 6.2-9: Abb. 6.2-10: Formular DB518 Streckenflugberatung Bundeswehr gemäß der gültigen Beratungsvorschrift für Streckenflüge der Bundeswehr für den Flug von Wunstorf nach Berlin .....	112
Abb. 6.2-11: Messpunkte der Mode S Messung entlang der Flugstrecke von Neuburg Donau nach Wittmundhafen .....	114
Abb. 6.2-12: Windgeschwindigkeit während des Flugs von Neuburg Donau nach Wittmundhafen.....	115
Abb. 6.2-13: Windrichtung während des Flugs von Neuburg Donau nach Wittmundhafen.....	115
Abb. 6.2-14: Formular DB518 Streckenflugberatung BW gemäß der gültigen Beratungsvorschrift für Streckenflüge der Bundeswehr für den Flug von Neuburg Donau nach Wittmundhafen .....	116
Abb. 6.2-1: Mit Mode S erfassbare meteorologische Phänomene im zeitlichen und räumlichen Verhältnis .....	118
Abb. 9.1-1: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL050, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h.....	121
Abb. 9.1-2: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL100, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h.....	122
Abb. 9.1-3: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL180, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h.....	122

Abb. 9.1-4: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL300, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h.....	123
Abb. 9.1-5: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL390, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h.....	123
Abb. 9.2-1: Auszug aus dem ASTERIX - Code .....	124

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.3-1: Das Vertrauensniveau einer Messung .....	25
Tabelle 3.3-2: Werte für studentisches t abhängig von Vertrauensniveau und Freiheitgrad df .....	26
Tabelle 3.3-3: Elemente einer Metadatenbank .....	29
Tabelle 3.4-1: Wertebereich und Genauigkeitsanforderungen an Windmessungen für die jeweilige Höhe(in hPa) .....	32
Tabelle 3.5-1: festgelegte Toleranzen bei aerologischen Messungen .....	41
Tabelle 3.6-1: Bestandteile und Codierung einer PIREP – Wettermeldung[vgl.: 7].....	44
Tabelle 3.7-1: Anforderungen an operationelle meteorologische Messgeräte des synoptischen Messnetzes .....	45
Tabelle 5.1-1: Eigenschaften eines RMCDE;.....	66
Tabelle 5.1-2: Klassifizierung und Priorisierung der Nutzer von Luftverkehrsdaten ...	67
Tabelle 5.2-1: Grenzwerte und Mindestanforderungen an Sekundärradare im Zuständigkeitsbereich von EUROCONTOL während des Betriebs .....	70
Tabelle 5.2-2: Systematischer Fehler der Windgeschwindigkeit im Vergleich zwischen den Messsystemen.....	75
Tabelle 5.2-3: Quadratischer Mittelwert der Windgeschwindigkeit im Vergleich zwischen den Messsystemen.....	75
Tabelle 5.2-4: Systematischer Fehler der Windrichtung im Vergleich zwischen den Messsystemen .....	76

Tabelle 5.2-5: Quadratischer Mittelwert der Windrichtung im Vergleich zwischen den Messsystemen.....	76
Tabelle 6.1-1: Zuordnung des Wertebereichs der Mode S Messungen zu Höhenstufen .....	84
Tabelle 6.1-2: Vergleich der Mode S Messung mit dem operationell verwendeten Produkt (EUR SWC DWD) in der Verkehrsluftfahrt .....	98
Tabelle 6.2-1: statistische Auswertung von Windrichtung und - Geschwindigkeit während der Zeitabschnitte des Flugs von Laupheim nach Fritzlar .....	107
Tabelle 6.2-2: statistische Auswertung von Windrichtung und - Geschwindigkeit während der Zeitabschnitte des Flugs von Wunstorf nach Berlin .....	111
Tabelle 6.2-3: statistische Auswertung von Windrichtung und - Geschwindigkeit während der Zeitabschnitte des Flugs von Neuburg Donau nach Wittmundhafen.....	115
Tabelle 10.3-1: Synoptische Termine .....	126

# **1. Einleitung**

Mittlerweile werden weltweit jeden Tag 300 000 Luftfahrzeug - Wetterbeobachtungen durchgeführt. Gemessen werden die Außentemperatur, die relative Feuchte, der Wind und die Turbulenz. Temperatur und Wind gehen in die numerische Wettervorhersage ein. In datenarmen Gebieten (wenig bis keine Messstationen) und zwischen den synoptischen Terminen sind Luftfahrzeugmessungen oft die einzige aerologische Datenquelle. Seit nahezu einem Jahrhundert findet meteorologische Datengewinnung mit Hilfe von Luftfahrzeugen statt. Mit den ersten Messungen wurde kurz nach dem ersten Weltkrieg begonnen. Druck, Temperatur und relative Luftfeuchte bis FL135 wurde von Piloten für ein Entgelt gemessen. Für jede „1000 Fuß“ darüber hinaus gab es einen Bonus von 10%. 1936 wurden die ersten kommerziell eingesetzten Radiosonden anhand von Luftfahrzeugmessungen geeicht. Seit Beginn der Verkehrsfluffahrt werden von Piloten Wetterbeobachtungen (PIREP) durchgeführt und per Funk verbreitet. Die erste automatische meteorologische Wettermeldung eines LFZ wurde 1979 gesendet. In den 1990'ern begann der rasche Ausbau des synoptischen Netzes. Die Zahl der automatischen Meldungen nahm schnell zu und gewann an Bedeutung.

Das erste operationelle AMDAR wurde 1986, in Australien, in Betrieb genommen (Australien, beim Bureau of Meterology). Die Nutzung des Dienstes war kostenpflichtig. Andere meteorologische Dienste stellen die Daten kostenfrei zur Verfügung. Da die Anzahl der Messungen an das Luftverkehrsaufkommen gekoppelt ist reduzieren sie sich am Wochenende um 40%. Der offizielle Austausch von AMDAR – Daten findet heute über das GTS der WMO statt. Laut Gesetz ist der Flugzeuginhaber für die Instandhaltung und Wartung der Messinstrumente verantwortlich. Winddaten aus Mode S Flugverkehrsdaten werden nach dem gleichen Prinzip wie AMDAR – Winddaten generiert.

[vgl.: 44]

Bei der Bereitstellung von meteorologischen Messungen aus Luftverkehrsdaten sind viele Aspekte zu berücksichtigen. Die WMO ist der Schirmherr für die globale Messung und Verteilung von meteorologischen Größen und Daten. Ihre Vorschriften und Handbücher sind für alle Mitglieder verpflichtend. Da meteorologische Messungen global durchgeführt werden ist der Zusammenhang zwischen den Messungen sowohl zeitlich, als auch räumlich sehr wichtig. Bei der Einführung einer neuen Messmethode sind die Vorgaben der WMO einzuhalten um die Qualität des internationalen

Messnetzes nicht zu gefährden, sondern zu heben. (Siehe, 3. Der Betrieb von meteorologischen Messnetzen und die aerologische Messung meteorologischer Größen in der Atmosphäre gemäß den Vorgaben der WMO)

Im Luftverkehr wird bereits ein System zur Aufzeichnung meteorologischer Größen an Luftfahrzeugen angewendet. Das AMDAR – System zeichnet in Europa Außentemperatur, Windrichtung und – Geschwindigkeit an 600 Linienflugzeugen auf. Die Messungen werden per Datenfunk an die Wetterdienste weitergeleitet. Das Prinzip der Ermittlung von Windrichtung und – Geschwindigkeit ist ebenfalls auf Luftverkehrsdaten anwendbar. Mit Hilfe des Sekundärradars und des an Bord des LFZ befindlichen Transponders ist es möglich die Position zu bestimmen und Daten auszutauschen. Anhand des Flugwegs über Grund sowie des gemeldeten „magnetic Heading“ (Ausrichtung des Flugzeugs gegenüber der Nordrichtung), und des Staudrucks (True Airspeed / Geschwindigkeit des Flugzeugs gegenüber Luft), wird der am LFZ angreifende Höhenwind bestimmt. Da es sich um eine neue Messmethode handelt ist zu prüfen, in wie fern die gültigen Vorschriften und Vorgaben anwendbar sind und ob sie eingehalten werden können. Das System zur Erhebung von Luftverkehrsdaten ist ebenfalls zu durchleuchten. Qualität, Verfügbarkeit, räumliche Abdeckung und mögliche zeitliche Auflösung gilt es zu ermitteln, sowie nach meteorologischen Gesichtspunkten zu betrachten. (Siehe, 5. Systemeigenschaften des Sekundärradars als Basis zur Generierung meteorologischer Messgrößen)

Um die Ergebnisse der Höhenwindmessungen anhand von Mode S Daten beurteilen zu können sind Kenntnisse über die Eigenschaften des atmosphärischen Windfelds notwendig. Das Windfeld beinhaltet Strukturen und Gesetzmäßigkeiten die zur Qualitätsmessung der Mode S Messungen dienen. Um die Ergebnisse der Mode S Messung diskutieren und darstellen zu können ist eine meteorologische Nomenklatur notwendig. (Siehe, 4. Luftbewegungen in der freien Atmosphäre)

Die Mode S Daten liegen für den deutschen Luftraum und einem Umfeld von 50km vor. Da die LFZ ständig in Bewegung sind, ist eine Messung an einem festen Ort nicht möglich. Deshalb ist es notwendig die Messwerte innerhalb eines Zeitabschnitts zu sammeln, sie zu gewichten und auf festgelegte Punkte zu interpolieren. Das Ergebnis ist ein Rasternetz aus Windrichtung und – Geschwindigkeit innerhalb des Messfelds.

Vertikal sind die Messwerte fünf verschiedenen Höhenstufen zuzuordnen um eine Weiterverarbeitung zu erleichtern. Ein Vergleich mit der EUR SWC DWD (siehe 9.1 Windkarten für den 05.05.2015) zeigt den Grad der Abbildungsleistung und Qualität relativ zu operationellen Produkten. Anhand einer meteorologischen

Streckenflugberatung soll die praktische Verwendbarkeit nachgewiesen werden. (Siehe, 6.Praktische Studien zum Nachweis der Qualität und Anwendbarkeit von Luftverkehrsdaten basierten Windmessungen in der operationellen Meteorologie)

Das „Royal Netherlands Meteorological Institute“ (KNMI) hat mit der Erforschung des Mode S als meteorologische Datenquelle bereits 2008 begonnen. Erste Ergebnisse bestätigen, dass die Windmessung, qualitativ, der AMDAR Messung am Flughafen Schiphol ebenbürtig ist. Doch inwiefern sind Messungen innerhalb des gesamten Deutschen Luftraums meteorologisch operationell nutzbar? Ziel der vorliegenden Master Thesis ist die zeitliche, sowie räumliche Abdeckung und die Qualität von meteorologischen Messungen, die aus Luftverkehrsdaten abgeleitet sind, entsprechend zu prüfen.

## **2. Kurzfassung**

In Deutschland führen 9 Radiosondenstationen zweimal (00.00 UTC und 12.00 UTC) pro Tag eine atmosphärische Messung durch. Ergänzend finden Luftfahrzeugmessungen mittels AMDAR und vereinzelt Radarwindmessungen statt. Diese Messungen bilden die Grundlage aus der alle meteorologischen Produkte für die obere Atmosphäre generiert werden. Im Jahr 2014 fanden durchschnittlich 8100 Flüge pro Tag im deutschen, kontrollierten Luftraum statt. Auf deutschen, internationalen Verkehrsflughäfen wurden pro Tag, im Schnitt, 5800 Start und Landungen durchgeführt. Bei einer Abtastfrequenz von sechs Sekunden und einer durchschnittlichen Verweildauer von zwei Stunden, im deutschen Luftraum, ergeben sich 10 Mio Messungen pro Tag, die sich sowohl räumlich als auch zeitlich gleichmäßig verteilen. Aus diesen Messungen lassen sich leicht, in nahezu Echtzeit, Windrichtung und - Geschwindigkeit extrahieren. Ein immenser Datenschatz den es zu heben gilt. Zur Ermittlung der Qualität und der Aussagekraft der Windmessungen sind die Luftverkehrsdaten, in halbstündigen Abschnitten dem System zur Luftraumüberwachung entnommen, um sie auf ein Raster, entsprechend ihrer Gewichtung, zu interpolieren. Mit Hilfe von QGIS sind die Rasterdaten als Windfeld (Windrichtung und - Geschwindigkeit) über Deutschland in verschiedenen Höhen darstellbar. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) veröffentlicht, für die Verkehrsfluffahrt, zweimal täglich die EUR SWC DWD (siehe 9.1 Windkarten für den 05.05.2015). Sie beinhaltet eine Vorhersage des Höhenwindverhältnisse die 24 Stunden gültig ist und dient als Vergleichsprodukt für die aus den Luftverkehrsdaten gewonnenen Windmessungen. Im Ergebnis zeigt sich eine inhaltliche Übereinstimmung der Windfelder. Im Gegensatz zur EUR SWC ist das generierte Produkt, sowohl zeitlich als auch räumlich, viel feiner aufgelöst. Eine praktische Anwendung der Daten ist in einem Vergleich mit meteorologischen Flugstreckenberatungen für die Bundeswehr simuliert. Hier zeigte sich ebenfalls die höhere Auflösung der generierten Windmessungen. Für die Luftfahrt ergeben sich durch die Einführung und Nutzung eines solchen Systems zur Messung des Windfelds zahlreiche Vorteile. Die Flugsicherheit könnte verbessert werden, der Kraftstoffverbrauch pro Kilogramm Fracht, unter Ausnutzung der Windverhältnisse, kann reduziert werden und die Kapazitätsauslastung des Luftraumes könnte vergrößert werden. Im Katastrophenschutz wäre es möglich präzisere Ausbreitungsanalysen für Schadstoffe zu erstellen. Letztendlich bietet die meteorologische Aussagefähigkeit von Luftverkehrsdaten einen breiten

Anwendungsbereich, der mit der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methode mit geringen Kosten erschließbar ist.

### **3. Der Betrieb von meteorologischen Messnetzen und die aerologische Messung meteorologischer Größen in der Atmosphäre gemäß den Vorgaben der WMO**

#### **3.1. Meteorologische Messung und Beobachtung**

Täglich wird weltweit eine Vielzahl meteorologischer Parameter von den nationalen Wetterdiensten gemessen. Um aus den Messungen ein repräsentatives, lückenloses Bild des globalen atmosphärischen Zustandes zu erhalten ist eine strikte Qualitätssicherung notwendig und internationale Normen sind einzuhalten. Fachlich kompetentes Personal, einheitliche Messverfahren und Geräte sind die Basis für eine für den Ort und die Umgebung repräsentative Messung. Regelmäßige Schulung und Fortbildung des Personals ist ebenso wichtig wie standardisierte homogene Messverfahren, Instrumenten- und Standorttreue. Gute Beobachtungsmethodik resultiert aus Qualifikation, Schulung, Ausrüstung und Unterstützung. Je nach Verwendung müssen die Messungen verschiedenen Anforderungen gerecht werden.

Mit Hilfe von Standardisierungen lässt sich die Zuverlässigkeit und einheitliche Verwendung von Messungen verbessern. Aufgrund von örtlichen Gegebenheiten sind modifizierte Messverfahren oder Lageanpassungen meist unumgänglich. Metadaten helfen die Messungen besser zu interpretieren und je nach Anforderung zu „korrigieren“.

Messungen werden unterteilt in „in situ“- Messungen und Fernerkundung. Bei „in situ“ befindet sich das Messgerät vor Ort. Fernerkundung ist ein Messverfahren bei dem zwischen dem Messobjekt und dem Messgerät eine räumliche Distanz besteht. In der Praxis unterscheidet man zwischen dem Boden - und dem Satellitenmessnetz. Gemeinsam bilden sie das Globale Messnetz. Als geodätisches Referenzsystem für die Positionsangabe wird das „World Geodetic System 1984 (WGS 84)“ mit dem aktuellen Gravitationsmodell „EGM96“ verwendet. Geografische Länge und Breite werden in tausendstel Grad und die Höhe über MSL, auf einen Meter gerundet, angegeben. Maßgebend ist der Ort der tatsächlichen Messung. Die Zeitangabe der Messung erfolgt in UTC. Für homogene Messreihen ist es wichtig die Messbedingungen möglichst konstant zu halten. Änderungen des Umfelds oder der Messgeräte „verfälschen“ lange Messreihen und sind zu vermeiden. Eine lückenlose, aktuelle Beschreibung der Messbedingungen (Stationsgeschichte) ist notwendig um die Messqualität zu sichern.

Bei der Einführung neuer Messgeräte sind „scheinbare“ Änderungen des Stationsklimas möglich. Um diesen Effekt zu vermeiden sollten die neuen Geräte mindestens ein Jahr parallel betrieben und die Messungen verglichen werden. Erst nach der Karenzzeit darf das alte Gerät ersetzt werden. Wartungs – und Instandhaltungsarbeiten sind regelmäßig durchzuführen. Defekte müssen so früh wie möglich erkannt und in den Metadaten dokumentiert werden.

Jede synoptische Station ist in mindestens zwei Jahren Abstand zu prüfen:

- Ist die Lage und Ausrichtung der Messgeräte bekannt, ausreichend und umfangreich dokumentiert?
- Zuverlässigkeit und Zustand der Messgeräte, regelmäßige Verifizierung anhand eines Standards, sofern notwendig
- Sind die Beobachtungsmethoden und Verfahren zur Ableitung von Werten und Aussagen aus den Beobachtungen einheitlich?
- Reicht die Beobachterkompetenz aus zur Aufgabenerfüllung?
- Sind die Metadaten aktuell?

[vgl.: 1, Part 3, 2 ff.]

### **3.2. Spezifikationen bodengebundener synoptischer Messnetze**

Synoptische Messnetze sind hierarchisch aufgebaut, sowie aufgeteilt in globale, nationale und regionale Einheiten. Jede Einheit ist ein eigenständiges Netz und gleichzeitig Teil des nächst Größeren. Das Globale synoptische Netzwerk (GSM) hat eine möglichst weltweite, gleichmäßige Maschenweite und einen international festgelegten Standard (Termine, Messungen,...). Die generierten Daten werden zur zeitlich, räumlichen Darstellung von großräumigen, planetaren meteorologischen Phänomenen und Prozessen verwendet. Regionale Netze bestehen aus synoptischen Bodenstationen und aerologischen Messstationen. Sie sind an den „regionalen“ Bedarf von meteorologischen Dienstleistungen und Informationen angepasst. Nationale Netzwerke dienen der Wahrnehmung von „nationalen“ meteorologischen Belangen. Idealerweise sind Messstationen gleichmäßig verteilt und messen häufig genug um eine genaue Momentaufnahme der atmosphärischen Gegebenheiten bedarfsgerecht zu erzeugen. Die Messungen werden gespeichert und archiviert.

[vgl.: 1, Part 3, 2 ff.]

### **3.3. Messung von meteorologische Größen in der Atmosphäre**

#### **3.3.1. Allgemeine Anforderungen an die Messgeräte**

Messgeräte sollten eine möglichst gleichbleibende Messgeräteabweichung über einen langen Zeitraum aufweisen. Die Eichung eines neuen Messgerätes ist selten ideal. Eine Korrektur der Messwerte während des Betriebs ist notwendig. Diese Korrekturen müssen während des laufenden Betriebs unbedingt aufrechterhalten werden. Die Messinstrumente sollten möglichst witterungsunempfindlich und verschleißresistent sein. Folgende Anforderungen für Messinstrumente sind besonders wichtig:

- Die Messgeräteabweichung für den zu messenden Wert
- Verlässlichkeit und Haltbarkeit
- Zweckmäßige Bedienung, Eichung und Wartung
- Einfache Konstruktion um die Anforderungen zu erfüllen
- Langlebigkeit
- Vertretbare Anschaffungskosten des Verbrauchsmaterials und der Ersatzteile

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

#### **3.3.2. Verbindliche Standards für meteorologische Messgeräte**

Um die Standardisierung von meteorologischen Messinstrumenten im nationalen und internationalen Umfeld sicherzustellen hat die WMO ein regionales und nationales Normierungssystem definiert. Im Allgemeinen werden regionale Normen auf regionaler Ebene und nationale Normen durch die WMO- Mitglieder erlassen. In festgelegten Intervallen sind operationelle Messinstrumente anhand von nationalen Normen zu prüfen. Im Rahmen der Routineprüfungen oder bei Inbetriebnahme sind die Messinstrumente untereinander zu vergleichen. Tragbare Kontrollmessgeräte der Prüfer sind mit den Referenzgeräten nach jedem Prüfintervall abzugleichen. Verschiedene Arten (Bauart oder Messart) von operationellen Messinstrumenten sollten miteinander verglichen werden um homogene Messreihen, räumlich und zeitlich, zu gewährleisten.

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

### 3.3.3. Einheiten, Symbolik und Konstanten von meteorologischen Messgeräten

Messungen liefern Zahlenwerte die physikalische oder meteorologische Mengen erheben um die Beschaffenheit der Atmosphäre abzubilden. In der angewandten Meteorologie werden Messwerte als Variablen angegeben. Praktisch sieht das in der Regel so aus:  $a = \{a\} [a]$ .  $\{a\}$  entspricht dem numerischen Wert und  $[a]$  der Einheit, gemäß ISO1993b und IUPAP1987.

Physikalische Größen, Formelzeichen und Einheiten für meteorologische Beobachtungen:

- Druck „p“ in Hektopascal [hPa]
- Temperatur „t“ in Grad Celcius [°C] oder in Kelvin [K]
- Windgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde [m/s], Kilometer pro Stunde [km/h], Knoten [KT]
- Windrichtung in Grad 0 bis 360° (Richtung des Windursprungs)
- Relative Feuchte „U“ in Prozent [%]

Festgelegte Konstanten:

- Absolute Temperatur des Eispunktes  $T_0 = 273,15\text{K}$  (entspricht 0°C)
- Standard Erdbeschleunigung  $g_n = 9,80665\text{m/s}^2$

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

### 3.3.4. Genauigkeit bei meteorologischen Messungen

#### 3.3.4.1. Quellen von Messfehlern

Jede Feldmessung ist fehlerbehaftet. In der Meteorologie findet jede Messung an einem anderen Ort statt. Aufgrund der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ist ein Fehlermanagement unbedingt notwendig.

Mögliche Fehlerquellen sind:

- Unterschiede bei nationalen, internationalen Standards und beim Vergleich miteinander
- Fehler beim Vergleichen von Arbeits-, Strecken- und/ oder Kontrollstandards
- Fehler bei Feldmessgeräten im Labor oder im Tauchbad im Freien. Solche Fehler sind nicht sehr groß und akzeptabel bei einer Toleranz von  $\pm 0,1\text{K}$  oder

95% Trefferquote. Bei guter Ausrüstung und geschultem, erfahrenem Personal ist die Messqualität größer.

- Schwankungen, Abweichungen und Grad der Vergleichbarkeit der Messwerte bei Feldmessungen
- Der Unterschied zwischen dem Wert „am Sensor“ und dem „wahren Wert“. Idealerweise sind die beiden Werte identisch. Bei hochwertigen Messgeräten sind die Differenzen sehr gering.
- Die Lage des Messfelds ist idealerweise repräsentativ für das betreffende Umfeld.

Systematische und Wiederholungsfehler sind immer möglich. Ihre Auswirkungen lassen sich minimieren, wenn im Betrieb sorgfältig gearbeitet wird und ein geeigneter „Messplatz“ verfügbar ist. Andernfalls summieren sich diese Fehlerquellen zu einem großen Fehler. Bei der Fehlerbetrachtung werden sie oft übersehen obwohl man, unter Laborbedingungen des Messinstruments, den vollständigen Fehler bestimmen könnte.

In der Meteorologie ist es schwierig den wahren Wert festzustellen. Wohl durchdachte Messgerätvergleiche im operationellen Betrieb sind in der Lage Messungenauigkeit aufzudecken. Wenn die Lage einer Messstation gut dokumentiert ist sind lagebedingte Fehler systematisch korrigierbar und können für andere abgeschätzt werden.

Zur Qualitätssteigerung können die Messwerte der Station mit Modellrechnungen verglichen werden, die auf umliegenden, vertrauenswürdigen Stationsdaten beruhen. Unterschiede zwischen den Modell- und Stationsdaten liegen sowohl an der Messung an sich, als auch an der Leistungsfähigkeit der Station. Ziel ist es den Fehler mit der Zeit soweit wie möglich zu reduzieren, sofern die umliegenden Stationen eine angemessene Messanalyse zulassen. In diesem Fall können der Mittlere - und der Standardfehler, zwischen der Messstation und dem Feld, ermittelt werden und als „Fehler“ in die Stationsmessung aufgenommen werden. Systematische Fehler sind auf null reduzierbar oder durch ermittelte Korrekturwerte zu beheben. Als Basis für eine klimatologische Reihe ist die möglichst kleine Abweichung des Mittelwerts abzuschätzen. Darin enthaltene statistische Fehler sind zu minimieren.

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

### 3.3.4.2. Statistische Betrachtung von Messungen

Um die Ungenauigkeit einer Messung bestimmen zu können ist ein statistischer Ansatz notwendig. Es müssen Standard Messungenauigkeit, erweiterte Messungenauigkeit, Varianz, Standardabweichung und statistischer Anteilbereich bestimmt werden.

Die Abb.4-1 zeigt eine Normalverteilung die bei n- maliger Erhebung einer Messgröße, in einem statischen System (alle anderen Variablen sind konstant), auftritt. „T“ entspricht dem durch bestmögliche Schätzung ermittelten wahren Wert. Er wird als Standard- Wert gesetzt.  $\bar{O}$  ist der

statistische Mittelwert der Normalverteilung und  $\sigma$  die Standardabweichung.

Der systematische Fehler ergibt sich aus der Differenz von „ $\bar{O} - T$ “. Er kann nicht vollständig beseitigt, sondern nur auf ein Minimum reduziert werden. Um die systematische Wirkung auszugleichen ist ein Korrekturwert anzuwenden. Systematische Fehler, die durch die Lage und/ oder durch die Umgebung bedingt sind, lassen sich lediglich reduzieren.

Zufällige Fehler entstehen durch negative und positive Abweichungen bei der Messung. Für n gegen Unendlich strebt der Fehler in der Normalverteilung gegen Null.

Messgenauigkeit ist der Grad an Übereinstimmung zwischen dem Messergebnis und des wahren Werts. Je kleiner die Differenz zwischen dem wahren und dem gemessenen Wert ist,

desto genauer ist das Messgerät. Bei Messungen ist Genauigkeit ein qualitatives Merkmal.

Die Streuung der Messwerte um den wahren Wert ist die Messunsicherheit. Sie wird durch Auswertung der systematischen Effekte ermittelt.

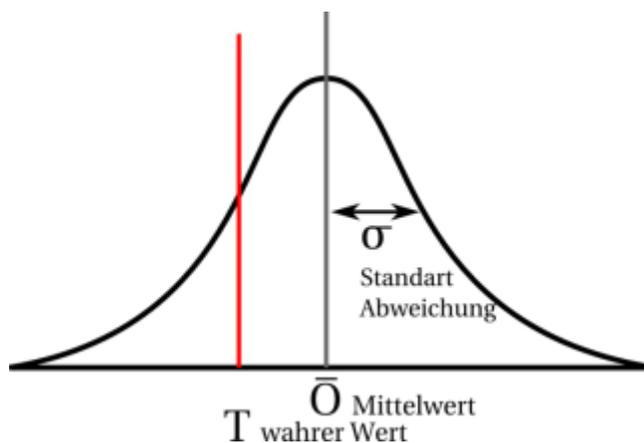


Abb. 3.3-1: Normalverteilung und statistische Größen

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

### 3.3.4.3. Schätzung des wahren Werts bei Messungen

Die Wahrscheinlichkeit, dass der betrachtete Wert dem wahren Wert entspricht wird als Vertrauensniveau bezeichnet.

Bei großem n:

Es entsteht eine gaußsche Normeilverteilung bei häufiger Messung, selbst wenn die Fehler nicht ebenso verteilt sind. In diesem Fall, oder wenn bei den Mittelwerten der Proben ebenfalls ein gaußsche Normalverteilung vorliegt, können die obere und untere Grenze des Wertebereichs wie folgt ermittelt werden:

Obere Grenze:

$$G_o = \text{Durchschnitt der korrigierten Messungen} + k (\text{Vertrauensniveau}) * \sigma (\text{Standardabweichung}) / (\text{Anzahl der Messungen})^{1/2}$$

Untere Grenze:

$$G_u = \text{Durchschnitt der korrigierten Messungen} - k (\text{Vertrauensniveau}) * \sigma (\text{Standardabweichung}) / (\text{Anzahl der Messungen})^{1/2}$$

Vertrauensniveau	90%	95%	99%
k	1,645	1,960	2,575

*Tabelle 3.3-1: Das Vertrauensniveau einer Messung*

Das in der Tabelle angegebene Vertrauensniveau stellt sicher, dass sich der wahre Wert innerhalb der Grenzen befindet. Es gilt:  $G_o \geq \text{wahrer Wert} \geq G_u$ .

Bei kleinem n:

Entsprechen die Beobachtungsfehler genau oder näherungsweise einer gaußschen Normalverteilung, folgen die Mittelwerte der Proben der studentischen „t-Verteilung“.

Unter Berücksichtigung des angestrebten Vertrauensniveaus gilt dann:

Obere Grenze:

$$G_o = \text{Durchschnitt der korrigierten Messungen} + t * \sigma^{\wedge} (\text{geschätzte Standardabweichung}) / (\text{Anzahl der Messungen})^{1/2}$$

Untere Grenze:

$$G_u = \text{Durchschnitt der korrigierten Messungen} - t * \sigma^{\wedge} (\text{geschätzte Standardabweichung}) / (\text{Anzahl der Messungen})^{1/2}$$

$\sigma^{\wedge}$  ist die geschätzte Standardabweichung der Grundgesamtheit aller Messungen.

$$\sigma^{\wedge 2} = (\sum_{i=1}^n (Xi - \text{Durchschnitt der korrigierten Messungen})^2) / (n - 1) = (n / (n - 1))$$

$$* \sigma_0^2$$

für Xi als einzelnen Wert, Oi für systematische Fehler korrigiert.

t (studentisches t) ist von dem angestrebten Vertrauensniveau und der Messungsanzahl abhängig. In der *Tabelle 3.3-2* sind einige Werte von t angegeben:

	Vertrauensniveau 90%	Vertrauensniveau 95%	Vertrauensniveau 99%
df			
1	6,314	12,706	63,657
4	2,132	2,776	4,604
8	1,860	2,306	3,355
60	1,671	2,000	2,660

*Tabelle 3.3-2: Werte für studentisches t abhängig von Vertrauensniveau und Freiheitsgrad df*

Mit df als Freiheitsgrad für den gilt,  $df = n - 1$ .

Durch das Vertrauensniveau ist sichergestellt, dass der wahre Wert sich innerhalb der Grenzen befindet. Es gilt:  $G_o \geq \text{wahrer Wert} \geq G_u$ .

Je größer der Freiheitsgrad ist desto mehr nähern sich die Werte von k an die von t an. Aus diesem Grund sollten ab einem Freiheitsgrad größer 60 k – Tabellen verwendet werden.

In der Praxis treten Systematische- und Wiederholungsfehler auf. Der beobachtete Mittelwert sollte jedes Mal durch den systematischen Fehler korrigiert werden.

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

#### 3.3.4.4. Beschreibung der Ungenauigkeit bei Messungen

Beim Auftreten von systematischen und zufälligen Effekten ist eine Reduktion oder Korrektur zu machen. Ist dies nicht möglich ist die gegebene zu schätzen. Sie beinhaltet zufällige und unvollständige Kompensation systematischer Effekte. Die „erweiterte

Unsicherheit“, mit Bezug auf das „statistische Erfassungsintervall“, ist mit Hilfe des Vertrauensniveau's 95% oder  $k = 2$  ausgedrückt.

Erweiterte Unsicherheit =  $k * \sigma = 2 * \sigma$

Daraus ergibt sich für den wahren Wert:

Wahrer Wert = gemessener Wert  $\pm$  Erweiterte Unsicherheit = gemessener Wert  $\pm 2\sigma$

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

#### 3.3.4.5. Der Präzisionsgrad von meteorologischen Messungen

Die bei einer Messung zu berücksichtigende Unsicherheit bestimmt sich durch den spezifischen Messzweck. Die Leistungsgrenzen von Messgeräten und Systemen hängen von den zeitlichen und räumlichen Skalen ab.

Jede Messung besteht aus zwei Teilen, dem Signal und dem Rauschen. Das Signal entspricht der gewünschten Information und das Rauschen dem irrelevanten Nebenprodukt. Je nach Messung kann das Rauschen mehrere Gründe haben. Letztendlich begrenzt es die Genauigkeit. Durch technische Innovation lässt sich die Messung oder die Bestimmung des Rauschens verbessern ohne das Signal zu verändern. Im Extremfall kann ein schwaches Signal so durch starkes Rauschen überlagert sein, dass die Messung unbrauchbar ist.

Aus diesen Gründen liefern die Amplituden des Signals und des Rauschens wichtige Informationen über die Grenzen des Systems. Ab einer bestimmten Signalstärke und schwachem Rauschen ist eine Verbesserung unnötig. Im gegensätzlichen Fall ist die Messung unbrauchbar oder von geringem Wert.

Diese Prinzipien sind, gemäß WMO, besonders wichtig für aerologische Messungen.

[vgl.: 2, Part1, Chapter 1 ff.]

#### 3.3.4.6. Verarbeitung der gemessenen meteorologischen Daten

In Abständen von 10s ist die Abfrage der Positionsdaten optimal. Die Abfragegeschwindigkeit sollte so schnell wie möglich sein, abhängig von der Leistungsfähigkeit des Messsystems. Eine hohe Datenfrequenz erleichtert die Qualitätskontrolle durch Verwendung von automatisierten Prüfverfahren. Danach können die Positionsdaten mit Hilfe von statistischen Methoden geglättet werden, um die Veränderung im räumlichen und zeitlichen Verlauf zu bestimmen. Je nach Methode kann eine für die Windmessung repräsentative Schichtdicke ermittelt werden. Verschiedene Nutzeranforderungen in unterschiedlichen Höhen und Einschränkungen des Messgerätes im Flug, erfordern eine Anpassung der Glättung. Sinkt die

Messgenauigkeit signifikant in großen Höhen dann sollte die vertikale Auflösung bis auf die minimale Grundanforderung reduziert werden, um die Messfehler auf einem vertretbaren Niveau zu halten.

Bei der Begutachtung der Messungen ist es wichtig etwaige Messlücken zu identifizieren. Sind diese zu groß sind spätere Interpolationen nicht repräsentativ.

[vgl.: 2, Part3, Chapter 2.4 ff.]

#### 3.3.4.7. Erforderliche und erreichbare Leistung

Die Leistungsfähigkeit einer Messanlage umfasst ihre Zuverlässigkeit, die Anschaffungskosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die räumliche Auflösung. Für die Messqualität sind Ungenauigkeit und zeitliche Auflösung wichtige Faktoren.

[vgl.: 2, Part3, Chapter 2.4 ff.]

#### 3.3.4.8. Dateneinheitlichkeit und Metadaten bei der Analyse und Verarbeitung meteorologischer Messungen

Unterbrechungen, schrittweise Änderungen oder Änderungen der Variabilität verursachen Inhomogenität in Beobachtungssystemen. Abrupte Brüche entstehen meist durch die Veränderung:

- der Instrumentierung
- der Lage
- der Berechnungsverfahren
- der Daten- Reduktionsverfahren
- der Kalibrierung

Ursächlich für schleichende Unregelmäßigkeiten ist eine Veränderung des Umfelds, wie z.B. Bebauung, langsamer Wandel der Messgerätscharakteristik durch Alterung und Verschleiß. Durch Fehlfunktionen verschiebt sich der Wertebereich der Messungen. Unregelmäßigkeiten in der Messreihe treten beim Nichteinhalten der Messtermine, mangelhafter Prüfung/ Wartung/ Kalibrierung und schlechter Bedienung auf. Im Messverbund können Unregelmäßigkeiten durch nicht kompatible Daten entstehen.

Da diese Probleme nur teilweise vermeidbar sind ist es wichtig bekannte Unregelmäßigkeiten als Metadatensatz der Messung beizufügen. Anhand einer ausführlichen Messdokumentation, mit Hilfe von statistischen Verfahren, lässt sich der Vertrauensgrad gegenüber den Messungen verbessern. Der Metadatensatz sollte so

umfassend wie möglich sein und alle Vorkommnisse während des Betriebs beinhalten.  
Es bietet sich an die Daten in einer Datenbank abzulegen.

<b>Netzwerk</b>	Netzwerktyp, Verwendungszweck
	Zuständigkeit
<b>Station</b>	Administrative Information
	Geographische Lage
	Umgebungsbeschreibung
	Messgeräteausstattung
	Anlagen, Datenübertragung, Verkabelung, Stromversorgung
	klimatologische Beschreibung
<b>Instrumente</b>	Typ, Hersteller, Model, Seriennummer, Funktionsweise
	Leistungsmerkmale
	zeitliche Kalibrierung
	Lage und Aufstellungsort: Abschattung, Höhe über Grund
	Mess- und Beobachtungsprogramm
	Beobachtungszeit
	Beobachter (Personal)
	Datenerfassung: Abtastung, Mittelung
	Datenverarbeitungs- Methoden und Algorithmen
	Vorbeugende und berichtigende Wartung
	Datenqualität

*Tabelle 3.3-3: Elemente einer Metadatenbank*

[vgl.: 2, Part3, Chapter 1 ff.]

## **3.4. Messmethoden und Vorgaben der WMO zur Durchführung von aerologischen Messungen**

### **3.4.1. Notwendigkeit und Verwendung von aerologischen Messungen**

Global werden aerologische\* Messungen zur Darstellung von großräumigen und planetaren meteorologischen Erscheinungen und Prozessen genutzt. Regional wird eine höhere räumliche Auflösung verwendet um kleinräumige Phänomene und Prozesse besser erfassen zu können. Die nationalen Wetterdienste sind, als staatliche Behörden, für den Betrieb der erforderlichen Mess – und Beobachtungssysteme verantwortlich. Bei der numerischen Wettervorhersage werden aerologische Messungen zur Bestimmung des Grundzustandes der Atmosphäre benötigt. Im Katastrophenschutz ist der Wind ein wichtiger Parameter. Wobei die anderen Messwerte ebenso bedeutsam für die öffentliche Sicherheit sind.

[vgl.: 1, Part 3, 2 ff.]

### **3.4.2. Maschenweite des aerologischen Messnetzes**

Die Maschenweite des aerologischen Messnetzes (Druck, Temperatur, Feuchte, und Wind) sollte nicht die Ausdehnung des kleinsten Anwendungsgebiets überschreiten. Generell ist ein Intervall von 250km oder 1000km, in dünn besiedelten Gegenden, zu wählen.

[vgl.: 1, Part 3, 2.4 ff.]

### **3.4.3. Zu messende Größen bei aerologischen Messungen**

Eine aerologische Messung sollte mindestens einen der folgenden Größen enthalten:

- Luftdruck
- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Windrichtung und – Geschwindigkeit

[vgl.: 1, Part 3, 2.4 ff.]

---

\* Aerologie setzt sich aus dem griechischen Aer = Luft und Logos = Lehre zusammen. Die Aerologie ist ein Teilgebiet der Meteorologie indem die höheren Luftschichten der Erdatmosphäre betrachtet werden.

#### 3.4.4. Häufigkeit und Termin der Messungen

International festgelegte Haupttermine für meteorologischen Messungen sind; 00.00 UTC, 06.00 UTC, 12.00 UTC und 18.00 UTC.

Aerologische Messungen sollten mindestens zweimal am Tag um 00.00 UTC und 12.00 UTC durchgeführt und übertragen werden. An Seewetterstation sollten zusätzlich zu den o.g. Terminen Radiosondenaufstiege und / oder Radio- Windmessungen, um 06.00 UTC und 18.00 UTC, stattfinden.

Der tatsächliche Messzeitpunkt sollte möglichst eine halbe Stunde vor dem zugehörigen Termin erfolgen. Ein Puffer von 15min zum Termin ist einzuhalten.

In Gebieten in denen die o.g. Vorgaben nicht erfüllbar sind, sollten wenigsten zweimal pro Tag, um 00.00 UTC und 12.00 UTC, Messungen durch Regionally Basic Synoptic Network (RBSN) und andere Stations - Netzwerke stattfinden. Ist eine zweimalige aerologische Messung an der Station nicht möglich, sollte wenigstens ein vollständiger Radiosondenaufstieg und eine Radio- wind Messung stattfinden.

[vgl.: 2]

#### 3.4.5. Messung der Temperatur

Die Temperatur wird in Grad Celsius „°C“ gemessen. Sie ist ein wichtiger Parameter für die numerische Wettervorhersage. Vertikale Temperaturprofile werden hauptsächlich aus Radiosondenaufstiegen erstellt. Vergleichbare Messungen werden von Luftfahrzeugen, während des Steig- oder Sinkflugs, durchgeführt. Vor allem über den Ozeanen sind Luftfahrzeugmessungen eine wertvolle Ergänzung, da das Radiosondenmessnetz hier sehr weitmaschig ist. Im Gegensatz zu diesen „in situ“ Messungen gibt es noch Fernerkundungsverfahren wie Satellitenmessungen. Leider ist hier die vertikale Auflösung geringer. Der Vorteil einer orbitalen Messung ist die gleichmäßige Abdeckung. Sie schließt Datenlücken in messwertarmen Gebieten. Vertikale Temperaturprofile sind sehr wichtig für die regionale - und punktuelle numerische Wettervorhersage sowie für Untersuchungen zur Umweltverschmutzung in den unteren atmosphärischen Schichten. Hochauflösende Vertikalprofile werden zur Vorhersage der atmosphärischen Brechung und Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung oder akustischen Wellen benötigt.

In der Luftfahrt, Artillerie oder anderer ballistischer Anwendungen ist die Luftdichte eine wichtige Kennzahl. Sie wird ebenfalls aus den atmosphärischen Sondierungen berechnet. Radiosonden sind in der Lage den Druck zwischen 1050 und 5 hPa, die Temperatur zwischen 50 und -90°C und die relative Luftfeuchte in Einer Schritten bis

100% zu messen. Der Standardfehler bei der Temperaturmessung beträgt 0,1 bis 0,5K. In der Stratosphäre, bei niedriger werdendem Umgebungsdruck, steigt die Fehlerquote sehr schnell an.

[vgl.: 2, Part 1, Chapter 12 ff.]

### 3.4.6. Messung des Höhenwinds

#### 3.4.6.1. Einheiten der Windmessungen

Die Windgeschwindigkeit wird in der Regel in Meter pro Sekunde oder in Knoten angegeben. Kilometer pro Stunde werden ebenfalls verwendet. Die Angabe des Ursprungsrichtung des Winds erfolgt in Grad (Nord = 360°, Süd = 180°), ausgehend von Norden. Bei Radiosondenmessungen wird die Windrichtung auf 5° gerundet. Als Höhenangabe werden „geopotentielle Meter“, mit der Bezugsfläche MSL, verwendet.

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 13 ff.]

#### 3.4.6.2. Meteorologische Verwendung der Windmessungen

Für die Wettervorhersage sind die Höhenwindmessungen, in jedem Maßstab und jeder geografischen Breite, sehr bedeutsam und zur Sicherstellung der Luftsicherheit unverzichtbar. Durch Kenntnis der Windverhältnisse sind Flugvorhaben ökonomisch besser planbar. Militärische Vorhaben, wie z.B. Artilleriebeschuss, sind ohne präzise Windmessungen nicht sicher. Dasselbe gilt für die Raumfahrt. Innerhalb der planetaren Grenzschicht sind Höhenwind – und Windschermessungen essentiell für die Ausbreitungsanalyse von Umweltbelastungen.

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 13 ff.]

#### 3.4.6.3. Anforderungen an die Genauigkeit bei aerologischen Windmessungen

Wert	Wertebereich	Genauigkeitsanforderung
Windrichtung	Boden bis 100hPa	5° bei < 15m/s 2,5° bei ≥ 15 m/s
	ab 100 bis 10hPa	5°
Windgeschwindigkeit	Boden bis 100hPa	1 m/s
	ab 100 bis 10hPa	2 m/s

*Tabelle 3.4-1: Wertebereich und Genauigkeitsanforderungen an Windmessungen für die jeweilige Höhe(in hPa)*

Die meisten Windmessgeräte erzeugen einen Standardfehler ( $2\sigma$ ) von  $\geq 3\text{m/s}$  in der unteren Troposphäre, 5- 6 m/s in der oberen Troposphäre und Stratosphäre [vgl.:39].

Anemometer sollten in der Lage sein Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 100 m/s messen zu können. Da im unteren Niveau geringere Windgeschwindigkeiten auftreten können Geräte mit niedrigeren Spitzenleistungen eingesetzt werden.

Die vertikale Auflösung einer aerologischen Windmessung beträgt 300 bis 400m in der Troposphäre und 600 bis 800m in der Stratosphäre. Innerhalb der Planetaren Grenzschicht ist eine höhere vertikale Auflösung von 50 bis 150m manchmal sinnvoll, um allgemeine meteorologische Vorgänge zu erfassen.

Für mesoskalige, atmosphärische Bewegungen gelten die strengsten Messvorgaben zur Höhenwindmessung. Gebietsgebundene Vorhaben, z.B. Raketenstarts, bei denen Zeitvorgaben eine wichtige Rolle spielen, erfordern ebenfalls präzise Winddaten. Die Messungen sollten möglichst zeit- und ortsnah vorliegen.

[vgl.: 2, Part 1, Chapter 12 Annex 12.A]

#### 3.4.6.4. Vertikaler Messbereich und Messdichte von aerologischen Windmessungen

Ein ideales Höhenwindmessnetz kann alle Bewegungsmaßstäbe, planetarisch bis meso, erfassen, sowohl in der Troposphäre als auch in der unteren Stratosphäre. Es kann auch kleinräumige Windfelder, mit Hilfe zeitlich hochaufgelösten Fernerkundungsverfahren, entdecken. In der mittleren und oberen Stratosphäre sind die „größeren“ Maßstäbe von Bedeutung. Ein nationales Messnetz, dessen Schwerpunkt die Erfassung der troposphärischen Vorgänge ist, benötigt Messungen bis 25km Höhe.

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 13 ff.]

#### 3.4.6.5. Methoden zur Messung des Höhenwinds

Höhenwindmessungen werden regelmäßig, mit Hilfe von Radiosondenaufstiegen, durchgeführt. Pilotballone und Radiowind- Beobachtungen werden, bei Bedarf, für zusätzliche Messungen eingesetzt. Die Routinemessungen werden, über den Kontinenten, durch Wind Profiler, Wetter- Doppler – Radare und Flugzeugmessungen ergänzt. Über den Ozeanen werden hauptsächlich Windmessungen durch Verkehrsflugzeuge auf den Luftverkehrsstraßen durchgeführt. Zusätzlich finden Radiosondeaufstiege an Bord von Schiffen, Bohrinseln und Satellitenmessungen statt. Zur Windmessung werden zwei Radiosondentechniken eingesetzt. Mittels eines Ballonaufstiegs, mit gleichmäßiger Steigrate, oder durch eine Dropsonde, die an einem

Fallschirm zu Boden schwebt, können Windrichtung und - Geschwindigkeit ermittelt werden.

Fernerkundungsverfahren bestimmen die Bewegung der Atmosphäre, indem Sie die Streuung von elektromagnetischer Strahlung oder akustischen Signalen an bestimmten Zielen messen. Geeignet sind Niederschläge, Staub, Aerosole oder Unregelmäßigkeiten innerhalb der Atmosphäre, die durch kleinräumige Turbulenz erzeugt werden.

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 13 ff.]

### **3.4.7. Das Global Positioning System**

Das Global Positioning System (GPS ) ist ein globales Navigationssatellitensystem das derzeit aus 24 operationellen Satelliten besteht. Jeder Satellit umrundet die Erde zwei mal pro Tag. An jedem Punkt der Erde sind immer mindestens 4 Satelliten oberhalb des Horizonts sichtbar. Betrieben wird es von dem US – Verteidigungsministerium. Aktuell gibt es zwei Dienstklassen. Der „Standard Positioning Service“ ist für Jedermann verfügbar. Unter Idealbedingungen ist eine Positionsbestimmung auf 7,8m (in 95% der Messungen) genau möglich. Der „PrecisePositioning Service“ ist der militärischen Nutzung vorbehalten und bietet eine präzisere Verortung. Beide Klassen beinhalten eine präzise Zeitangabe in UTC, die auf Atomuhren basiert. Mit Hilfe von GPS lassen sich folglich vier Dimensionen bestimmen. Die Position im Dreidimensionalen Raum und die Zeit.

[vgl.: 10]

## **3.5. Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR)**

### **3.5.1. Funktionsweise von AMDAR an Bord eines Flugzeuges**

AMDAR steht für „Aircraft Meteorological Data Relay“. Es nutzt die an Bord eines Flugzeuges befindlichen meteorologischen Sensoren. Die Messung und Übertragung der Daten erfolgt vollautomatisch. Meteorologische Standards und Vorgaben sind durch die WMO festgelegt. Die AMDAR - Software ist in der beteiligten Bordelektronik implementiert, um die Datenerfassung und die Qualitätskontrolle zu erleichtern. Die Messwerte werden in einem der Meldungsformate: „AEEC“, „ARINC“ oder „620“, übertragen und in nahezu Echtzeit an den „National Hydrological and Hydrometeorological Service“ (NMHS) gesendet.

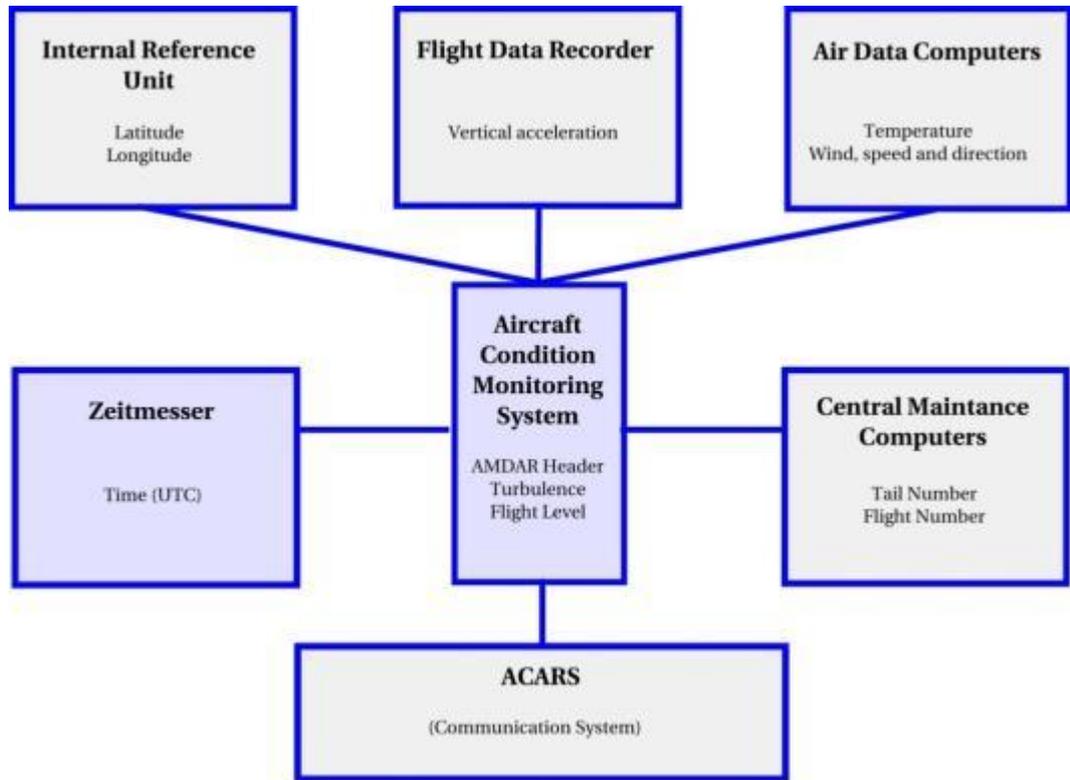


Abb. 3.5-1: Architektur des AMDAR innerhalb der LFZ Systemumgebung

[vgl.: 4; 3]

### 3.5.2. Generierte meteorologische Aussagen und Messfrequenz des AMDAR

Das AMDAR - System liefert folgende Daten:

- Eine Daten- Frequenz von 5- 10 min während des Flugs (enroute)
- Hochauflösende Vertikalprofile der Temperatur, Windrichtung - und Geschwindigkeit (Messung alle 100m bis FL100)
- Messung der Turbulenz:
- DerivedEquivalentVertical Gust (DEVG) >> Messwert für Turbulenz
- Eddy Dissipation Rate (DER) >> Messwert für Turbulenz zur Verarbeitung in der Modellrechnung
- Exakte Bestimmung der Position (latitude, longitude), der Höhe (pressurealtitude) und des Messtermins (dd:hh:mm)
- Optional werden, je nach Ausrüstung Standard des Flugzeuges, zusätzlich Wasserdampfgehalt der Luft oder die relative Luftfeuchte gemessen

Allgemein ergänzende Daten wie: Zeitstempel (UTC), Flugzeugkennzeichen und Flugnummer werden durch andere Systeme des LFZ bereitgestellt.

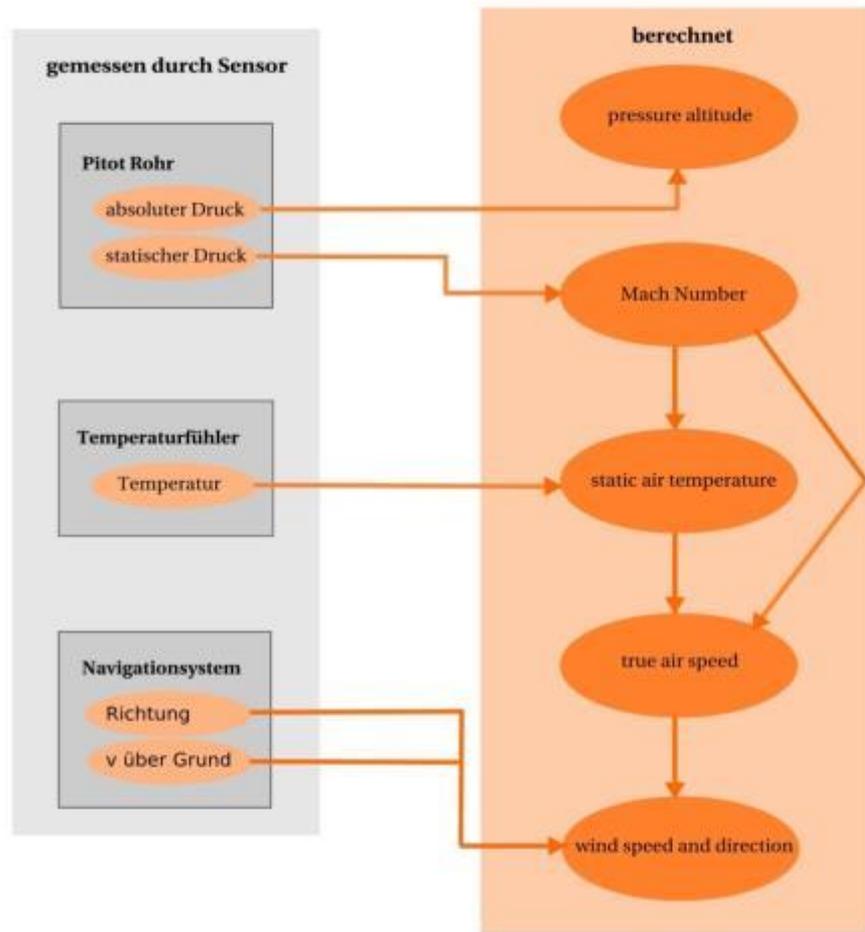


Abb. 3.5-2: Datenfluß, gemessene und berechnete meteorologische Größen im LFZ

[vgl.: 2, Part 2 Chapter3]

### 3.5.3. Gemessene und ermittelte meteorologische Größen des AMDAR – Systems an Bord von Flugzeugen

#### 3.5.3.1. Druckhöhe in Fuß:

Die Druckhöhe wird im „Air Data Computer“ (ADC) des Flugzeuges anhand der ICAO – Standardatmosphäre errechnet. Auf Meeresniveau sind 1013,25hPa als Druck und 15°C als Temperatur festgelegt. Die Temperatur nimmt bis in 11km Höhe mit 0,65°C pro 100m ab. Darüber hinaus wird von einer fixen Temperatur von -56,5°C ausgegangen. Für die Berechnung der Druckhöhe (PALT) gilt:

$$P \text{ (hPa)} = 1013,25 * (1 - 10^{-6} * 6,8756 *(PALT))^{5,2559}$$

Messfehler:

Fehler in der Messung können entstehen durch Eichungsfehler, kurzzeitige sich wiederholende Instrumentenfehler, Eichungsabweichung und Messfehler – oder ein verrauschtes Signal. Da Sicherheitsabstände in der Luftfahrt von entscheidender Bedeutung sind, werden diese Fehler so gut wie möglich in der ADC korrigiert. Ungenaue Druckangaben werden anhand von „belegten“ Höhen ermittelt. Die restlichen Messfehler werden während der Flugerprobung festgestellt und beseitigt. [vgl.: 2, Part 2, Chapter 3 ff.]

### 3.5.3.2. Mach Zahl:

Die Machzahl gibt das Verhältnis der Körpergeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit des Mediums, in dem sich der Körper bewegt, an. Für Bewegungen in Gasen gilt:

$$\text{Mach Zahl} = v_{\text{Körper}} / \sqrt{K * R_s * T}$$

$K$  → Adiabatenexponent in trockener Luft bei Normalbedingungen =>

$$k = 1,402$$

$R_s$  → spezifische Gaskonstante der Luft =>  $R_s = 287,058 \text{ J}/(\text{Kg} * \text{K})$

$T$  → Temperatur der Luft

In AMDAR – Systemen wird sie zur Korrektur der Lufttemperatur- und Luftgeschwindigkeitsmessungen verwendet. Da LFZ – Messgeräte die statische Außentemperatur nicht direkt messen wird die Mach Zahl nach folgender Formel berechnet:

$$M^2 = \frac{2}{\gamma - 1} * \left[ \left( \frac{P_s}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$P_0$  → statischer Druck

$P_s$  → Gesamtdruck

$\gamma$  → spezifische Wärme trockener Luft

Anhand der Formel ist ersichtlich, dass die Genauigkeit der Mach Zahl von der Druckmessung abhängig ist. Die an der Staudrucksonde (Pitotrohr) des LFZ gemessenen Werte ergeben, unter Normalbedingungen, eine Genauigkeit der Mach Zahl von 0,2%.

Nach Umformung des o.g Terms lässt sich aus der Machzahl die Außentemperatur berechnen. Es gilt:

$$M_a = \frac{v}{\sqrt{k R_s T}} \quad (\text{dimensionslos})$$

$$R_s \text{ (spezifische Gaskonstante trockener Luft)} = 287,05 \frac{J}{kg \cdot K} \quad [\text{vgl.:5}]$$

$v$  → Strömungsgeschwindigkeit ( $v_{\text{Körper}}$ )

$M_a$  → Machzahl

Umformen der Gleichung nach der Temperatur und einsetzen der Konstanten:

$$T = \frac{v^2}{M^2} * \frac{1}{1,4 * 287,05}$$

$$T = \frac{v^2}{M^2} * 0,002488 \frac{kg * K * s^2}{kg * m^2}$$

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 3 ff.]

### 3.5.3.3. Lufttemperatur:

Die statische Lufttemperatur wird an der Außenhülle des LFZ gemessen. Sie fließt in die Berechnung der wahren Luftgeschwindigkeit und anderer meteorologischer Werte ein. Der Air Data Computer des LFZ korrigiert die gemessene statische Lufttemperatur anhand der Mach Zahl.

Bei Mach 0,8 beträgt die Ungenauigkeit 0,4°C. Sie reduziert sich bei niedrigeren Geschwindigkeiten auf 0,3°C. Beim Flug innerhalb von Wolken kühlt sich der Messfühler, aufgrund der Kondensationskälte, um bis zu 3°C ab. Während langsamen Flugphasen kann der geringe Luftstrom im Messgerät zu Ungenauigkeiten führen.

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 3 ff.]

### 3.5.3.4. Windrichtung und - Geschwindigkeit:

Bei einem LFZ ist die Bestimmung des 3-dimensionalen Windvektors kompliziert. Mit Hilfe der Daten aus dem Navigationssystem, dem Geschwindigkeitsmesser (Staudruck im Pitotrohr) und der Außentemperatur sowie dem magnetischen Heading (der Ausrichtung des LFZ / wahrer Steuerkurs) lassen sich genaue Angaben zur wahren Fluggeschwindigkeit („True Air Speed“) und der Geschwindigkeit über Grund (True Track) machen. Die Richtung der „True Air Speed“ ist stets entgegengesetzt zum wahren Steuerkurs.

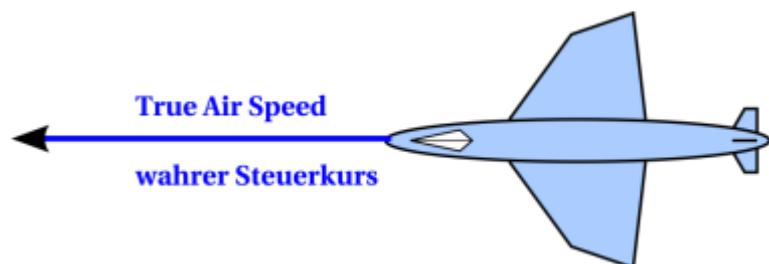


Abb. 3.5-3: wahrer Steuerkurs und wahre Fluggeschwindigkeit im Flug

$V_{\text{Luft}}$  ist die wahre Fluggeschwindigkeit (True Air Speed):

$$V_{\text{Luft}} = a_0 \sqrt{\frac{5T}{T_0} \left[ \left( \frac{q_c}{P} + 1 \right)^{\frac{2}{7}} - 1 \right]}$$

$a_0$  → Schallgeschwindigkeit = 340,29m/s oder 661,47 kt

$T$  → statische Lufttemperatur in Kelvin =  $\frac{T_t}{1+0,2M^2}$

$T_t$  → absolute Lufttemperatur

$M$  → Machzahl

$T_0$  → Temperatur auf MSL in Kelvin = 288,15K

$Q_c$  → Staudruck

$P$  → statischer Druck

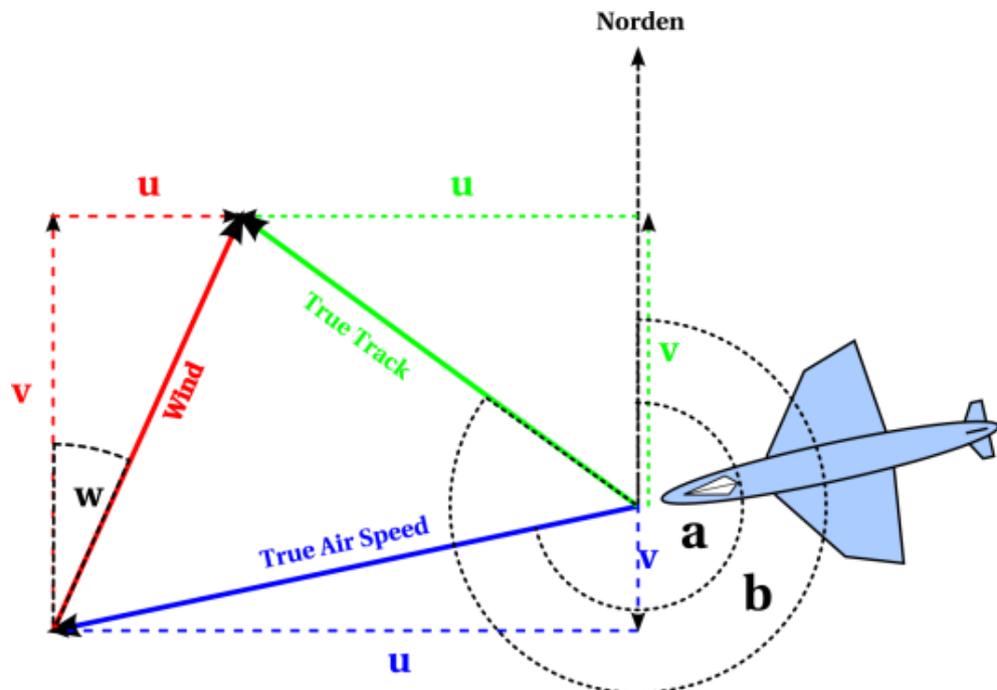


Abb. 3.5-4: Zusammenhang zwischen Windvektor, True Track und True Air Speed

Abb. 3.5-4 zeigt die Bewegung des LFZ über Grund (True Track) und die Ausrichtung des Flugzeugs aus anschaulichen Gründen mit stark voneinander abweichenden Richtungen. Dies kann in der Realität nur dann vorkommen wenn ein Seitenwind in der Größenordnung der Flugzeuggeschwindigkeit auftritt.

$V_{\text{Air}} = \text{True Air Speed};$

$V_{\text{TT}} = \text{True Track}$

$u, v$  als Vektorkomponenten;

$a, b, w$  als Winkel relativ zu Nord

Es gilt:

$$u_{\text{Wind}} = V_{\text{TT}} \sin b - |V_{\text{Air}}| \sin a;$$

$$v_{\text{Wind}} = V_{\text{TT}} \cos b - |V_{\text{Air}}| \cos a$$

$$\text{Windgeschwindigkeit } V_{\text{Wind}} = [(u_{\text{Wind}})^2 + (v_{\text{Wind}})^2]^{1/2}$$

$$\text{Windrichtung } w_1 = \text{atan2}(v_{\text{Wind}}, u_{\text{Wind}})$$

$V_{\text{Grund}}$  kann aus den GPS Daten oder den Radardaten ermittelt werden. Bei AMDAR wird es aus der IRU des LFZ ausgelesen. Die IRU errechnet die  $V_{\text{Grund}}$  aus der Positionsänderung (Navigationssystem) im Zeitverlauf.

[vgl.: 2, Part 2, Chapter 3 ff.]

#### 3.5.3.5. Messfehler bei der LFZ – Messung mit AMDAR:

Die wahre Fluggeschwindigkeit wird aus der Mach Zahl und der statischen Außentemperatur berechnet. Temperaturfehler sind im Vergleich zu Mach Zahl- Fehlern nicht so folgenschwer. Ein Mach Zahl- Fehler von 0,5% führt zu einem Fluggeschwindigkeitsfehler von 1,2 m/s. Die Fehlerquote des Navigationssystems ist nahe Null. Somit kann es zu einem Windfehler von bis zu 1,2 m/s kommen. Instabile Fluglagen, z.B. Rollen oder Nicken in Turbulenzonen, erzeugen ebenfalls Fehler bei der Windmessung. Diese Fehler sind proportional zur Fluggeschwindigkeit.

[vgl.: 3, S3]

#### 3.5.4. Qualität der gemessenen Daten die mit AMDAR verarbeitet werden

Die Datenqualität entspricht den WMO Vorgaben für aerologische Messungen. Die Toleranzen sind:

- Temperatur +/- 1°C
- Pressure Altitude +/- 4hPa
- Windgeschwindigkeit +/- 2 bis 3 m/s

Datenqualität der Druckhöhenmessung im LFZ:

Der LFZ- Höhenmesser ist nach ICAO- Standardatmosphäre geeicht. Am Sensor (Pitotrohr) wird der statische Druck gemessen. Er ist die Basis für druckabhängige Folgegrößen. Mögliche Fehlerquellen sind Eichungsfehlern, Instrumentenfehler und Fehler bedingt durch externe Einflüsse. AMDAR liefert eine Höhenangabe in 100ft Schritten, mit einer Unterteilung in 1,5hPa. Bei der Ableitung des statischen Drucks aus der Druckhöhe in Reiseflughöhe, beträgt die Ungenauigkeit 2hPa. In Bodennähe liegt sie bei 4 hPa.

Messung	Messbereich	Toleranz
Druck	Boden bis 100hPa	1hPa bis 2hPa (um 100hPa)
	100 bis 10hPa	2%

Temperatur	Boden bis 100hPa	0,5K
	100 bis 10hPa	1K
Windrichtung	Boden bis 100hPa	5°, bei weniger als 15m/s
		2,5° bei größer gleich 15m/s
	100 bis 10hPa	5°
Windgeschwindigkeit	Boden bis 100hPa	1m/s
	100 bis 10hPa	2m/s
Relative Feuchte	Troposphäre	5%
geopotentielle Höhe der betrachteten Fläche	Boden bis 100hPa	In Bodennähe 1% bis 100hPa abnehmend auf 0,5%

*Tabella 3.5-1: festgelegte Toleranzen bei aerologischen Messungen*

[vgl.: 2, ANNEX 12 A, S282]

### 3.5.5. European Aircraft Meteorological Data Display (E-AMDAR)

In Europa werden durch Linienflugzeuge täglich mehr als 30.000 meteorologische Meldungen, von 650 Luftfahrzeugen, an 14 beteiligte Wetterdienste per Datenfunk übertragen. Eine Meldung enthält: Luftfahrzeugkennung, Zeitstempel, Position, Lufttemperatur, Windrichtung und -Geschwindigkeit. Im Schnitt dauert es 15min bis die Meldung in der jeweiligen Datenbank des Wetterdienstes verfügbar ist. Gemessen wird bis in eine Höhe von 12km. Während der ersten 20min des Flugs wird in den ersten 150s in einem 10s Intervall und danach in einem 50s Intervall gemessen. Im Flug, bis während der Landephase 5500m durchschritten werden, findet alle 7min eine Messung statt. Unterhalb von 5500m, im Landeanflug, wird im 40s Rhythmus gemessen. Die Messungen werden in der numerischen Wettervorhersage, zur lokalen Wettervorhersage, Wetterwarnungen in den Regionalzentralen und in der Flugwetterberatung an den Luftfahrtberatungszentralen verwendet.

[vgl.: 11]

### 3.5.6. Zukünftiges Nachfolgesystem für AMDAR

Im Kapitel Beobachtungssysteme des „Leitfaden für meteorologische Methoden und Beobachtung“ der WMO ist eine Variante des AMDAR - Systems als zukünftiges Verfahren aufgeführt. Die Weiterentwicklung der globalen Systeme zur „Luftnavigation“ ist eng an die Entwicklung der Systeme zur Datenübertragung

gebunden. Das globale Luftfahrzeug – Kommunikationssystem wird sich in ein offenes Netzwerk, unter dem Dach des „Aeronautical Telecommunication Network“, wandeln. Automatische, meteorologische Meldungen und Berichte von Luftfahrzeugen sind dann über die o.g. Infrastruktur realisierbar. Der Datengehalt und die Qualität wären grundsätzlich äquivalent zu AMDAR- Daten.

Die enorme Datenmenge, - Frequenz und räumliche Abdeckung dieses Messsystems mündet in einer verbesserten Flugwetterberatung. Somit wird die Flugsicherheit erhöht, der Treibstoffverbrauch pro Flugvorhaben gesenkt, die Materialermüdung reduziert und der Passagierkomfort gesteigert.

[vgl.: 2, Part 2, 3.9.1]

### **3.6. Meteorologische Messungen an Luftfahrzeugen**

Jedes WMO- Mitglied ist dazu angehalten Luftfahrzeugmessungen auf internationalen Flugrouten zu organisieren, aufzuzeichnen und zu melden. Mitglieder die sich bereit erklären Luftfahrzeugmessungen für synoptische Zwecke zu sammeln sollen diese, in vereinbarten Schlüsseln, anderen Mitgliedern zur Verfügung stellen. Die Messungen sind möglichst durch ein automatisches „Luftfahrzeug – meteorologisches – Beobachtungs – Übermittlungs – System“ zu erstellen. Es gelten die Mindestanforderungen für die internationale Luftnavigation (ICAO).

[vgl.: 1, Part 3, 2.5 ff.]

#### **3.6.1. Regeln für die Messungen**

Während des Streckenflugs und der Start sowie Landephase sollten laufende Messungen durchgeführt werden. Außerplanmäßige Messungen sind in jeder Flugphase möglich. Festgelegte meteorologische Luftverkehrsmeldungspunkte (ATS/MET) sind zu beachten.

Bei automatischer Messung und Verbreitung sollte im Streckenflug alle 15 Minuten und alle 30 Sekunden während der ersten 10 Minuten des Flugs gemessen werden. Bei der mündlichen Übertragung regelmäßiger Messungen, während des Streckenflugs, sind Luftverkehrs- Meldepunkte (Punkte bei denen die zutreffenden Luftverkehrsverfahren regelmäßige Positionsmeldungen erfordern) oder Intervalle (Entfernungen die möglichst einem Intervall von einer Flugstunde entsprechen) einzuhalten. Luftsicherheitsgefährdende meteorologische Ereignisse die während der Start und Landephase beobachtet werden sind, auch außerhalb der regulären Berichte, zu melden.

Dasselbe gilt für fluggefährdende Ereignisse die entgegen der gültigen Wettervorhersage auftreten.

Auf Anfrage des flugbetreuenden meteorologischen Dienstes, nach einzelnen Daten, oder bei einer Vereinbarung zwischen einer meteorologischen Behörde und einem Betreiber sind PIREP's durchzuführen.

[vgl.: 1, Part 3, 2.5 ff.]

### 3.6.2. **Zu meldende Messgrößen und Beobachtungen bei LFZ - Messungen**

Jedes Messprotokoll sollte die Lufttemperatur, Windrichtung und - Geschwindigkeit, Turbulenz, Vereisung, Position, Messtermin und, wenn vorhanden die relative Luftfeuchte enthalten. Bei der Sichtung von vulkanischen Aktivitäten sind diese dem Protokoll beizufügen. Sonderberichte sollen erstellt werden wenn eines der folgenden Ereignisse auftritt: schwere Turbulenz, schwere Vereisung, schwere Leewellen, Gewitter (dunkle Erscheinung in Wolken, eingebettet, verteilt oder in Gewitterlinien organisiert), starker Sand- oder Staubsturm, Wolke aus Vulkanasche, vulkanisches Vorbeben oder Eruption. Zusätzlich sind bei Flügen mit Schall- oder Überschallgeschwindigkeit mäßige Turbulenz, Hagel und Kumulonimbuswolken zu melden.

[vgl.: 1, Part 3, 2.5 ff.]

### 3.6.3. **Pilot Weather Reports (PIREP)**

PIREP's sind Wetterbeobachtungen die im Flug durch den Piloten gemacht und an die Flugverkehrskontrolle übermittelt werden. Jeder Vertragsstaat ist angehalten Luftfahrzeugbeobachtungen auf internationalen Routen zu veranlassen. Bei Start, Landung und im Streckenflug sind Routinebeobachtungen und außerplanmäßige Beobachtungen während aller Flugphasen durchzuführen. LFZ die über „air – grounddata link“ angebunden sind und Automatic Dependent Surveillance (ADS) oder Secondary Surveillance Radar (SSR) nutzen sollten während des Streckenflugs alle 15min und in den ersten 10min der Steigphase alle 10s beobachten und melden. Routine - Helikopter Beobachtungen sollen nach der Absprache mit dem zuständigen meteorologischen Dienst durchgeführt werden. Flugsicherheitsgefährdende Wettererscheinungen sollen im Rahmen von Sonderbeobachtungen umgehend gemeldet werden.

Die Beobachtungen werden per „air – ground data link“ an die zuständige Flugverkehrskontrolle übermittelt. Verfügt das Luftfahrzeug nicht über einen „air – grounddata link“, so ist es von der Routinebeobachtung freigestellt. Sonderbeobachtungen sind dann per Sprachfunk zu senden. Die Beobachtung ist im Format des „air - report“ zu übermitteln. Die Meldungen sind nach Möglichkeit unverzüglich an den zuständigen meteorologischen Dienst und das „World Area Forecast Centre“ zu senden.

[vgl.: 6]

	<b>Report - Komponente</b>	<b>Codierung</b>	<b>Inhalt</b>
1	3 –Ziffern Stations ID	xxx	Nächst gelegener Wetter-Melde-Punkt
2	Klassifizierung des Berichtes	UA od. UUA	Routine- oder Sonderbeobachtung
3	Ort der Beobachtung	/OV	Funkfeuerbezogen
4	Zeit der Beobachtung in UTC	/TM	Beobachtungszeitpunkt
5	Höhe	/FL	Höhe in FLxxx (wichtig für Icing - Reports)
6	Luftfahrzeugtyp	/TP	Luftfahrzeugsart (wichtig für Icing - Reports)
7	Bedeckungsgrad	/SK	Wolkenhöhe und Bedeckungsgrad
8	gegenwärtiges Wetter	/WX	Niederschlag, Sicht,....
9	Temperatur	/TA	Außentemperatur in °C
10	Wind	/WV	Richtung in Grad zum mag. Nordpol, Geschwindigkeit in Knoten
11	Turbulenz	/TB	Intensität der Turbulenz
12	Vereisung	/IC	Intensität der Vereisung
13	Bemerkungen	/RM	Für weitere Ausführungen

*Tabelle 3.6-1: Bestandteile und Codierung einer PIREP – Wettermeldung [vgl.: 7]*

### 3.6.4. Windmessung anhand von Mode S - Daten

Die Messung des Winds mit Hilfe von Mode S Daten funktioniert nahezu analog zum AMDAR – Messprinzip. Der einzige Unterschied ist die Bestimmung der Geschwindigkeit über Grund. Diese wird aus den Radardaten ermittelt. Die systembedingten Fehler von AMDAR gelten ebenfalls für Mode S. Die Ermittlung der

Geschwindigkeit über Grund ist ebenso präzise wie der Output des IRU des LFZ. Die wahre Luftgeschwindigkeit sowie die Flughöhe und die Kennung des LFZ sind in der Mode S Meldung enthalten.

### **3.7. Anforderungen an meteorologische Messungen und Messgeräte**

Bei einem dauerhaft messenden, globalen, meteorologischen Messnetz ist es essentiell wichtig idealerweise identische Messgeräte zu verwenden.

<b>Variable</b>	<b>Temperatur</b>	<b>Atmosphärischer Druck</b>	<b>Windgeschwindigkeit</b>	<b>Windrichtung</b>
<b>Wertebereich</b>	-80 - +60°C	500 – 1080 hPa	0-75 m/s	0 -360°
<b>Auflösung</b>	0,1K	0,1 hPa	0,5 m/s	1°
<b>Messmethode</b>	Instrument	Instrument	Mittelung	Mittelung
<b>Toleranz</b>	0,3 K für ≤ -40°C 0,1K für > -40°C und ≤ +40°C 0,3 K > +40°C	0,1 hPa	0,5m/s für ≤ 5 m/s 10% für > 5m/s	5°
<b>Verzögerungszeit</b>	20s	20s	konstante Entfernung 2 – 5m	1s
<b>Messdauer</b>	1min	1min	2 und/ oder 10 min	2 und/ oder 10 min
<b>Erreichbare Toleranz</b>	0,2 K	0,3 hPa	0,5 m/s für ≤ 5 m/s 10% für > 5m/s	5°

*Tabelle 3.7-1: Anforderungen an operationelle meteorologische Messgeräte des synoptischen Messnetzes*

[vgl.: 2 Chapter 1 General ANNEX1.B]

## 4. Luftbewegungen in der freien Atmosphäre

### 4.1. Der Wind als Vektor

Dreidimensionale vektorielle Darstellung des Winds:

$$\vec{V} = u\vec{x}_1 + v\vec{y}_1 + w\vec{z}_1$$

$\vec{V}$  → Windvektor;  $\vec{V}_H$  → zweidimensionaler Windvektor (Z und X - Richtung)

$u\vec{x}_1$  → u Komponente des Vektors in X - Richtung

$v\vec{y}_1$  → v Komponente des Vektors in Y - Richtung

$w\vec{z}_1$  → w Komponente des Vektors in Z - Richtung

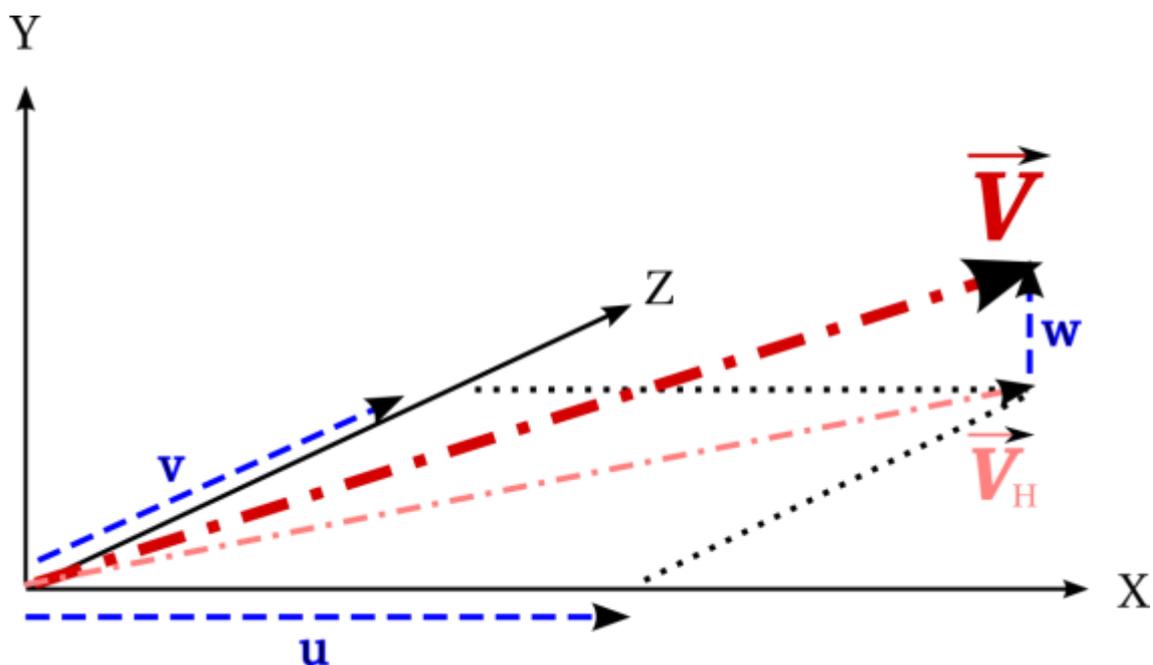


Abb. 4.1-1: Der Windvektor und seine Komponenten im 3-dimensionalen Koordinatensystem

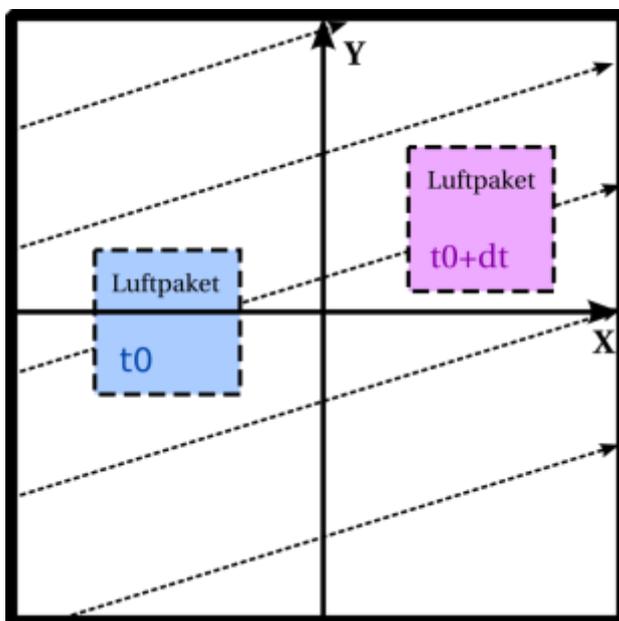
In der praktischen Meteorologie unterscheidet man zwischen der horizontalen und der vertikalen Windkomponente. Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der horizontalen Windkomponente sind am Boden 10 m/s und in der Höhe 100 m/s. Bei der vertikalen Windkomponente sind es 0,01 – 0,1 m/s. Die Geschwindigkeiten der Komponenten unterscheiden sich um den Faktor 1000. Obwohl die Vertikalbewegungen für das Wettergeschehen eine große Rolle spielen, kann großräumig von einer quasi horizontalen Bewegung ausgegangen werden.

Bei dem Wind handelt es sich um eine gerichtete Größe aus Windrichtung und - Geschwindigkeit. Auf Windkarten sind Isogonen (Linien gleicher Windrichtung) oder Isotachen (Linien gleicher Windgeschwindigkeit) abgebildet. Standardmäßig stellen sie in der oberen Troposphäre, in 200 und 300hPa, Starkwindbänder (Jetstreams) dar. Eine weitere Darstellungsform des Windfelds sind Stromlinien. Die Linien stehen an einen bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit tangential zum gemessenen Windvektor.

Der Weg eines Luftpartikels, im Zeitverlauf, ist seine Trajektorie. Ihr Ursprung ist die Position des Luftpartikels. Ihre Richtung entspricht der Tangente relativ zur Stromlinienposition des Partikels. Da das Windfeld dynamisch ist ändert sich die Trajektorie im Zeitverlauf. Stromlinien und Trajektorien sind selten geradlinig. Beim Kurvenverlauf gilt: Krümmung  $K = 1/R$  (Krümmungsradius). Eine Krümmung gegen den Uhrzeigersinn ist positiv und wird als zyklonal bezeichnet. Negative Krümmungen, im Uhrzeigersinn, werden antizyklonal genannt.

## 4.2. Eigenschaften des horizontalen Windfelds

### 4.2.1. Translation



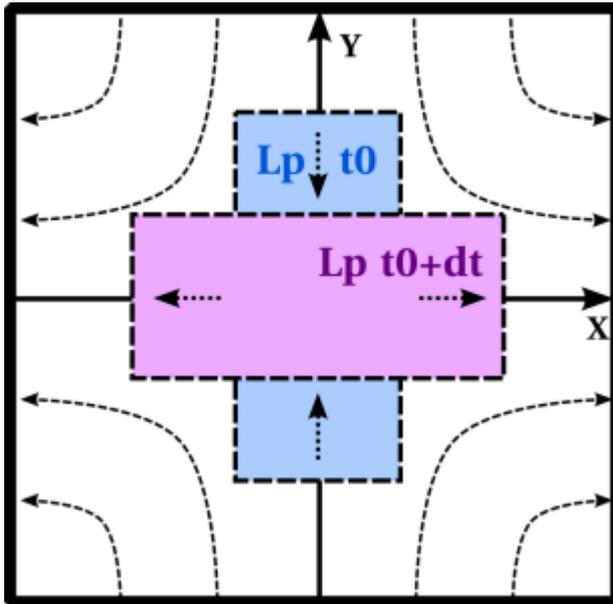
Bei einer gleichförmigen Translation besteht das Strömungsfeld aus geradlinigen, parallelen, richtungs- und abstandsgleichen Linien. Alle Luftpakete verlagern sich mit der gleichen Geschwindigkeit in die gleiche Richtung. Eine räumliche Zustandsänderung findet nicht statt.

Abb. 4.2-1: Translation eines Luftpakets im Zeitverlauf

Luftpaket =  $L_p$

### 4.2.2. Deformation

Bei der Deformation ist der Stromlinienverlauf hyperbelartig. Aus mathematischer Sicht



nähern sich die Linien, asymptotisch, an die Ordinate an. Am Koordinatenursprung befindet sich der Sattelpunkt. In den Quadranten liegen jeweils Druckgebilde. Sie sind wechselseitig, als Hoch- und Tiefdruckgebiete, angeordnet. Das Luftpaket wird an der Schrupfungsachse „zusammengedrückt“ und an der Streckungsachse „gedehnt“. Bei der in

Abb. 4.2-2: Deformation eines Luftpaketes im Zeitverlauf

Abb. 4.2-2 dargestellten Deformation bleibt der Flächeninhalt gleich.

Wird das Deformationsfeld, nach den Regeln der Translation, in x- Richtung verlagert ergibt sich eine Konfluenzzone. Bei der Verlagerung in y - Richtung ergibt sich eine Diffluenzzone. Das Luftpaket wird entlang der Abszisse gestreckt und entlang der Ordinate geschrumpft. Dieser Effekt spielt bei der Frontogenese\* eine wichtige Rolle.

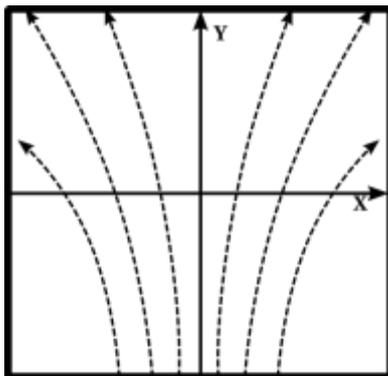


Abb. 4.2-3: Trajektorien eines Diffluenzfeldes

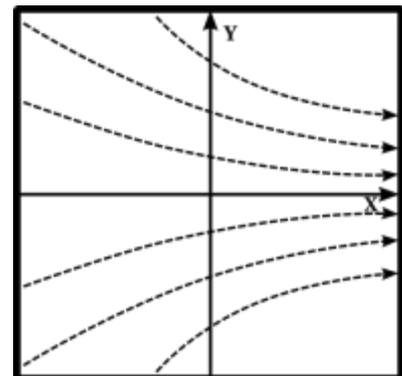
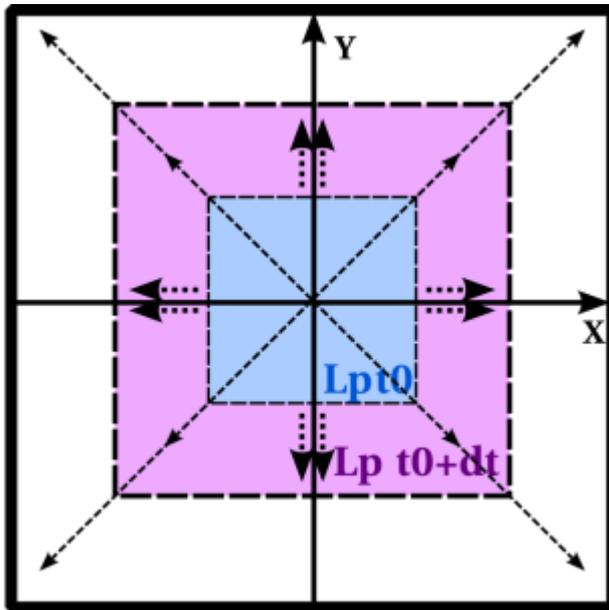


Abb. 4.2-4: Trajektorien eines Konfluenzfeldes

\*Frontogenese: „...das Entstehen einer Front, meist durch Gegeneinanderströmen unterschiedlicher Luftmassen. ...“ [vgl.:36]

### 4.2.3. Divergenz

Bei einem divergenten Windfeld ändert ein Luftpaket im Laufe der Zeit seinen Flächeninhalt. Vergrößert er sich wie in *Abb. 4.2-5* ist es positive Divergenz. Verkleinerung ist negative Divergenz, die auch als Konvergenz bezeichnet wird.

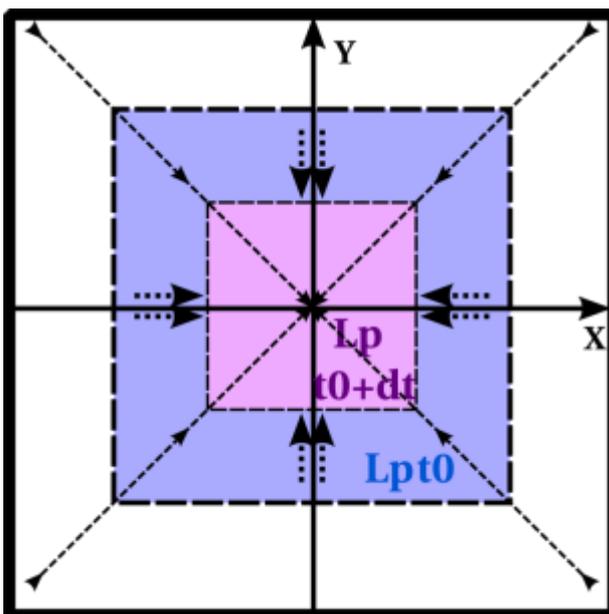


*Abb. 4.2-5: Horizontaldivergenz des Luftpakets im Zeitverlauf*

Divergenz befindet sich nicht im Gleichgewicht mit dem Druckfeld.

Herrscht Divergenz innerhalb des Windfelds vergrößert sich das Luftpaket in X – und Y – Richtung im Zeitverlauf. Die *Abb. 4.2-5* zeigt eine reine Horizontaldivergenz. Die Stromlinien entsprechen Geraden die sternförmig vom Ursprung auseinanderlaufen. Die Geschwindigkeit steigt mit zunehmender Entfernung zur Quelle (Ursprung).

### 4.2.4. Konvergenz



*Abb. 4.2-6: Horizontaldivergenz des Luftpakets im Zeitverlauf*

Konvergenz ist das Gegenstück zur Divergenz innerhalb des Windfelds. Mit fortschreitender Zeit verringert sich der Flächeninhalt des Luftpakets. In der Abbildung *Abb. 4.2-6* ist eine reine Horizontaldivergenz zu sehen. Die Stromlinien bewegen sich geradlinig auf den Ursprung zu. Die Partikelgeschwindigkeit nimmt zur Senke (Ursprung) hin ab.

Die Horizontaldifferenz besteht aus der Richtungsdivergenz und der Geschwindigkeitsdivergenz.

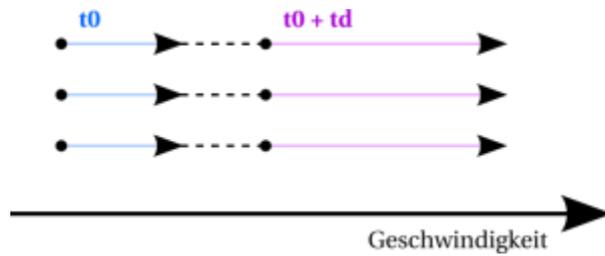


Abb. 4.2-7: Geschwindigkeitsdivergenz des Windfelds

Bei einer Geschwindigkeitszunahme in Strömungsrichtung kommt es zu Geschwindigkeitsdivergenz.

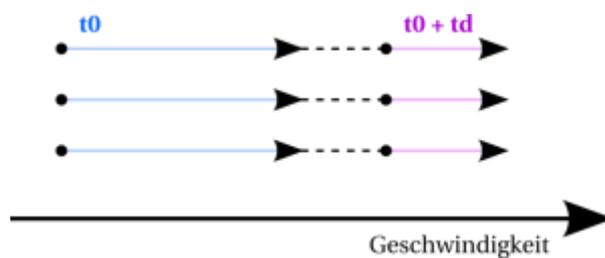


Abb. 4.2-8: Geschwindigkeitskonvergenz des Windfelds

Im umgekehrten Fall, bei Geschwindigkeitsabnahme, kommt es zu Geschwindigkeitskonvergenz.

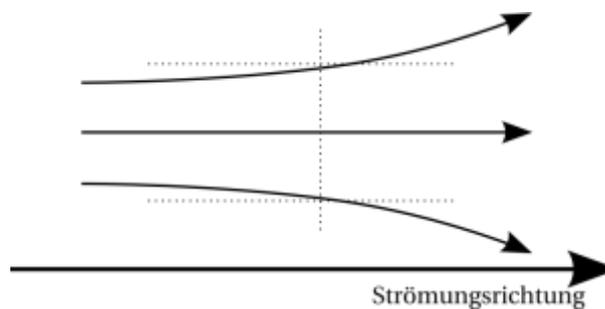


Abb. 4.2-9: Richtungsdivergenz des Windfelds

Gekrümmte, auseinanderlaufende Stromlinien sind Richtungsdivergent.

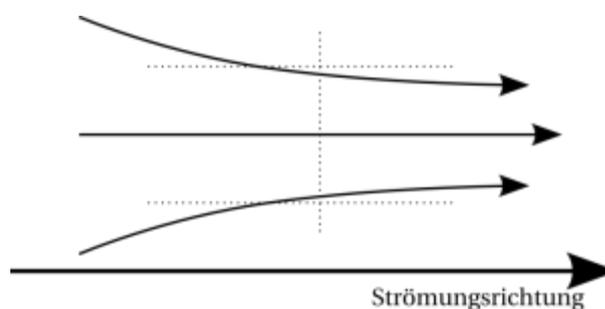


Abb. 4.2-10: Richtungskonvergenz des Windfelds

Gekrümmte, aufeinander zulaufende Stromlinien sind Richtungskonvergent.

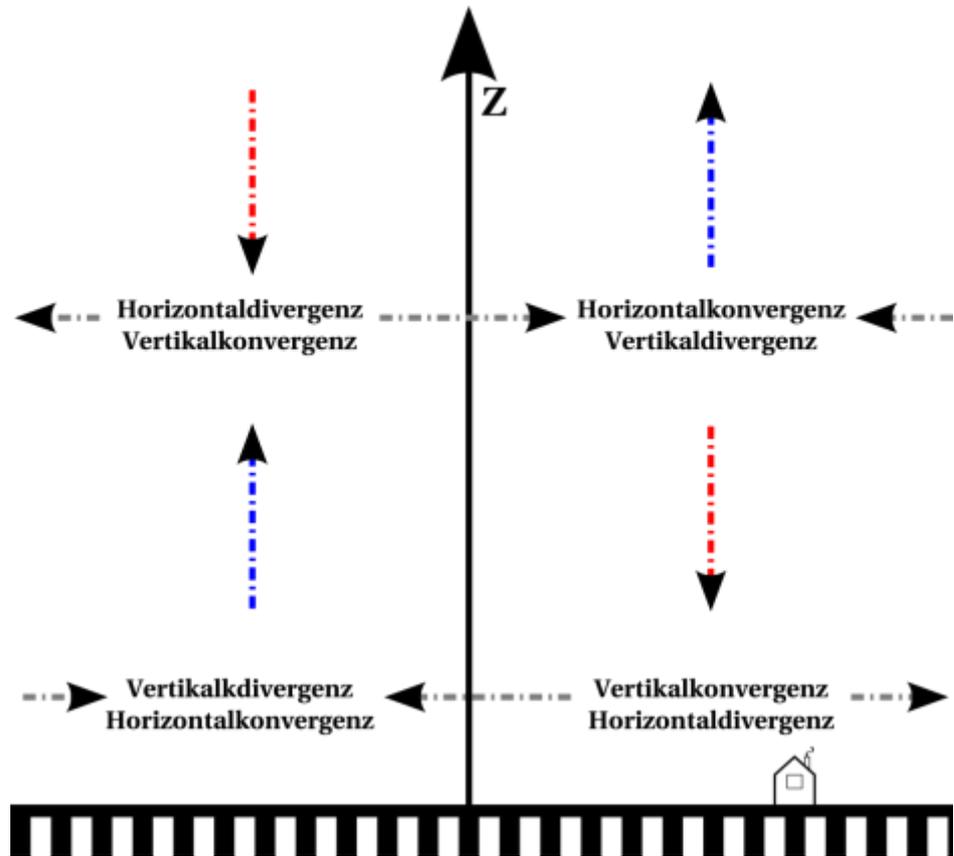
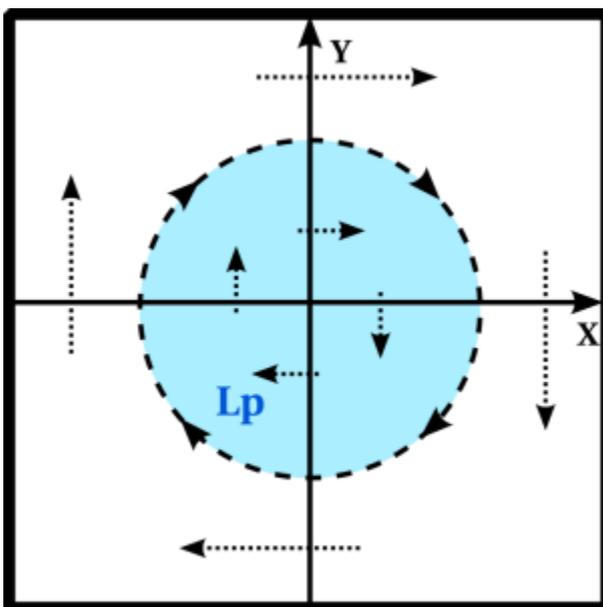


Abb. 4.2-11: Zusammenhang von Divergenten und Konvergenten Bewegungen innerhalb der Atmosphäre in der Seitenansicht

#### 4.2.5. Relative Vorticity

Vorticity oder Rotation bezeichnet die Drehbewegung eines Luftpartikels innerhalb der Strömung um eine Achse orthogonal zur Erdoberfläche.



Folgt die Rotation dem Uhrzeigersinn ist sie „negativ“,

Abb. 4.2-12: antizyklonale Rotation eines Luftpakets

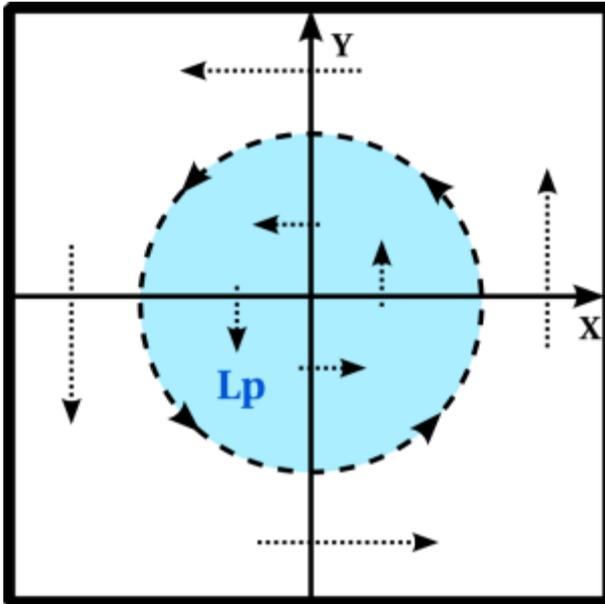


Abb. 4.2-13: zyklonale Rotation eines Luftpaketes

gegen den Uhrzeigersinn „positiv“.

Diese Gesetzmäßigkeiten gelten für die Nordhalbkugel. Auf der Südhalbkugel ist die Rotation im Uhrzeigersinn „positiv“ und gegen den Uhrzeigersinn „negativ“. Ein Strömungsfeld mit reiner Vorticity kann mit dem Druckfeld im Gleichgewicht sein.

Relative Vorticity existiert in Form von Krümmungsvorticity (gekrümmter Verlauf der Stromlinien) oder als Scherungsvorticity. Letztere entsteht wenn quer zur Strömung Geschwindigkeitsunterschiede vorliegen. Krümmungsvorticity herrscht im Bereich von Wellentrögen und -rücken.

### 4.3. Der geostrophische Wind

Bewegen sich Luftpartikel geradlinig, beschleunigungslos und reibungsfrei dann herrscht Kräftebalance zwischen der Druckgradient - und der Corioliskraft. Diese Strömung wird geostrophischer Wind genannt. Er weht in der Atmosphäre oberhalb der planetaren Grenzschicht, parallel zu den Isobaren, mit dem tieferen Druck zu seiner Linken. Bei großräumigen Bewegungen, in der Atmosphäre, entspricht er nahezu dem realen Wind.

### 4.4. Der Thermische Wind und seine Bedeutung

Die Vektordifferenz zweier höhenungleichen, geostrophischen Winden wird als Thermischer Wind bezeichnet. Durch ihn findet kein Massentransport statt. Somit ist er kein „echter“ Wind im engeren Sinn. Sein Vektor ist parallel zu den Isothermen der virtuellen Schichtmitteltemperatur. Die wärmeren Werte befinden sich zu seiner Rechten und die kälteren zu seiner Linken.

Nimmt der geostrophische Wind ohne Richtungsänderung mit der Höhe zu, dann gilt:

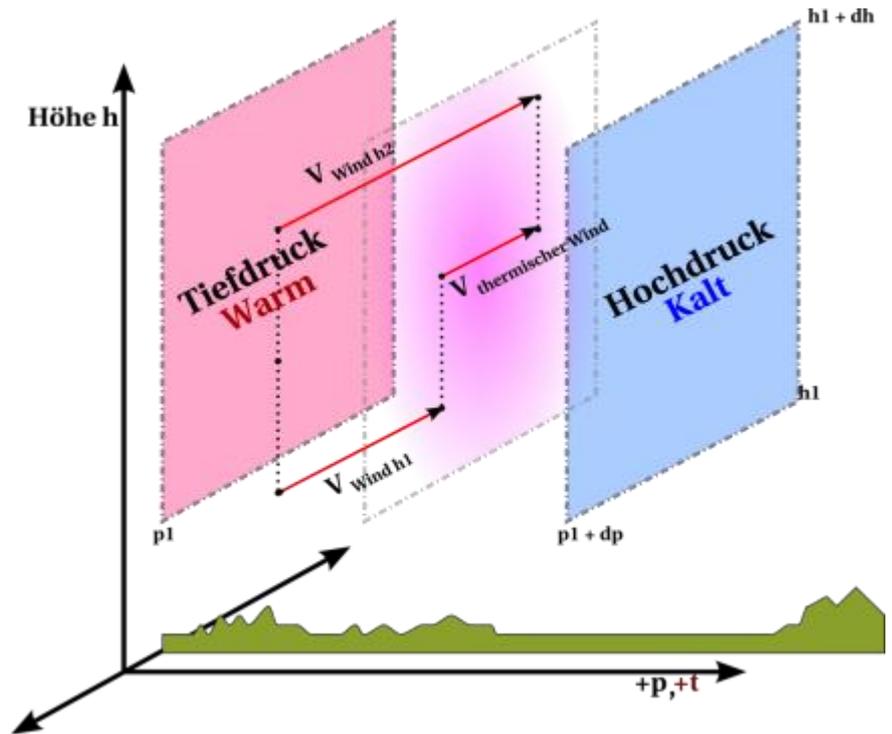


Abb. 4.4-1: Isothermen || Isobarsen und kalte Luft unter tieferem Potential

Nimmt der geostrophische Wind ohne Richtungsänderung mit der Höhe ab, dann gilt:

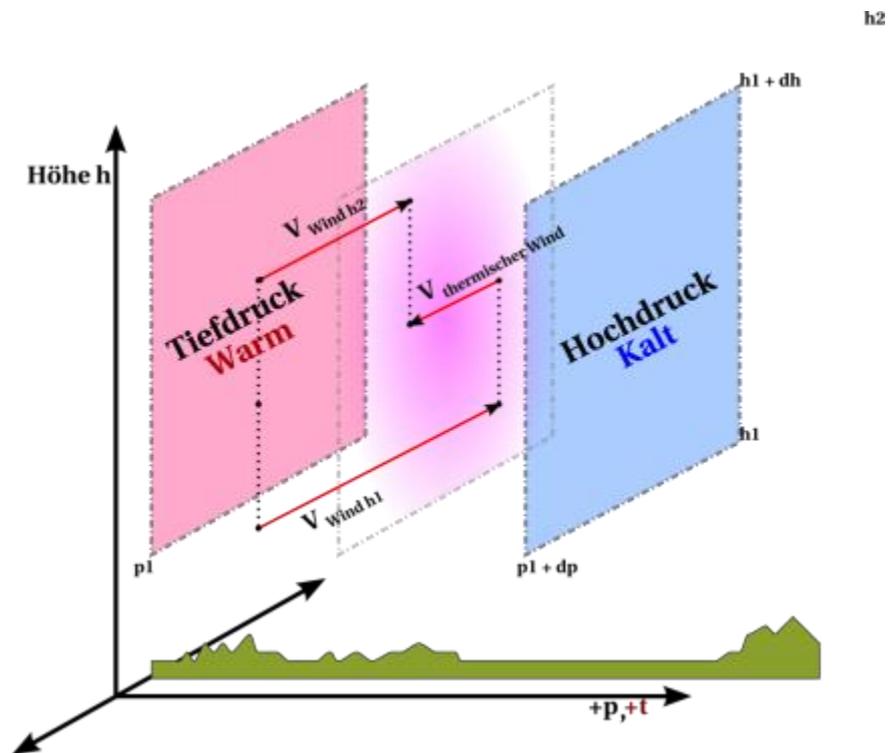


Abb. 4.4-2: Isothermen || Isobarsen und warme Luft unter tieferem Potential → Eine Richtungsänderung um 180° ist möglich

Dreht der geostrophische Wind mit der Höhe nach rechts:

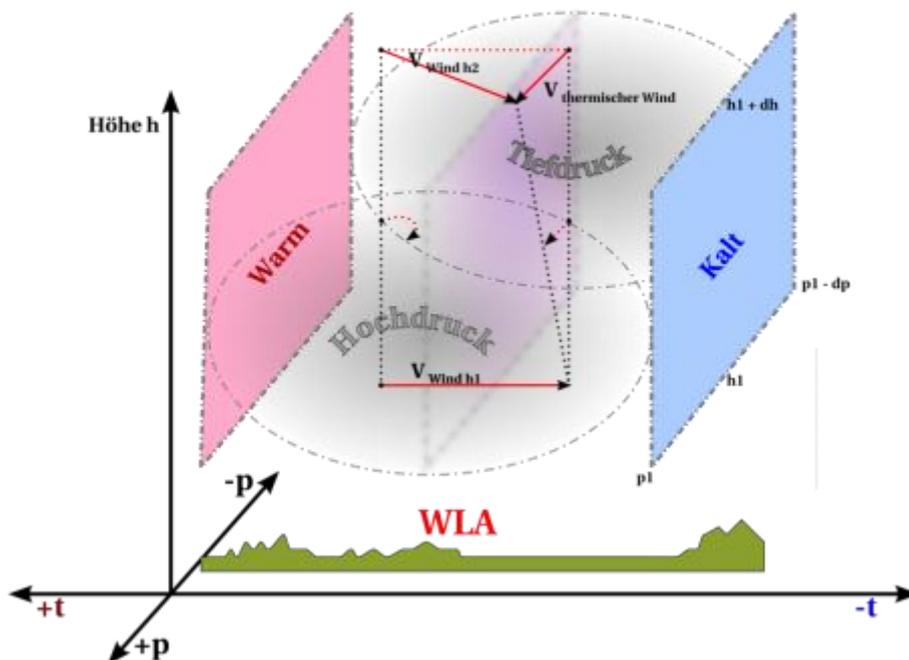


Abb. 4.4-3: Isothermen schneiden die Isohypsen → Der Wind weht aus Richtung der warmen Luft  
→ WarmLuftAdvektion (WLA)

Dreht der geostrophische Wind mit der Höhe nach links:

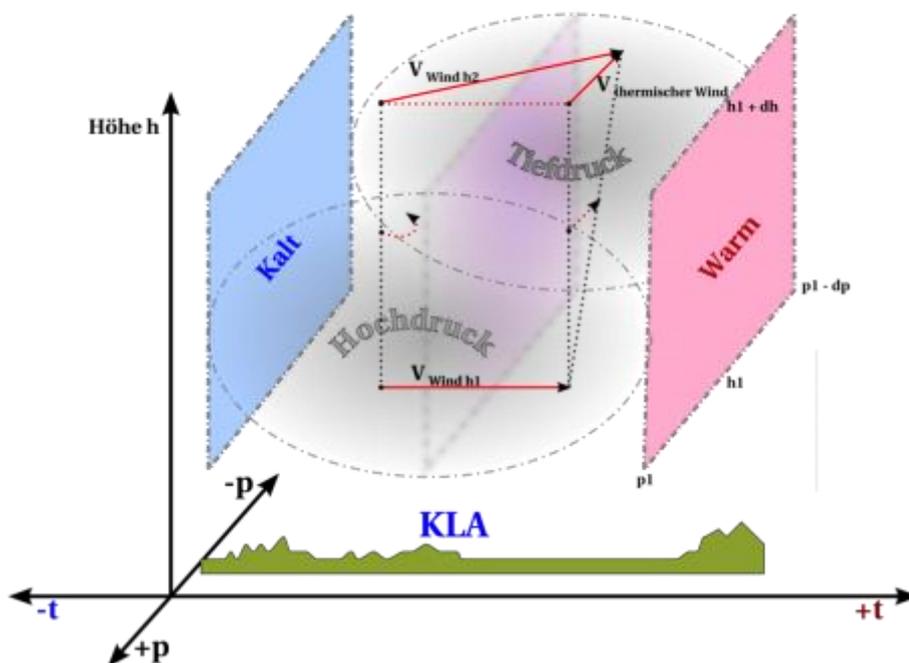


Abb. 4.4-4: Isothermen schneiden die Isohypsen → Der Wind weht aus Richtung der kalten Luft  
→ KaltLuftAdvektion (KLA)

## 4.5. Der Jetstream an der Polarfront (Polarfrontjet)

Die WMO definiert einen Jetstream als eine horizontale, seitlich begrenzte Windströmung mit markant höherer Geschwindigkeit im Vergleich zum umgebenden Windfeld. Er ist räumlich horizontal, als auch vertikal, begrenzt. Die höchsten Windgeschwindigkeiten sind im Kern zu finden. Als Untergrenze der Geschwindigkeit entlang der Jetachse wurden 60KT festgelegt.

Die Länge des Polarfrontjets umfasst den Globus, auch wenn er nicht immer eine Geschwindigkeit größer 60KT aufweist. Seine horizontale Ausdehnung kann bis zu mehreren hundert und die vertikale Mächtigkeit bis zu mehreren Kilometern, betragen. Er fließt entlang der Polarfront auf der warmen Seite, oberhalb der kalten polaren Luftmasse in einer durchschnittlichen Höhe von 10km. Aufgrund seiner Bindung an die namensgebende Polarfront unterliegt er denselben jahreszeitlichen Schwankungen.

Im Bereich des Jetstreams treten starke Turbulenzen auf. Diese als Clear Air Turbulence (CAT) bezeichneten Zonen liegen im Bereich der größten Windscherungen, die sich auf der, der Kaltluft zugewandten Seite, befinden. Je kleiner der Abstand der Isotachen ist desto stärker ist die Turbulenz. Oberhalb und unterhalb des Jetkerns nimmt die CAT ab. Grundsätzlich ist die Turbulenz auf der warmen Seite des Jets geringer, als auf der Kalten.

[vgl.:32]

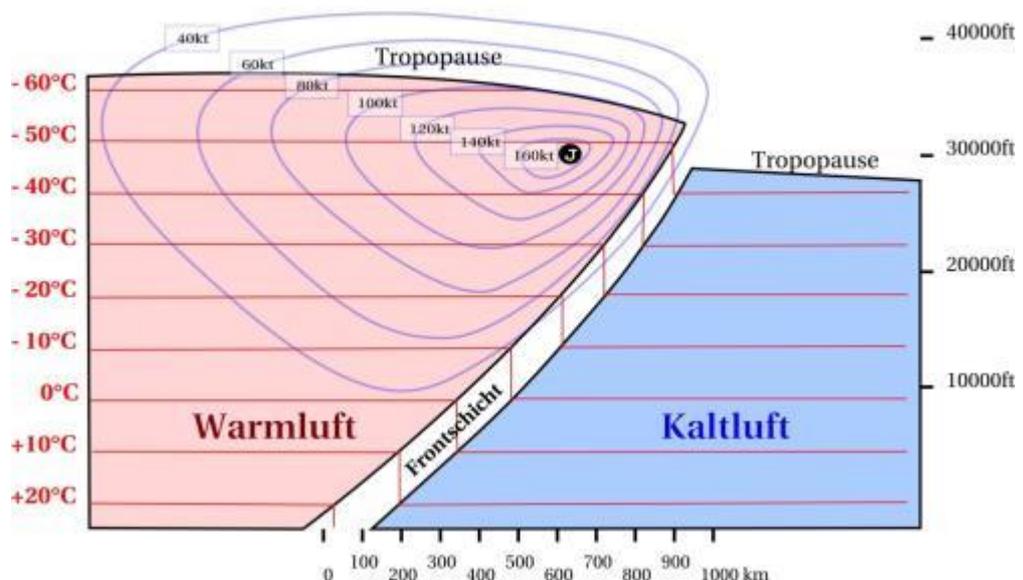


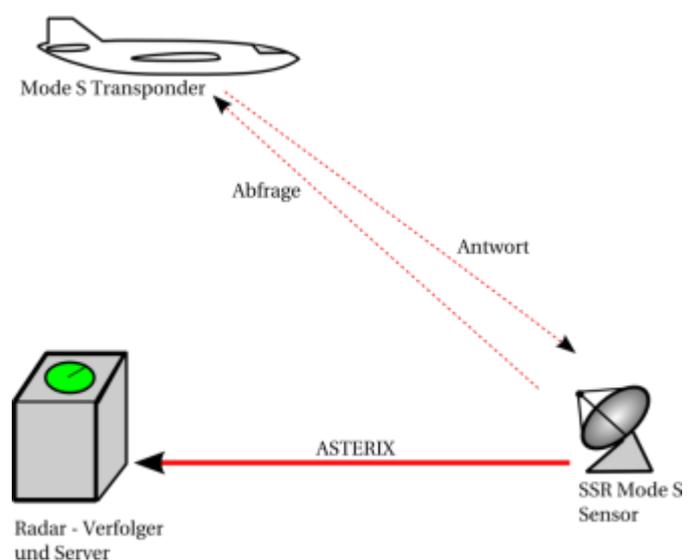
Abb. 4.5-1: Polarfrontjet im Querschnitt; Jetkern mit J gekennzeichnet, Beziehung Temperatur/ Höhe nach ICAO Standardatmosphäre

## 5. Systemeigenschaften des Sekundärradars als Basis zur Generierung meteorologischer Messgrößen

### 5.1. Luftraumverwaltung in Deutschland mittels Transpondern

#### 5.1.1. Funktionsweise und Anwendung von ADS

Automatic Dependent Surveillance (ADS) wird von der Flugsicherung zur Verwaltung und Überwachung des Luftraums verwendet, um die Sicherheit in der Luftfahrt zu erhöhen. Mittels ADS-B werden Flugdaten kontinuierlich und ungerichtet ausgestrahlt. Eine explizite Anforderung von Daten ist mit dem Verfahren ADS-C (- C contract → „kontaktieren“) oder ADS-A (-A addressed → „ansprechen“) möglich.



*Abb. 5.1-1: Funktionsweise von ADS*

Bodengestützt werden die Anfragen und

Antworten durch das Sekundärradar bedient. Es ist in der Lage Ziele aktiv zu verarbeiten.

Im Gegensatz zum Primärradar, welches das Echo auswertet, findet eine „Abfrage“ statt. Der Interrogator (Abfragegerät) sendet ein Signal, das aktiv vom Transponder beantwortet wird. Eine höhere Reichweite, im Vergleich zum Primärradar, ist realisierbar. Es handelt sich um ein Ortungsverfahren mit Laufzeitmessung. Je nach Standard sind mehrere Informationen abfragbar. Sekundärradare dienen hauptsächlich zur Überwachung des Luftraumes, um die Sicherheit zu gewährleisten. Die Trägerfrequenzen sind weltweit einheitlich festgelegt, für die Abfrage 1030 MHz und für die Antwort 1090 MHz. Das global zur Luftraumüberwachung eingesetzte Sekundärradarsystem unterliegt den Normen der ICAO.

[vgl.: 13]

## 5.1.2. Standards für Sekundärradarverfahren

### 5.1.2.1. Systemeigenschaften von Mode S

Mode S fähige Transponder sind seit dem 31.05.2007 für IFR - und dem 31.05.2008 für VFR – Flüge verpflichtend. Bei Mode S ist jedem Flugzeug eine feste ICAO 24 – Bit – Adresse einprogrammiert. Standardabfragen, durch Bodenstationen, sind die „All- Call interrogations“ und die „Roll- Call interrogations“. Bei „All- Call“ werden alle Luftfahrzeuge im Erfassungsbereich abgefragt und es wird eine Antwort erwartet. Praktisch gesehen werden so alle Luftfahrzeuge erfasst die den Erfassungsbereich betreten haben. Sind sie der Bodenstation einmal „bekannt“ so sendet der Transponder keine Antwort mehr. Somit werden unnötige Abfragen vermieden und der Datenstrom „schlank“ gehalten. Es sei denn er wird individuell per „Roll- Call interrogation“ angesprochen. Diese selektive, adressierte Abfrage kann inhaltlich durch den Fluglotsen spezifiziert werden. Die Antwort ist ein bis zu 112 Bit langes Telegramm. Innerhalb des Mode S wird zwischen zwei Modi unterschieden. Beim „elementary Mode“ werden nur die ICAO- Adresse und die Höhe übermittelt. In Frankreich Großbritannien und Deutschland müssen Luftfahrzeuge mit einer „maximum takeoff weight“ (MTOW) über 5,7 t und einer Reisegeschwindigkeit größer 250KT im „Enhanced Mode“ senden. Die Informationen des „elementary Modes“ werden um Fluggeschwindigkeit, Steig – , Sinkflugrate und Kurs erweitert.

[vgl.: 13]

### 5.1.2.2. Transponderpflicht für Luftfahrzeuge in Deutschland

Im deutschen Luftraum besteht eine generelle Transponderpflicht für IFR- Flüge nach Instrumentenflugregeln (IFR). Ab dem 31.05.2005 ist die Mode- S – Technik, Level 2 mit SI Code und Elementary Surveillance, als Mindeststandard festgelegt.

Bei VFR- (Sichtflugregeln) Flügen in folgenden Lufträumen ist ein Transponder, der die o.g. Spezifikationen erfüllt, Pflicht:

- Lufträume der Klasse C und D
- Lufträume mit vorgeschriebener Transponderschaltung (TMZ Transponder Mandatory Zone)
- nachts im kontrollierten Luftraum
- oberhalb von 5000 Fuß ü.NN oder oberhalb 3500 Fuß ü.GND, der höhere Wert ist maßgebend für motorgetriebene Luftfahrzeuge, ohne Segelflugzeuge

[vgl.: 20]

# Luftraumstruktur/Sichtflugregeln in Deutschland

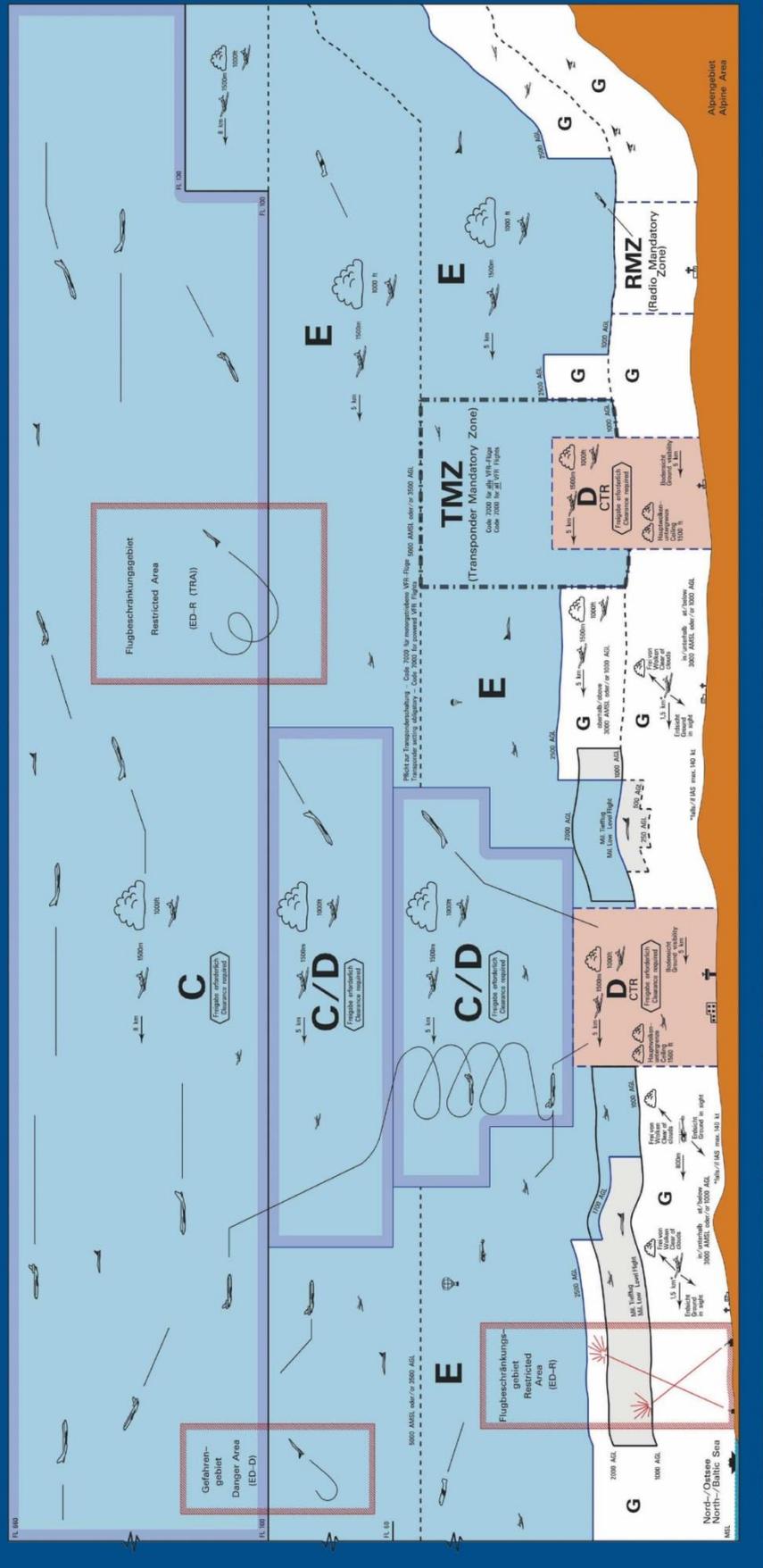


Abb. 5.1-2: Luftraumstruktur in Deutschland für Instrumenten – und Sichtflug

[vgl. : 18]

#### 5.1.2.3. Pflicht zur Luftraumüberwachung:

Gemäß LuftGV 27c ist der Luftverkehr „sicher, geordnet und flüssig (§27c, 1, LuftVG)“ abzuwickeln. In Deutschland erfüllt diese Vorgaben die Deutsche Flugsicherung (DFS). Sie betreibt die in §27c 2 LuftVG festgelegten Dienste. Im Rahmen des in §27c 2, 4 vorgeschriebenen Überwachungsdienst wird der Luftverkehr mit Hilfe des Sekundärradars überwacht. Der momentane Standard ist Mode S.

[vgl.: 21]

#### 5.1.2.4. Mode S Sensoren und ihre Abdeckung innerhalb des deutschen Luftraums

Das Messnetz zur Überwachung des deutschen Luftraums besteht sowohl aus zivilen, durch die Deutsche Flugsicherung, als auch militärischen, durch die Bundeswehr betriebenen Sensoren. Jeder Sensor verfügt in unmittelbarer Nähe über mindestens ein Reservegerät, um das System so gut wie möglich gegen Ausfälle zu sichern. In der *Abb. 5.1-3* sind alle Sensoren in Deutschland und Umgebung dargestellt.

[vgl.: 40]



Abb. 5.1-3: Mode S Sensoren in Deutschland und Umgebung

Um den deutschen Luftraum lückenlos zu überwachen müssen nicht alle Sensoren gleichzeitig in Betrieb sein. Wie in Abb. 5.1-4 zu sehen ist genügen vier Sensoren um die Luftsicherheit zu gewährleisten. Im Bild sind ebenfalls Flugspuren von LFZ zu sehen die sich zum Aufzeichnungszeitpunkt über Deutschland befanden.

[vgl.: 40]

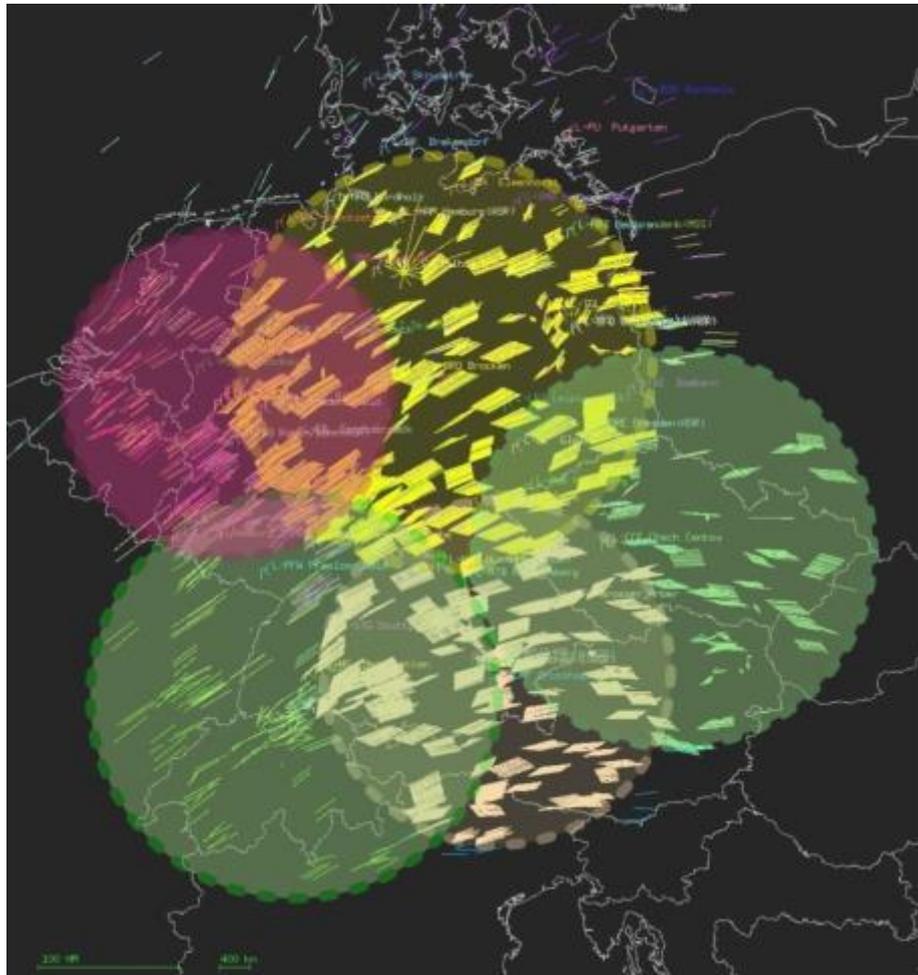


Abb. 5.1-4: Sensorabdeckung des deutschen Luftraums mit Flugspuren (Aufzeichnungsdauer 2min)

[vgl.: 40]

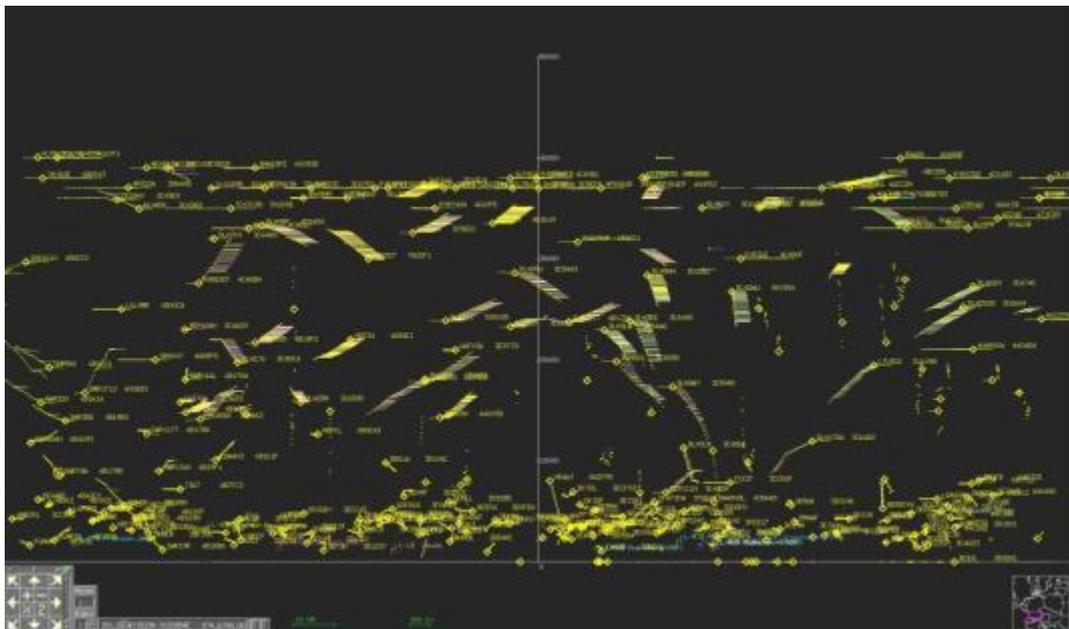


Abb. 5.1-5: Vertikalprofil einer zweiminütigen Mode S Aufzeichnung des Deutschen Luftraums mit Blickrichtung von Süd nach Nord

[vgl.: 40]

### 5.1.3. Werte aus Flugüberwachungsdaten zur Generierung

#### meteorologischer Aussagen

In Europa werden Flugüberwachungsdaten in All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange (ASTERIX) codiert. Das von European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) veröffentlichte Protokoll wird im Sekundärradarnetz zur Datenübertragung eingesetzt. Das Sekundärradar empfängt die vom Transponder gesendeten Daten im ASTERIX – Format (siehe 9.2).

Gemäß Tabelle 5.3 im ICAO Annex 10 V4 muss die Empfangsstation mindestens folgende Parameter ausgeben:

- Position in der Luft
- Position am Boden
- Luftfahrzeuggeschwindigkeit
- Luftfahrzeugkennung und Art
- Extended Squitter (Rundspruch) Luftfahrzeugstatus
- Aktueller Status Luftfahrzeug

#### 5.1.3.1. Flugbewegungen nach Instrumentenflugregeln über Deutschland im Jahr 2014

IFR Flüge im deutschen Luftraum im Jahr 2014 :

<u>Jahr</u>	<u>2014</u>
zivileFlüge	2932935
militärischeFlüge	47502
<b>gesamt</b>	<b>2980437</b>

IFR Starts und Landungen an internationalen und regionalen Flughäfen in Deutschland im Jahr 2014 :

<u>Jahr</u>	<u>2014</u>
Internationale Flughäfen	1947971
Regionale Flughäfen	173027
<b>gesamt</b>	<b>2120998</b>

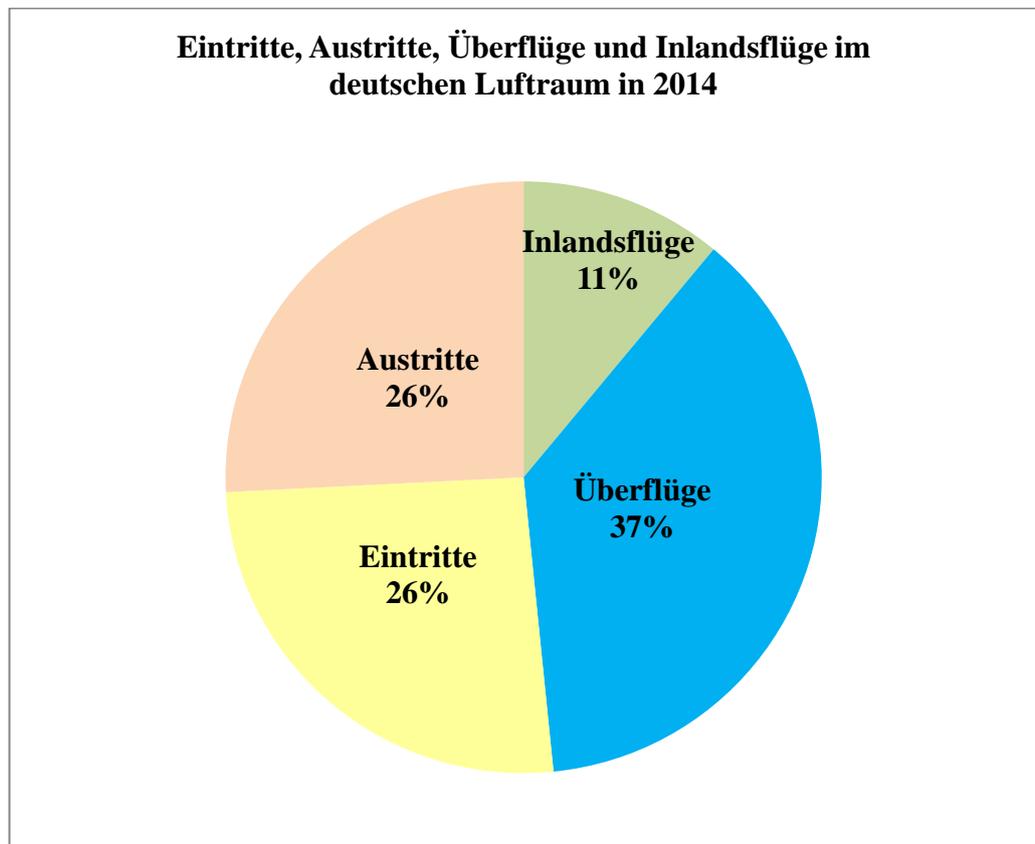


Abb. 5.1-6: Flugbewegungen im deutschen Luftraum in 2014

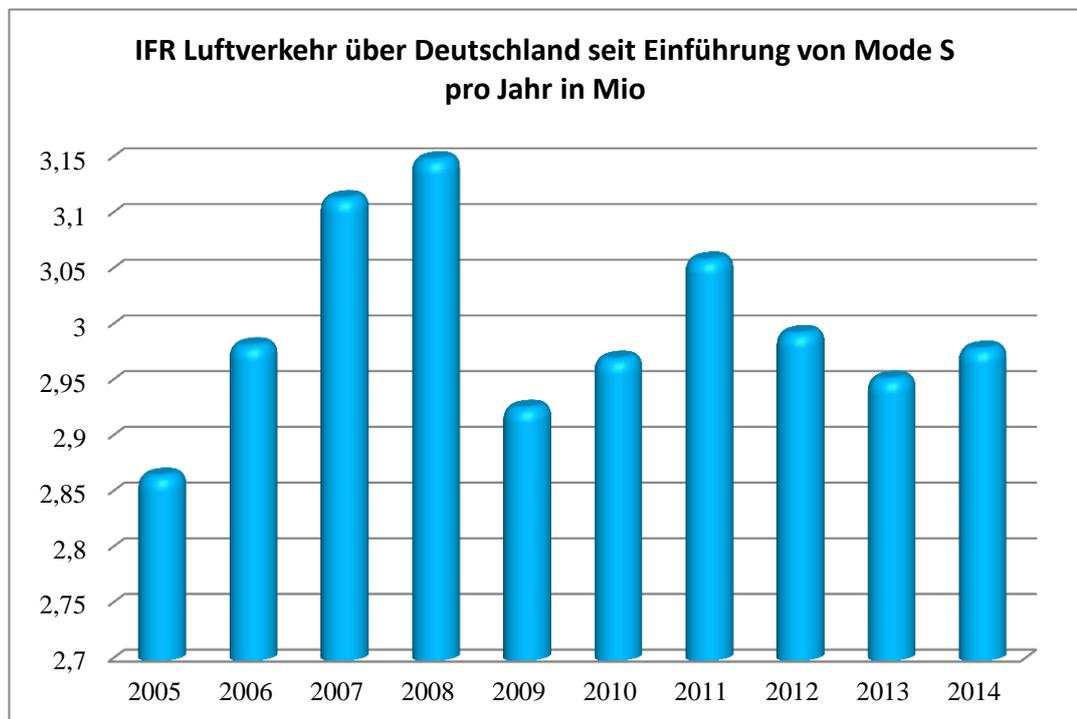


Abb. 5.1-7: Luftverkehr nach Instrumentenflugregeln pro Jahr in Mio seit Einführung von Mode S

[vgl.: 14]

#### **5.1.4. Qualitätsanforderungen für die Luftraumüberwachung durch Radarbeobachtung**

Die Systeme zur Luftraumüberwachung der Flugsicherung müssen im höchsten Maß verlässlich, verfügbar und vollständig sein. Dasselbe gilt für die Datenübertragung. Aufgrund des Ausfallrisikos sind Notsysteme bereitzustellen. Luftraumüberwachungssysteme haben die Fähigkeit Daten von allen angeschlossenen Systemen zu empfangen, zu verarbeiten und darzustellen. Die richtige Einstellung der Transponder – Codes und die Identifizierbarkeit des LFZ muss jederzeit gewährleistet sein.

Flugzeuge die mit Mode S Transpondern ausgestattet sind müssen die Flugzeugkennung analog zum Flugplan senden. Stimmt diese nicht mit dem Flugplan überein ist der Pilot zu informieren und der Fehler ist, wenn möglich, zu berichtigen.

Im RVSM Luftraum beträgt die Höhentoleranz  $\pm 200\text{ft}$  der Flugflächen. Außerhalb sind es  $\pm 300\text{ft}$ . Befindet sich das LFZ innerhalb dieser Toleranz wird es der entsprechenden Flugfläche zugeordnet. Bei Steig- oder Sinkflug gilt eine Flugfläche als erreicht wenn das LFZ den o.g. Toleranzbereich für 15s oder drei Sensor- Updates nicht verlässt.

Der Fluglotse überprüft und justiert das Luftraumüberwachungssystem gemäß den technischen Vorgaben. Er ist verpflichtet auftretende Fehler oder Probleme zu melden.

Sind LFZ mit Mode S ausgestattet erfolgt die Identifizierung seitens des Sekundärradars augenblicklich. Nach erfolgreicher Identifizierung meldet die Luftverkehrskontrolle die Position des LFZ an das LFZ um die Angabe zu verifizieren. Der Fluglotse vergleicht die von seinem System gemeldete Flugbewegung mit dem Flugplan oder der Anflugprozedur. Sobald er kritische Abweichungen feststellt erteilt er dem Piloten Korrektur-Anweisungen.

Die Position sollte in einer der folgenden Formen an das LFZ gemeldet werden:

- Geographische Position
- Polarkoordinaten und den Abstand zu einem markanten Punkt, eine Hilfestellung zur Flugnavigation, eine Hilfestellung für den Landeanflug
- Kurs (Kompass) und die Entfernung zu einer bekannten Position
- Entfernung zum Aufsetzpunkt beim Landeanflug
- Abstand und Richtung relativ zur Ideallinie einer Flugroute

Der minimale horizontale Abstand zwischen den Luftfahrzeugen, im kontrollierten Luftraum, beträgt unter normalen Bedingungen 9,3km und 5,6km wenn es die Leistungsfähigkeit des überwachenden Radars zulässt.

[vgl.: 8]

### 5.1.5. Innereuropäischer Austausch von Luftverkehrsdaten

Um den grenzübergreifenden Luftverkehr innerhalb Europas effizienter und sicherer zu gestalten wurde seitens der Europäischen Union (EU) der Austausch von Luftverkehrsdaten bezüglich der Meldung, Leitung und Übergabe von Flügen zwischen den Luftverkehrskontrollstellen geregelt. Hierfür bedarf es eines Netzwerkes, dass in der Lage ist Flugverkehrsdaten automatisch weiterzuleiten und bereitzustellen. Eurocontrol wurde per Verordnung „(EC) No. 549/2004 Article 8(1)“ beauftragt einen Anforderungskatalog zu erstellen.

2004 wurde „Single European Sky“ (SES) von der Europäischen Kommission ins Leben gerufen, um die Architektur der europäischen Luftraumverwaltung zu erneuern. Kernstück ist die Informationsverwaltung.

[vgl.: 9]

#### 5.1.5.1. Luftraumüberwachungs – Daten - Netzwerk SURNET

##### 5.1.5.1.1. RMCDE

Ein wichtiger Bestandteil des SURNET sind die RMCDE die als Knotenpunkte zur Datenweiterleitung innerhalb des Netzwerks fungieren. Sie sind ebenfalls die Schnittstellen zwischen den Radarsensoren und den ATC- Benutzern. Über einen RMCDE können Daten von anderen RMCDE abgerufen und verfügbar gemacht werden. Jeder RMCDE - Benutzer ist somit in der Lage Luftraumüberwachungsdaten aus dem System abzurufen. Das RMCDE unterstützt Filterung und Zusammenfassung von Quellcode. Dadurch sind die im System verfügbaren Daten redundanzfrei.

Innerhalb einer Luftraumverwaltungszentrale ist das RMCDE die Schnittstelle zu den Luftraumüberwachungsdaten. Das RMCDE prüft und filtert die Daten bevor es sie für Folge Systeme freigibt. Beschädigte oder unvollständige Datensätze werden entfernt, gemäß den Regeln des ASTERIX Standards.

[vgl.: 30]

Technische Daten:

Schnittstellen	Bis zu 104 serielle Schnittstellen (V.24 oder V.11) 10/100 Mbit/s Ethernet, FDDI (DAS)
Formate	Asterix, DIF, EUROCONTROL, CD2, CAA, Aircat, RDE, militärische Formate
Protokolle	HDLC LAP-B, HDLC Frame Level, X 25, OSI/TP4, TPD, CLNP, LLC1, ES-IS,UDP/IP, TCP/IP, SNMP V.1, SNMP V.2

Zeitdienste	NTP, DCF 77, GPS, crystal backup
Verfügbarkeit	geplante Verfügbarkeit: 99,9999986%
Wartbarkeit	Durchschnittliche Reparatur Dauer: 15min
Interne Verzögerung	< 50 msec pro Plot bei hoher Auslastung
Datendurchsatz	> 10000 Plots/s
Hardware	Rack-mounted multiprocessor board system Server-based operator subsystem
Software	Echtzeit – Betriebssystem für Prozessor Kommunikations - Einheiten HMI LINUX basierend und OSF/Motif

*Tabelle 5.1-1: Eigenschaften eines RMCDE;*

[vgl.:15]

#### 5.1.5.1.2. SURNET

Die Verbreitung von Luftverkehrsdaten findet über ein Netzwerk statt, dem SURNET (früher RADNET). Aufgabe des Netzwerks ist der Austausch von Daten zwischen Deutschland, Belgien, Niederlande Luxemburg und den benachbarten Ländern. Jeder der der Vereinbarung zum gegenseitigen Datenaustausch zugestimmt hat darf die Daten nutzen. Die Netzwerke sind miteinander verbunden und Eigentümer der Hardware (RMCDE) ist die jeweilig zuständige Flugsicherung. Innerhalb der Gemeinschaft zum gegenseitigen Datenaustausch ist selbiger kostenlos. Momentan ist die Benutzung der Daten für außenstehende ebenfalls frei, mit Ausnahme von UK NATS.

RMCDE – Betreiber schließen eine Haftung für Folgeschäden und Forderungen, aufgrund eines Fehlers in nichteigenen Systemen, ausdrücklich in der Datenaustausch – Vereinbarung aus. SURNET Benutzer haften für Folgeschäden und Forderungen aufgrund eigener Systemdefekte. Die Verantwortung über die Datenqualität und Datenkonsistenz tragen die Flugsicherungen.

Die Datennutzer verpflichten sich die Daten ausschließlich für Zwecke der Flugsicherung, zur Unterstützung der Flugsicherung, Erprobung von Geräten/ Systemen und für technische Demonstrationen zu verwenden. Alle Daten sind als vertraulich eingestuft und dürfen ohne Genehmigung nicht an Dritte weitergegeben werden. Eine weitere Nutzung, als die in der Vereinbarung festgelegte, ist nicht gestattet.

Betriebsangehörige Nutzer müssen einen Antrag zur Datenversorgung an das Sekretariat des SURNET – Gremiums stellen. Die Geheimhaltung muss gewahrt sein. Deswegen ist strikt

zwischen Betriebsangehörigen Nutzern und betriebsfremden unterschieden. Flugsicherheit hat unter allen Umständen Vorrang.

Der Datenaustausch findet im ASTERIX – Format statt. Echtzeitdaten sind standardisiert, kategorisiert und verlässlich. Luftraumüberwachungsdaten haben eine hohe Aktualisierungsfrequenz. Alle Nutzer werden zur selben Zeit mit den Daten versorgt, gemäß ihren Bedürfnissen.

[vgl.: 30]

#### 5.1.5.2. Vorschriften zur Nutzung von Echtzeit Luftraumüberwachungsdaten

Die Funktionsfähigkeit des Überwachungssystems muss immer gewährleistet sein. Es darf zu keiner Zeit zu Performanceeinbrüchen durch Überlastung kommen. Deswegen werden die Nutzer in 2 Gruppen priorisiert:

Priorität 1	Priorität 2
<b>Betriebliche Nutzer</b>	<b>Externe Nutzer</b>
Direkte betriebliche Nutzer: <ul style="list-style-type: none"> <li>• z.B. Flugsicherung</li> <li>• keine Einschränkung bei der Datennutzung</li> </ul>	Nutzer die betriebliche Nutzer unterstützen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• der Datenzugang wird prinzipiell unterstützt</li> <li>• die beabsichtigte Nutzung der Daten ist ausführlich darzulegen</li> </ul>
Indirekte betriebliche Nutzer: <ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Organisationen die die direkten betrieblichen Nutzer unterstützen und selber keine „Flugsicherung“ betreiben</li> </ul>	Andere Antragsteller: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundsätzlich kein Datenzugang</li> <li>• bei Ausnahmen sind strenge Beschränkungen gesetzt</li> </ul>

*Tabelle 5.1-2: Klassifizierung und Priorisierung der Nutzer von Luftverkehrsdaten*

Die Datenversorgung von externen Nutzern wird grundsätzlich unterstützt solange es der Entwicklung der Luftraumverwaltung zuträglich ist. Die Datenversorgung der betrieblichen Nutzer darf auf keinen Fall beeinträchtigt werden. Nicht Betriebsangehörige Nutzer müssen nachweisen, dass die Datenversorgung dem Netzwerk und/oder gemeinsamen Entwicklungen nützlich ist.

Der Zugang zu Echtzeitüberwachungsdaten muss formell beim Sekretariat SDDB beantragt werden. Im Antrag muss eine Erklärung zur Notwendigkeit der Nutzung von Echtzeitdaten, dem Zweck, der Zeitspanne, der beabsichtigten Nutzung und dem zu erwartenden Gewinn, enthalten sein. Ein Plan der die beabsichtigte Nutzung in den folgenden 6 Monaten enthält ist

dem Antrag beizufügen. Jegliche Abweichung der vereinbarten Nutzung der Daten ist der zuständigen Stelle zu melden.

[vgl.:22]

## 5.2. Datenqualität der Mode S Messung

### 5.2.1. Sekundärradar Gerätespezifikationen

Aus Mode S Meldungen gewonnene Windmessungen basieren prinzipiell auf zwei „Messgeräten“. Es ist eine Kombination aus „in situ“- und „Fernerkundungs“- Verfahren. Das Flugzeug misst die True Air Speed an einem Punkt in der Atmosphäre zu einer bestimmten Zeit. Bei den LFZ gibt es je nach Typ unterschiedliche Charakteristika.

Das Radar bestimmt die zugehörige Geschwindigkeit relativ zum Boden. Für alle Radare gilt derselbe Anforderungskatalog. Für Sekundärradare, im Zuständigkeitsbereich von EUROCONTROL, sind folgende Mindestanforderungen festgelegt:

	Horizontale Staffelung in 5NM		Horizontale Staffelung in 3NM	
	Mindest-Leistung	Empfohlene Leistung	Mindest-Leistung	Empfohlene Leistung
<b>Abtastintervall</b>	≤ 8s	≤ 6s	≤ 5s	≤ 4s
<b>quadratischer Mittelwert des horizontalen Lagefehlers</b>	≤ 500m global und ≤ 550m für 100% der Flüge	≤ 350m global und ≤ 385m pro Flug	≤ 300m global und ≤ 330m für 100% der Flüge	≤ 210m global und ≤ 230m pro Flug
<b>Wahrscheinlichkeit der aktuell genauen Druckhöhe</b>	≥ 96% allgemein		≥ 96% allgemein	
<b>Durchschnittliche Verzögerungszeit der Druckhöhe</b>	≤ 4s (ein Wert ≥ 16s ist ungültig)		≤ 2,5s (ein Wert ≥ 16s ist ungültig)	

<b>Verhältnis von fehlerhaften Druckhöhenangaben</b>	$\leq 0,1\%$		$\leq 0,1\%$	
<b>Vorzeichenloser Druckhöhen- Fehler</b>	$\leq 200/300\text{ft}$ in 99,9% bei stabiler Fluglage und $\leq 300\text{ft}$ in 98,5% bei Steig/- Sinkflug		$\leq 200/300\text{ft}$ in 99,9% bei stabiler Fluglage und $\leq 300\text{ft}$ in 98,5% bei Steig/- Sinkflug	
<b>Wahrscheinlichkeit der Aktualisierung eines LFZ mit der zutreffenden ID</b>	$\geq 98\%$ allgemein	$\geq 98\%$ pro Flug	$\geq 98\%$ allgemein	$\geq 98\%$ pro Flug
<b>Verhältnis von fehlerhaften LFZ ID's</b>	$\leq 0,1\%$		$\leq 0,1\%$	
<b>quadratischer Mittelwert der Kursgeschwindigkeitsfehlers</b>		$\leq 4\text{m/s}$ bei Geradeausflug $\leq 8\text{m/s}$ bei Kurvenflug		$\leq 4\text{m/s}$ bei Geradeausflug $\leq 8\text{m/s}$ bei Kurvenflug
<b>quadratischer Mittelwert des Kurswinkelfehlers</b>		$\leq 10^\circ$ bei Geradeausflug $\leq 25^\circ$ bei Kurvenflug		$\leq 10^\circ$ bei Geradeausflug $\leq 25^\circ$ bei Kurvenflug
<b>Dichte der unkorrelierten fehlerhaften Zielmeldungen</b>		$\leq 10$ fehlerhafte Zielmeldungen auf $900\text{NM}^2$ und über 450 zutreffende Messintervalle		$\leq 2$ fehlerhafte Zielmeldungen auf $100\text{NM}^2$ und über 720 zutreffende Messintervalle

<b>Stündliche Anzahl der als fehlerhaft erkannten Kurse nah bei gültigen Kursen</b>		≤2 als fehlerhaft erkannter Kurs pro h die näher als 13000m – 7NM von gültigen Kursen		≤1 als fehlerhaft erkannter Kurs pro h die näher als 16700m – 9NM von gültigen Kursen
<b>Stetigkeit der Wahrscheinlichkeit kritischer Fehler</b>		≤2.5 10 <sup>-5</sup> pro Betriebsstunde		≤2.5 10 <sup>-5</sup> pro Betriebsstunde

*Tabelle 5.2-1: Grenzwerte und Mindestanforderungen an Sekundärradare im Zuständigkeitsbereich von EUROCONTROL während des Betriebs*

[vgl.: 23]

### **5.2.2. Einfluss der Genauigkeit der magnetischen Richtungsmessung auf die Windmessung**

Die Deklination gibt den Winkel der örtlichen Missweisung, zwischen dem magnetischen und dem geographischen Pol an. Der geographische Nordpol ist an die Rotationsachse der Erdkugel gekoppelt. Der Magnetische Pol ist der Ort an dem die Feldlinien des Erdmagnetfelds senkrecht in den Erdkörper eintreten. Da das Erdmagnetfeld in Bewegung ist ändert sich seine Position ständig (jährlich um mehrere Kilometer). Für nautische und fliegerische Anwendungen sind in der „DIN 13312“ die verschiedenen „Kurse“ relative zur Nordrichtung definiert. Der Kompass – Steuerkurs (KSK) muss mit Hilfe der Ortsmissweisung (OM), die in Isogonen – Karten dargestellt ist, korrigiert werden um den True Course (TC) zu erhalten.

In der Mode S Windmessung ist das „magnetic Heading“ des Flugzeuges enthalten. Das LFZ- „magnetic Heading“ ist die Kursrichtung in welche die Nase des LFZ zeigt. Angegeben wird es in Grad abhängig zum magnetischen Nordpol. Alternativ wird Das LFZ – „magnetic Heading“ auch als Steuerkurs des LFZ (KSK) bezeichnet.

Ein moderner, digitaler, magnetischer Kompass wie der „Honeywell HMR 3600“ besitzt eine Genauigkeit höher als 0,5° mit einer Auflösung von 0,1° [vgl.: 26]. Im Allgemeinen ist folglich ein Fehler von 1° anzunehmen.

[vgl.: 16]

### 5.2.3. Genauigkeit der Windmessung durch Staudruckmessung

Da die Windmessung mittels Mode S analog zur AMDAR – Messung erfolgt, ist die Messungsgenauigkeit dieselbe (siehe 3.5.4 Qualität der gemessenen Daten die mit AMDAR verarbeitet werden).

Aus Mach Zahl (M) und statischer Lufttemperatur ( $T_0$ ) wird die wahre Fluggeschwindigkeit errechnet.

$$V_{\text{Luft}} = \sqrt{38,867 M * T_0} \quad \text{KT}$$

Sind Fehler in der Mach Zahl und der statischen Temperatur enthalten, dann gilt:

$$dV_{\text{Luft}} = \sqrt{38,867 * T_0} * dM + \sqrt{19,433M * T_0} * dT_0$$

$dV_{\text{Luft}}$  → Fehler der wahren Fluggeschwindigkeit

$dM$  → Fehler der Mach Zahl

$dT_0$  → Fehler der statischen Lufttemperatur

Im Vergleich zu den, teilweise, großen Temperaturunterschieden, ist die Mach Zahl meist stärker fehlerbehaftet.

[vgl.: 4, S11 ff.]

#### 5.2.4. Genauigkeit des bei Airbus D&S verwendeten Tracking

##### Systems zur Verarbeitung von Mode S Daten

Airbus D&S betreibt ein Trackingsystem um die Qualität der Mode S Daten zu verbessern. Durch Anwendung Statistischer Methoden, wie dem Kalman – Filter, ist eine Genauigkeit bis zu 0,5° Kursabweichung und 2KT Geschwindigkeitsabweichung erreichbar.

#### 5.2.5. Fehlerquellen bei der Ableitung von Windrichtung und - Geschwindigkeit aus Mode S Daten

Beobachtungen zeigen, dass bei Flugmanövern mit engen Radien der abgeleitete Wind nicht repräsentativ für den herrschenden atmosphärischen Zustand ist.



*Abb. 5.2-1: Flugbahn eines Helikopters.  
Die Flugbahn ist mit dem weißen Pfeil nachgezeichnet. [vgl.: 40]*

Abb. 5.2-1 zeigt die Flugbahn eines Hubschraubers. Die Linien entlang der Flugspur zeigen die mit Mode S generierte Windrichtung (Orientierung der Linie) und - Geschwindigkeit (Länge der Linie). Beide Parameter ändern sich so willkürlich, dass die Messung nach meteorologischen Maßstäben nicht der Realität entsprechen kann (siehe 4). Ursächlich ist vermutlich die geringe Flughöhe des Hubschraubers oder seine Fähigkeit Seitwärts fliegen zu können. Im letzten Fall wäre das gemeldete „magnetic Heading“ des Hubschraubers unbrauchbar für die Windmessung mit Mode S. Um diesen Fehlerquellen vorzubeugen ist es empfehlenswert Drehflügler von der Windmessung auszuschließen.

[vgl.: 40]

### **5.2.6. Einfluss des Luftfahrzeugtyps auf die Windmessung**

Der DWD, das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover und die Abteilung Partikelchemie des Institut für Physik der Atmosphäre der Universität Mainz haben die Fehleranfälligkeit des AMDAR –Systems bei unterschiedlichen LFZ analysiert.

Für den Frankfurter Flughafen wurden 300 Landungen an 22 Tagen betrachtet. Die Daten wurden durch die regulären AMDAR – Einheiten an Bord der Deutschen Lufthansa – Maschinen aufgezeichnet. Insgesamt waren es sieben verschiedene Typen: Airbus A300, A319, A320, A330, A340 und Boeing B737, B747. Die AMDAR – Ausstattung und das Messverfahren war bei allen LFZ identisch. Die Datenrate betrug drei Datensätze pro Minute und die vertikale Auflösung wurde auf 50m interpoliert .Die Standardabweichung von Temperatur- und Windmessungen zeigten keine typspezifischen Auffälligkeiten.

Bei der geografischen Länge waren, für einige LFZ, systematische Abweichungen vorhanden, jedoch unauffällig. In Querrichtung war die Abweichung zu groß um eine abschließende Aussage zu treffen. Weitere Studien sind zur Klärung nötig und bereits in Planung. Da die Fehler nur im Luftfahrzeugs - Bezugssystem sichtbar sind wäre es übertrieben auf systemisch, typspezifische Fehler zu schließen

[vgl.: 41]

### **5.2.7. Verwendung von ModeS Daten in der numerischen Wettervorhersage**

Beim Hans-Ertel-Centrum für Weather Research an der LMU München wird momentan eine Promotionsarbeit im Fachgebiet „Atmospheric Data Assimilation“ erstellt. In diesem Rahmen wird ebenfalls die Qualität von Mode S Daten, als Datenquelle zur Modellrechnung innerhalb eines Wettervorhersagemodells (COSMO- DE) erforscht.

Für das Analysegebiet „Deutschland“ waren im Vergleich zu AMDAR 15mal mehr Daten verfügbar. Die höchste Messdichte befand sich im oberen Niveau zwischen FL300 und FL390. Zum Boden hin bildet das Messwertefeld eine Kegelform zu den Flughäfen hin aus. Die räumliche Verteilung ist äquivalent zu AMDAR.

Die Datenassimilation mit COSMO-KENDA („novel ensemble-based data assimilation system for the convective scale“) erstreckte sich über einen Zeitraum von 5 Tagen in Schritten von 1h. Als Referenzmessung wurden die Radiosondenaufstiege des DWD gewählt. Bei der Datenassimilation mittels COSMO-KENDA zeigte sich anhand des quadratischen Mittelwerts eine Verringerung der Vorhersage Fehler um 10% bis 20% in der

Höhe. Die Standardabweichung der Beobachtungsfehler der Windmessungen war bei Mode S um 10% höher, als bei AMDAR.

Mit Mode S Daten wurden Ensemble Vorhersagen\* um 09.00 UTC und 21.00 UTC mit einer Durchlaufzeit von 3h durchgeführt. Der Fehleranstieg der quadratischen Mittelwerte war bei allen Durchläufen ähnlich. Dem Anschein nach hing er mehr von der Messdichte als von der Messgenauigkeit ab. Die quadratischen Mittelwerte bei Verwendung von 50% und 100% der Mode S Daten glichen einander. Von einer Sättigung des Datenassimilationssystems ist folglich auszugehen. Letztendlich profitiert die Datenassimilation mit COSMO-KENDA von der Datendichte der Mode S Messungen. Eine Fehlerreduzierung ist vor allem im oberen Niveau gegeben. Im unteren Niveau, zum Boden hin, nehmen die Messwerte eine Kegelform zu den Flughäfen hin an. Zwischen den Kegel herrscht Datenarmut, andererseits ist der Flugplatzbereich sehr gut abgedeckt.

[vgl.: 42]

### **5.2.8. Studie über Wind- und Temperaturmessungen aus Mode S**

#### **Daten am Flughafen Schiphol in den Niederlanden**

Mit Hilfe des „Tracking and Ranging“ (TAR; Radar zur Luftraumüberwachung, Reichweite 270km, Abtastfrequenz 4s) am Flughafen Schiphol wurden Wind- und Temperaturmessungen aus Mode S Daten hinsichtlich ihrer meteorologischen Qualität geprüft. Pro Tag fallen  $1,5 \cdot 10^6$  Datensätze an. Numerische Wettervorhersagemodelle, AMDAR- Messungen und Radiosondenmessungen dienten als Vergleichswerte in einem Zeitraum von 12 Monaten.

Die Präzision der Windrichtungsmessung hängt von dem gemessenen LFZ - „Heading“ ab. Um die durchschnittliche Abweichung zu ermitteln kann kurz vor dem Aufsetzen des LFZ das gemeldete „Heading“ mit der Ausrichtung der Landebahn verglichen werden. Dieser Vergleich wurde 12 Monate lang für verschiedene LFZ in Schiphol durchgeführt. Es zeigte sich, dass ältere LFZ eine größere Abweichung besitzen als jüngere. Die Durchschnittliche Abweichung betrug zwischen 1-2 Grad. Manche LFZ zeigten nahezu keine Abweichung, während andere bis zu 3 Grad aufwiesen.

Für einen Zeitraum von einem Jahr fand ein Vergleich zwischen Mode S, AMDAR, Radiosonde und numerischer Wettervorhersage (NWP) statt. Die verwendeten Radiosondenmessungen (Station: De Bilt SNr. 06260) mussten zur korrespondierenden Mode S Messung maximal 20km Abstand, einen maximalen Höhenunterschied von 100 Fuß und

---

\*Ensemble Vorhersage >> Zusammenschau mehrerer Wettervorhersagen um die Vorhersageunsicherheit zu bestimmen

eine zeitliche Differenz von 120s aufweisen. Lagen mehrere Mode S Messungen im Bereich der Radiosonde vor wurde die mit dem geringsten Abstand gewählt. Beim Vergleich der Windgeschwindigkeit zeigte sich ein deutlicher positiver systematischer Fehler zwischen den Radiosondenmessungen und der numerischen Vorhersage über die gesamte Atmosphäre. Im mittleren Niveau war der systematische Fehler von Mode S nahezu Null, während er im oberen und unteren Niveau leicht positiv/ negativ war.

Die quadratischen Mittelwerte sind im unteren Niveau nahezu identisch. Zum oberen Niveau hin vergrößert er sich beim Vergleich Mode S  $\Leftrightarrow$  NWP und verkleinert sich beim Vergleich Mode S  $\Leftrightarrow$  Radiosonde. Bei der Windrichtung ist im unteren Niveau der systematische Fehler im Mode S Vergleich höher, als beim Vergleich numerische Wettervorhersage gegen Radiosonde. In der restlichen Atmosphäre sind die Werte annähernd gleich.

Der quadratische Mittelwert beim Vergleich Mode S  $\Leftrightarrow$  NWP verringert sich stark beim Übergang vom unteren in das mittlere Niveau. Im oberen Niveau steigt er wieder an. Vergleich Radiosonde  $\Leftrightarrow$  NWP und Vergleich Mode S  $\Leftrightarrow$  Radiosonde sind im mittleren und oberen Niveau gleich, Vergleich Radiosonde  $\Leftrightarrow$  NWP und Vergleich Mode S  $\Leftrightarrow$  NWP sind im unteren Niveau gleich.

	Radiosonde $\Leftrightarrow$ NWP	Mode S $\Leftrightarrow$ NWP	Mode S $\Leftrightarrow$ Radiosonde
Unteres Niveau	0,3	0,5	0,3
Mittleres Niveau	0,4	0	-0,3
Oberes Niveau	0,2	0,1	-0,3

*Tabelle 5.2-2: Systematischer Fehler der Windgeschwindigkeit im Vergleich zwischen den Messsystemen*

	Radiosonde $\Leftrightarrow$ NWP	Mode S $\Leftrightarrow$ NWP	Mode S $\Leftrightarrow$ Radiosonde
Unteres Niveau	2,2	2,1	2,1
Mittleres Niveau	2,5	2,4	2,4
Oberes Niveau	2,1	2,7	1,9

*Tabelle 5.2-3: Quadratischer Mittelwert der Windgeschwindigkeit im Vergleich zwischen den Messsystemen*

	Radiosonde ⇔ NWP	Mode S ⇔ NWP	Mode S ⇔ Radiosonde
Unteres Niveau	1	5	4
Mittleres Niveau	2	3	0,5
Oberes Niveau	3	3	0,5

*Tabelle 5.2-4: Systematischer Fehler der Windrichtung im Vergleich zwischen den Messsystemen*

	Radiosonde ⇔ NWP	Mode S ⇔ NWP	Mode S ⇔ Radiosonde
Unteres Niveau	20	20	16
Mittleres Niveau	16	10	16
Oberes Niveau	9	13	9

*Tabelle 5.2-5: Quadratischer Mittelwert der Windrichtung im Vergleich zwischen den Messsystemen*

Mode S Daten sind für die Assimilation in der Numerischen Wettervorhersage geeignet. Der Quadratische Mittelwert der Mode S Windgeschwindigkeitsmessung, verglichen mit der numerischen Wettervorhersage, beträgt 2,5 bis 6 m/s. Die Vorhersagequalität wird erheblich verbessert, auf 2,5 bis 4 m/s, wenn die Daten nach der Messung aufbereitet werden:

- Glättung für Mach Zahl und True Air Speed; 12s Intervall bei Start und Landung, 60s in Reiseflughöhe
- Mittelung der Windmessungen; 12s Intervall bei Start und Landung, 60s in Reiseflughöhe
- Korrektur der Missweisung des „Magnetic Heading“ für jeden Flugzeugtyp, idealerweise für jedes Flugzeug:
  - Bei jeder Landung Ermittlung der Missweisung für jedes Flugzeug und Eintrag in eine Datenbank

Nach der Aufbereitung ist die Datenqualität von Mode S vergleichbar mit AMDAR und nur leicht schlechter als die Radiosondenmessungen von De Bilt.

De Haan kommt zu dem Schluss, dass Windmessungen aus Mode S Luftverkehrsdaten eine wertvolle Quelle für die mesoskalige numerische Wettervorhersage und die Kurzfristvorhersage sind. Da die Daten permanent anliegen wären Produkte die den aktuellen Zustand der Atmosphäre zeigen in nahezu Echtzeit erzeugbar.

[vgl.: 43]

### **5.3. Zusammenfassung der Eignungsprüfung von Mode S**

#### **Daten zur Windbestimmung**

Die Erhebung der Windrichtung und – Geschwindigkeit anhand von Mode S Daten entspricht qualitativ den Anforderungen der WMO. Die gemessenen Größen genügen den in *Tabelle 3.5-1: festgelegte Toleranzen bei aerologischen Messungen*. Die Messfrequenz und die Abdeckung im Mode S System übertrifft die Messfrequenz und die Abdeckung in jedem aktuell verwendeten operationellen Messsystem. Im Vergleich zu AMDAR hat der LFZ Eigentümer keine Rechte an den von ihm gesendeten Daten. Er ist verpflichtet das an Bord befindliche System zu warten und während des Flugs zu aktivieren. Die Mode S Sensoren am Boden werden von den zuständigen Flugsicherungen betrieben. Sie decken den Luftraum zu 100% ab und das System ist nahezu ausfallsicher. Die Daten sind über einen Knotenpunkt (RMCDE) des Radarnetzes verfügbar. Der Datendurchsatz des Knotenpunktes ermöglicht eine Generierung des aktuellen Windfelds im Rahmen von 1min. Da die Daten Eigentum der jeweiligen Flugsicherung sind ist zu klären unter welchen Bedingungen sie verwendet werden können. In mehreren Studien wurde bereits die Datenqualität von Mode S Windmessungen und die einfließenden Parameter des LFZ verifiziert und mit anderen Messungen verglichen. (Siehe, 5.2.6, 5.2.7, 5.2.8)

Zahlreiche Studien belegen die qualitative Vergleichbarkeit der Mode S Messungen mit anderen operationellen meteorologischen Produkten. Die Verwendbarkeit und der Nutzwert in der numerischen Vorhersage wurden ebenfalls bereits verifiziert. Mode S Messungen sind kein Ersatz sondern eine Ergänzung bestehender Messungen. Sie verbessern die Qualität und Aussagekraft operationeller Systeme merklich. Als Nebenprodukt der Luftüberwachung sind alle notwendigen Systeme bereits vorhanden und die Daten müssen lediglich „abgeholt“ und der meteorologische Gehalt extrahiert werden.

## **6. Praktische Studien zum Nachweis der Qualität und Anwendbarkeit von Luftverkehrsdaten basierten Windmessungen in der operationellen Meteorologie**

### **6.1. Bereitstellung von Windrichtung und - Geschwindigkeit aus Mode S Daten am 05.05.2015 ab 12.00 UTC für Deutschland aus meteorologisch synoptischer Sicht**

#### **6.1.1. Synoptische Lage für den 05.05.2015**

Am 05.05.2015 befindet sich Mitteleuropa vorderseitig eines Langwellentrogens der sich von den Shetland Inseln bis in den Golf von Biskaya erstreckt. Über Mittel- bis Osteuropa wird warme, instabile, subtropische Luft advehiert. Wetterbestimmend für Deutschland ist ein Tief (Kerndruck 985hPa) mit dem Zentrum über den Britischen Inseln. Aufgrund der Achsneigung wird es sich im Laufe des Tages weiter verstärken. Die zugehörige Kaltfront überquert Deutschland in der zweiten Tageshälfte. Entlang der Bodenfront bewegt sich der Kern des Jetstream mit bis zu 130KT in 10km Höhe über MSL von Südwest nach Nordost. Am Okklusionspunkt dreht er, im Bereich der Ostsee, nach Osten ein. Leichte Diffluenz und zunehmende Kaltluftadvektion im Bereich des Okklusionspunktes labilisieren die Luftschichten im Bereich der Nord- und Ostsee. Im Süden, an den Alpen, bilden sich Föneffekte mit Leewellen und eingebetteter Turbulenz. Im Norden Deutschlands ist örtlich mit starken Gewittern mit Sturmböen zu rechnen. Nach dem Frontdurchgang staut sich dort die Bewölkung mit anhaltenden Niederschlägen.

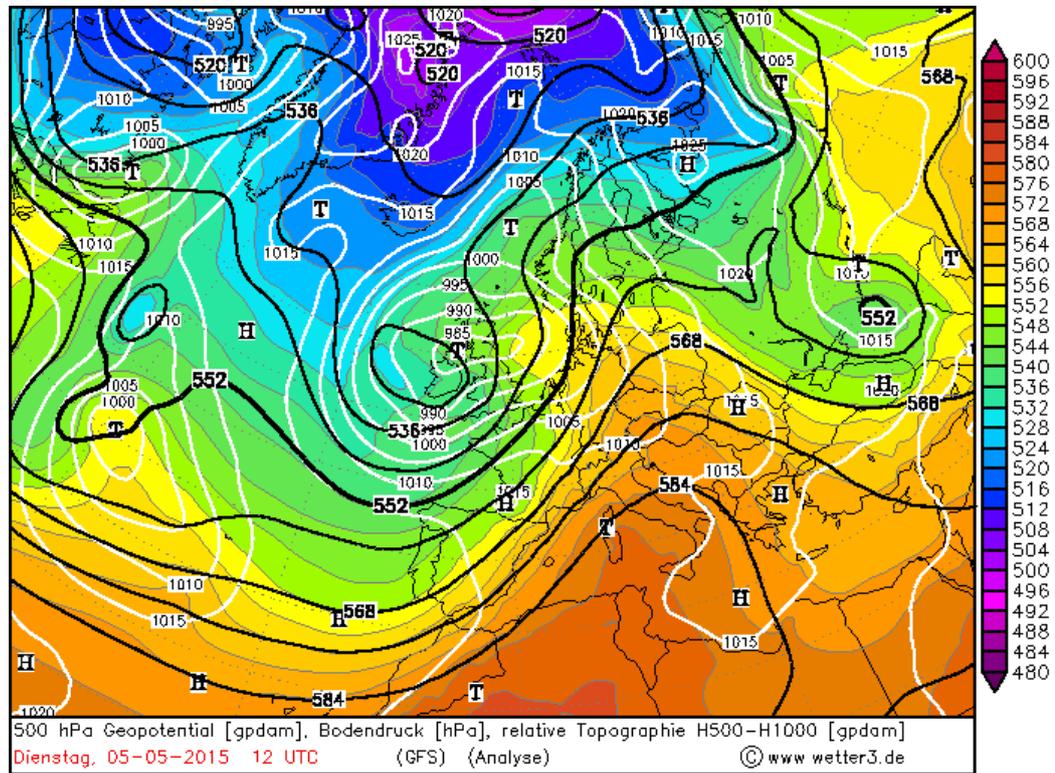


Abb. 6.1-1: relative Topografie 500/1000 gpdam (farblich als Isoflächen); Bodendruck in hPa und 500 hPa Druckfläche in gpdam (als Isolinien); Druckzentren; Modell GFS; Durchlauf 12.00 UTC; Ausschnitt EU; [vgl.: 19]

### 6.1.2. Beschreibung des Messgebiets, Deutschland aus meteorologischer Sicht

Deutschland liegt in Mitteleuropa innerhalb der Westwindzone im Einflußgebiet der Polarfront. Laut der Klimaklassifikation von Köppen & Geiger [vgl.:27] ist es vollständig der Klimazone Cfb zugeordnet. „C“ ordnet Deutschland den warmgemäßigten Klimaten zu, „f“ beschreibt den immerfeuchten Charakter des Jahresverlaufs und „b“, warmer Sommer, gibt den heißesten Monat als durchschnittlich  $<22^{\circ}\text{C}$  an. Bei dem letzten Punkt geht die Tendenz in den letzten Jahren in Richtung „a“, heißer Sommer, mit einem Monatsdurchschnitt von  $>22^{\circ}\text{C}$ . Aufgrund seiner Lage befindet sich Deutschland zwischen den maritimen Einflüssen des Golfstroms westlich und dem Kontinentalklima östlich. Das Donaubecken ist am markantesten kontinental beeinflusst. Im Norden ist, neben dem Küstenbereich, hauptsächlich Flachland zu finden. Richtung Süden wird die Orographie zunehmend ausgeprägter. Sie geht langsam in die Mittelgebirge über um im südlichsten Teil mit den Alpen abzuschließen. Mit zunehmender Ausprägung der Orographie nehmen ebenfalls die Leeeffekte zu. Innerhalb von Deutschland finden jeden Tag zwei Radiosondenaufstiege, um 00.00 UTC und 12.00 UTC, bei jeder der insgesamt 9 Stationen statt.

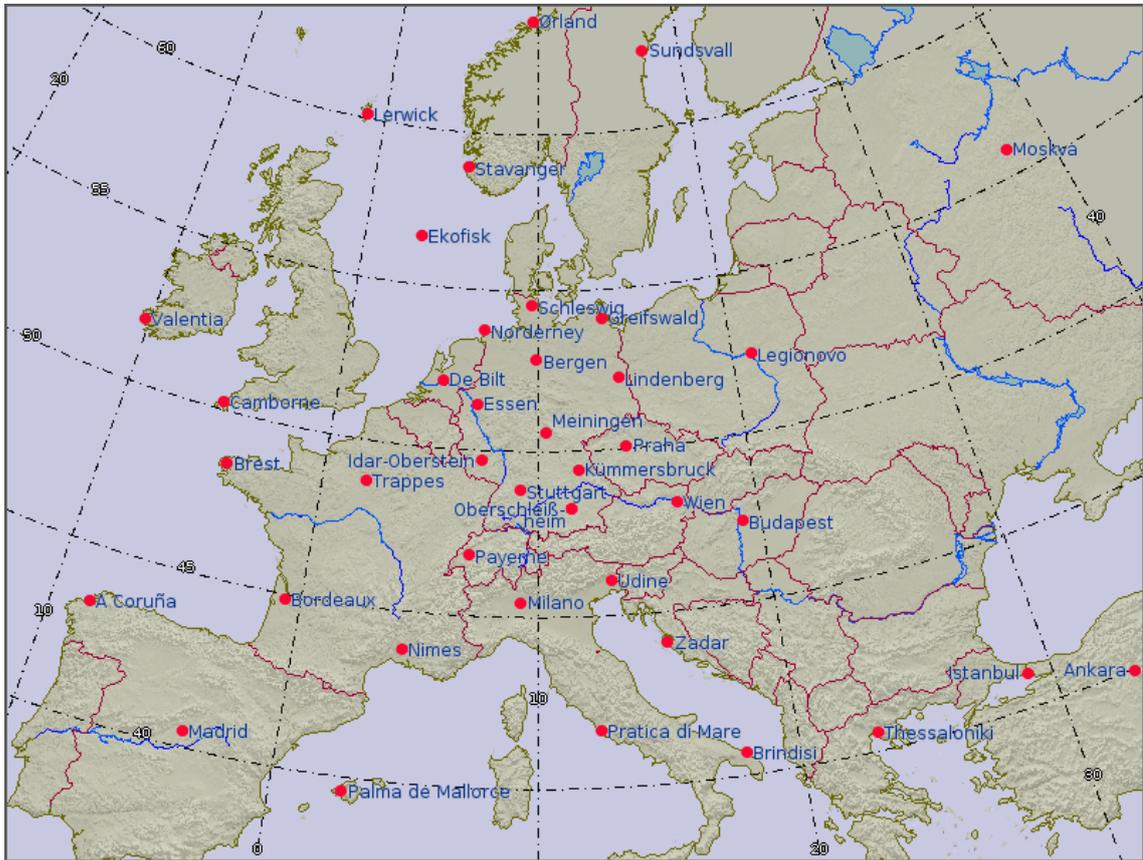


Abb. 6.1-2: Radiosondenstationen In Europa; [vgl.: 33]

### 6.1.3. Flugbewegungen im deutschen Luftraum am 05.05.2015

Es existiert keine Statistik, der man das Flugverkehrsaufkommen eines Tages entnehmen kann. Die kleinste verfügbare Auflösung sind Kalenderwochen. Der o.g. Termin liegt in der Kalenderwoche 19. In dieser Woche fanden 61956 Flüge, nach Instrumentenflugregel (IFR), über Deutschland statt. Die Anzahl der Flüge geteilt durch die Wochentage sind 8851 Flüge pro Tag. Angenommen jedes LFZ verweilte ca. 2h im deutschen Luftraum so errechnen sich 17702 Flugstunden. Bei einer durchschnittlichen Abtastfrequenz von 6s, durch das Flugsicherungsradar, ergeben sich für den Tag 21242400 Datensätze. Da genaue Zahlen nicht belegt sind handelt es sich lediglich um eine grobe Schätzung. Sie dient dazu sich eine Vorstellung über das Potential der Mode S Messungen zu machen.

[vgl.: 17]

## **6.1.4. Charakterisierung des Windfelds über Deutschland am**

**05.05.2015**

### **6.1.4.1. Synoptische Erklärung der witterungsbedingten atmosphärischen Vorgänge**

Am 05.05.2015 beherrscht die frühjährliche Witterung das Wettergeschehen in Deutschland. Am 20. März 23:45 MEZ (Äquinoktium) überschreitet das Zenit der Sonne den Äquator. Durch die täglich zunehmende Strahlungsbilanz erwärmt sich die Nordhalbkugel. Die Hadley und Ferrel Zellen [vgl.:31, S 122] beginnen sich nach Norden zu verlagern. In Folge dessen wandert die Polarfront ebenfalls nach Norden. An ihr schiebt sich die warme Luft (subtropische Luftmasse) stärker über die kalte Luft der polaren Zelle. Das Wettergeschehen nimmt zu. Der wärmer werdende Golfstrom erwärmt zusätzlich den Europäischen Kontinent und sorgt im Atlantik für eine Verstärkung der Druckzentren. Infolge dieser Vorgänge nehmen die Anzahl der planetarischen Wellen und ihre Amplituden zu. Der an der Polarfront entlang fließende Polarfront – Jet fließt mit zunehmender Geschwindigkeit.

### **6.1.4.2. Betrachtung des Windfelds ab 12.00 UTC anhand der Windkarten für die Verkehrsluftfahrt des DWD**

Der Deutsche Wetterdienst bietet auf seinem Internetauftritt „www.pcmet.de“, zur meteorologischen Beratung von Flugvorhaben, Unterlagen für die Verkehrsluftfahrt an (siehe Anhang *Abb. 9.1-1* *Abb. 9.1-2* *Abb. 9.1-3* *Abb. 9.1-4* *Abb. 9.1-5*). Diese Unterlagen werden vom „WAFC London“ täglich zweimal zur Verfügung gestellt. Sie sind 24h gültig und werden um 12.00 UTC und 00.00 UTC herausgegeben. Die Windkarten sind für verschiedene Höhenstufen von FL050 bis FL530 verfügbar. Sie enthalten die Windrichtung, - Geschwindigkeit und die Lufttemperatur. Da es sich um das Standardprodukt zur Planung von Flugvorhaben der Verkehrsluftfahrt handelt, werden diese Daten als Referenz gesetzt. Bei den Produkten handelt es sich um numerische Modellvorhersagen deren Grundlage aerologische und AMDAR Messungen sind.

Oberhalb von FL100 ist über Deutschland eine Translation von SW nach NO mit hohen Windgeschwindigkeiten erkennbar. Im Bereich der Ostsee beginnt die Strömung leicht diffluent zu werden. Unterhalb von FL100 besitzt das Windfeld eine stärkere Nordausrichtung und Translation ist weniger deutlich ausgeprägt. Orographische Effekte sind eine mögliche Ursache. Der Wind dreht sich mit der Höhe nach links. Im Bereich Deutschlands findet folglich Kaltluftadvektion statt. Die Jetachse befindet sich ebenfalls über Deutschland. Sein

Kern mit Windgeschwindigkeiten bis maximal 130KT liegt im Bereich FL300 über Frankreich.

### **6.1.5. Erzeugung von Kartenprodukten aus Mode S Daten vom 05.05.2015, 12.00 – 12.30UTC**

#### **6.1.5.1. Datenbezug und Verarbeitung der Mode S Daten**

Das Messgebiet ist der Luftraum der Bundesrepublik Deutschland. Mode S Daten aus dem operationellen Betrieb der Flugsicherung sind die Datengrundlage zur Generierung der Windmessungen. Sie stammen aus einem dem SURNET zugehörigen RMCDE und werden durch die Abteilung „Airspace Control Applications“ der „Airbus Defence & Space“ zur Verfügung gestellt. Die gesamte Datenaufzeichnung beinhaltet die Kalenderwoche 19/ 2015 bis einschließlich Donnerstag. Aus meteorologischer Sicht ist die Wetterlage am Dienstag (05.05), in der zweiten Tageshälfte, am komplexesten. Die aus der Datengrundlage generierten meteorologischen Aussagen umfassen den Zeitraum von 12.00 UTC bis 22.00 UTC. Die zeitliche Auflösung beträgt 30min und es ergeben sich pro Höhengniveau 20 Karten. Insgesamt sind die Daten auf fünf Höhengniveaus reduziert. Zusätzlich zu Windrichtung , - Geschwindigkeit und Höhe der Messung liegt die Messdichte pro Gitterpunkt vor.

#### **6.1.5.2. Generierung von Windrichtung und - Geschwindigkeit aus Mode S Daten**

Windrichtung und -Geschwindigkeit des Höhenwinds sind vektoruell aus Luftraumüberwachungsdaten erzeugbar (siehe 3.5.3.4). Es muss nur der der wahre Steuerkurs (True Heading), die Geschwindigkeit in der Luft (True Airspeed), der Kurs über Grund (True Track Angle) und die Geschwindigkeit über Grund (True Track) bekannt sein. Mode S überträgt True Heading und die True Airspeed des LFZ. Das Tracking System berechnet aus den Sensordaten den True Track Angle und den True Track.

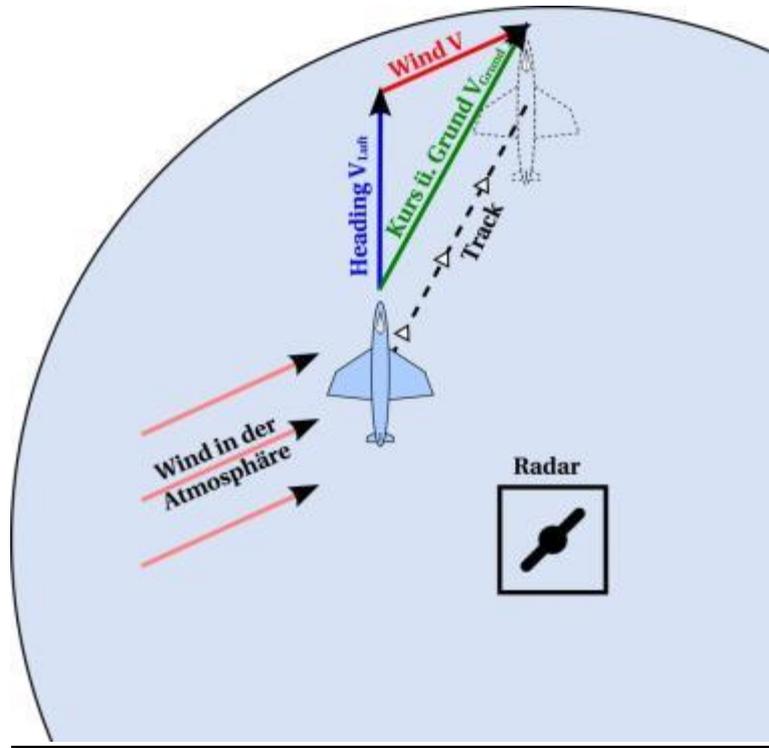


Abb. 6.1-3: Vektorielle Ermittlung des Höhenwinds mit Hilfe von Luftverkehrsdaten

Es gilt:

$$\vec{V}_{\text{Wind}} = \vec{V}_{\text{Grund}} - \vec{V}_{\text{Luft}}$$

(Siehe 3.5.3.4 Windrichtung und - Geschwindigkeit:)

## 6.1.6. Deterministisches Verfahren zur Generierung einer kontinuierlichen Fläche

### 6.1.6.1. Eigenschaften der Windmessung anhand von Luftverkehrsdaten

Bei jährlich 2980437 Flügen mit einer Abtastfrequenz von durchschnittlich 4 – 6s ergibt sich eine beachtliche Menge an Winddaten. Leider sind die Werte nicht homogen verteilt. Innerhalb des Windfelds in der freien Atmosphäre gibt es keine abrupten Sprünge oder Abbrüche. Windgeschwindigkeit und Richtung verändern sich langsam in jede Richtung. Das Windfeld ist aus kleinräumiger Sicht nahezu homogen. Die Ähnlichkeit der benachbarten Werte ist umgekehrt proportional zu ihrer Entfernung.

Im Gegensatz zu klassischen Messmethoden bewegt sich das „Messgerät“ Luftfahrzeug. Aus dreidimensionaler Sicht findet keine Messung zur selben Zeit am selben Ort statt. Die Messensoren (am LFZ) sind ständig in Bewegung (bis zu Mach 0,8). Um der Problematik

der inhomogenen Abtastung und des bewegten Messgeräts gerecht zu werden ist es sinnvoll die Daten in ein Raster zu interpolieren. Im Betrachtungsgebiet werden nun stetig interpolierte Werte berechnet.

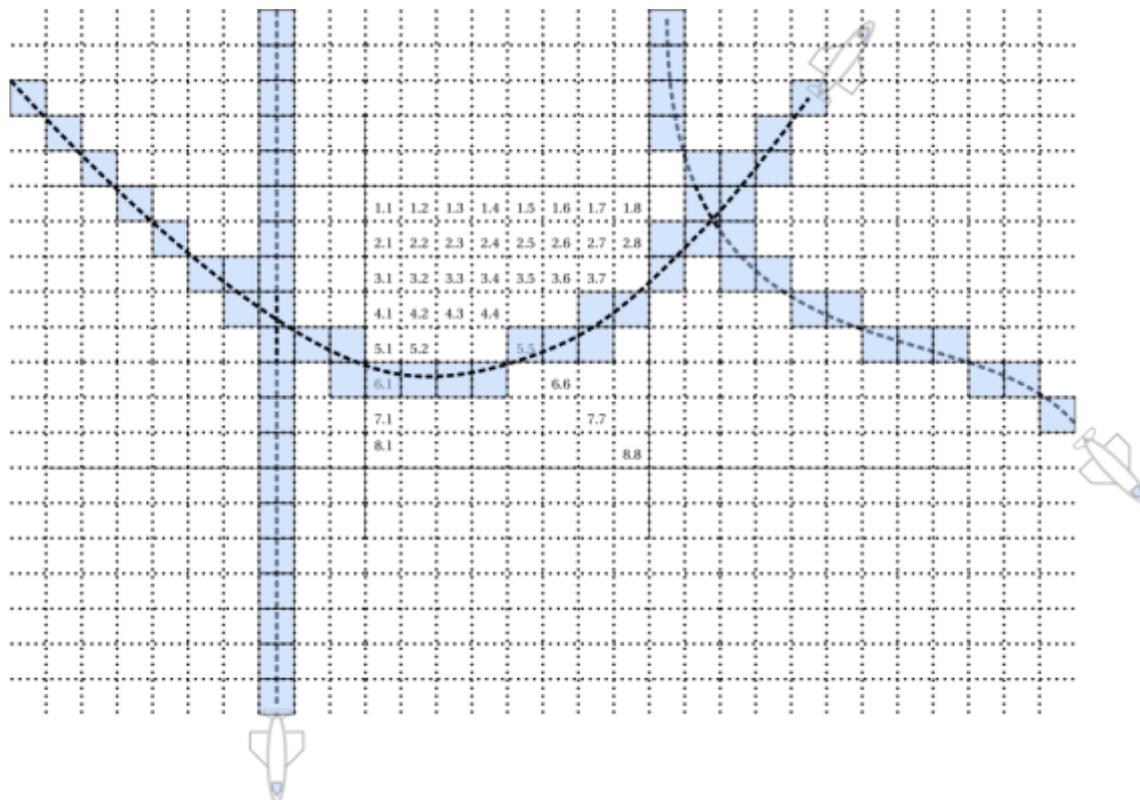


Abb. 6.1-4: Beispiel für Flugbewegungen innerhalb von 30min in einem Gebiet

#### 6.1.6.2. Festlegung der zu berechnenden Höhenstufen

Für die Analyse der einzelnen Höhenstufen empfiehlt sich folgende Staffelung. Messwerte die zwischen den Höhenstufen liegen sind einer Höhenstufe zugeordnet. Für die Analyse der Messwerte ist die Troposphäre in die Hauptdruckflächen [vgl.: 31, S48, 5.6.3], analog zur klassischen Analyse der aerologische Aufstiege, aufgeteilt.

	<b>Luftdruck in hPa</b>	<b>Flight Level (FL) in Hektokuß</b>	<b>Wertebereich (h = Referenzhöhe, Höhe in FL)</b>
<b>h1</b>	850	050	$000 \leq h \leq 075$
<b>h2</b>	700	100	$075 \leq h \leq 150$
<b>h3</b>	450	200	$150 \leq h \leq 250$
<b>h4</b>	300	300	$250 \leq h \leq 350$
<b>h5</b>	180	400	$350 \leq h \leq \infty$

Tabelle 6.1-1: Zuordnung des Wertebereichs der Mode S Messungen zu Höhenstufen

### 6.1.6.3. Räumliche Interpolation mit Hilfe eines Rasterverfahrens

Jede Messung beinhaltet die Höhe, die Zeit, VX(Ost) und VY(Nord). Für das festgelegte Intervall, einer halben Stunde, ist auch die Anzahl der Messwerte bekannt.

Zur räumlichen Interpolation der Messdaten ist ein Gitter mit der Zellengröße 2800 x 2800m für das Messfeld festgelegt. Jede Zelle enthält 64 Teilzellen mit der Zellgröße 350 x 350m. Die Daten innerhalb der Teilzellen sind gemittelt. Die Mittelwerte sind entsprechend ihrer Entfernung zum Mittelpunkt der Gitterzelle gewichtet.

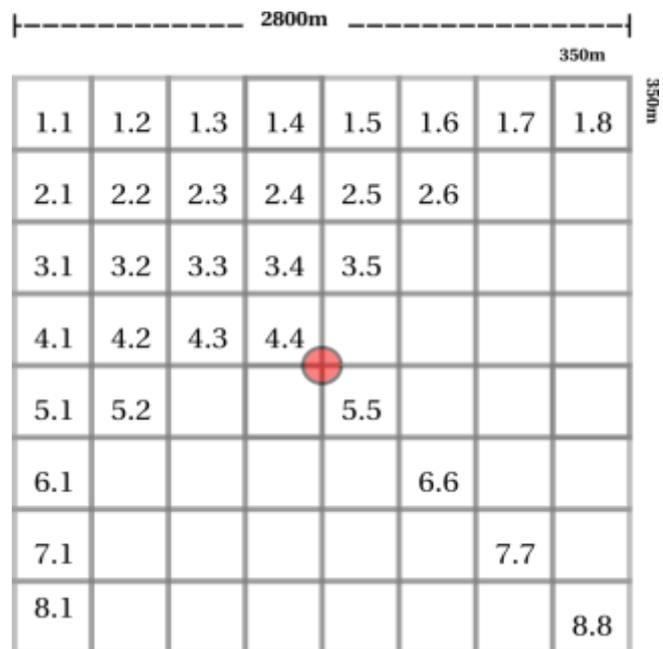


Abb. 6.1-5: Aufteilung einer Gitterzelle in 64 Teilzellen

Es gilt:

$$\text{Gewicht } G = \frac{1}{\text{Distanz zur Mitte} + 350m}$$

Im zeitlichen Verlauf, innerhalb einer halben Stunde, wird für jede neue Messung folgender Algorithmus durchlaufen:

$$\text{Mittelwert der Teilzelle} = \frac{(\text{alter Mittelwert} \cdot \text{altes Gewicht} + \text{Neuer Wert})}{\text{altes Gewicht} + 1}$$

Um die Anzahl der Messwerte innerhalb einer Teilzelle zu würdigen gilt:

$$\text{Neues Gewicht} = \text{altes Gewicht} + 1$$

Nach Ablauf einer halben Stunde liegen alle Mittelwerte aus den 64 Teilzellen vor. Ihre Gewichtung ergibt sich aus dem Abstand zum Zellmittelpunkt (Berechnungspunkt).

Es gilt:

$$\text{Gewicht } G = \frac{1}{\text{Abstand zur Mitte} + 350m}$$

Die Aufsummierung der Teilzellen findet, für jeden Mittelwert, nach folgendem Prinzip statt:

$$\text{Neuer Mittelwert} = \frac{\text{alter Mittelwert} * \text{altes Gewicht} + \text{neuer Wert} * G}{\text{altes Gewicht} + G}$$

$$\text{Neues Gewicht} = \text{altes Gewicht} + G$$

#### 6.1.6.4. Auffüllen von Datenlücken

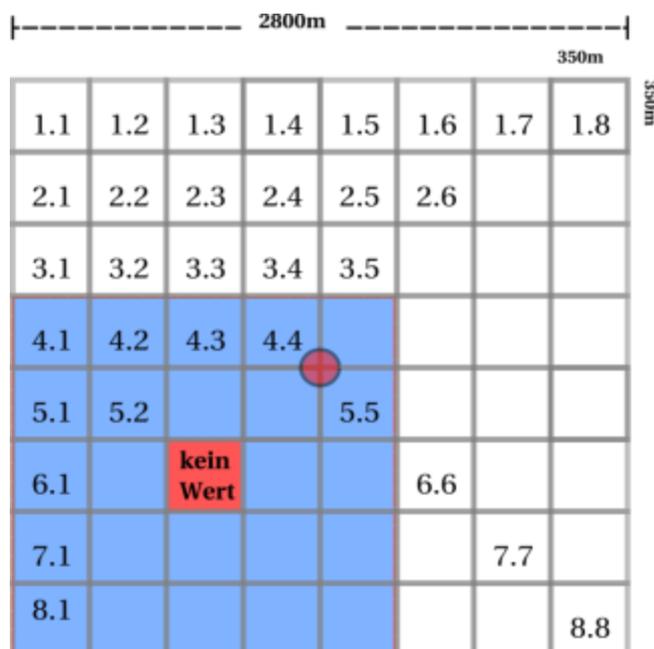


Abb. 6.1-6: Umgebung aus der, der gewichtete Wert für die nach 30 min nichtbesetzte Zelle generiert wird

Liegt für eine Teilzelle kein Messwert vor wird ihr ein Wert zugewiesen. Dieser ist aus dem gewichteten Mittelwert der 24 umliegenden Nachbarzellen errechnet. Der zugehörige Gewichtswert wird durch die Anzahl der in diesem Schritt verarbeiteten Teilzellen geteilt (25).

$$\text{Wert} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \text{Nachbarzelle} * \frac{G}{25}}{24}$$

#### 6.1.6.5. Festlegung des Zeitraums zur Mittelwertbildung

Für jede Teilgitterzelle wird alle 30min ein Mittelwert berechnet. Somit ist jedes Luftfahrzeug, das die Teilgitterzelle innerhalb einer Zeitspanne von 30min durchflog, erfasst, unabhängig vom eigentlichen Messzeitpunkt. In den betrachtenden geografischen Breiten sind die signifikanten Schwankungen des Windfelds zeitlich selten kleiner als eine halbe Stunde. Lediglich Gewitter, Kata – Kaltfronten und Kurzwellenträge sind in der Lage das Windfeld kurzfristig an einem Ort zu modifizieren da sie sich schnell bewegen. Eine halbe Stunde ist

gemessen an der höchsten zeitlichen Modellauflösung (COSMO – DE mit 1h) doppelt so hoch aufgelöst. In wie weit das sinnvoll ist kann in weiteren Untersuchungen ermittelt werden. Hier ist nur gezeigt, dass aufgrund der hohen Datenfrequenz und Abdeckung von Messungen zeitlich feine Auflösungen möglich sind. In manchen Gebieten (Flugfeld) sind, bedingt durch die höhere Messdichte, innerhalb einer halben Stunde noch feinere und aussagekräftigere Auflösungen erzielbar.

### **6.1.7. Erstellung der Kartenprodukte mit dem Geoinformationssystem QGIS**

Das interpolierte quadratische Raster der Messdaten hat eine Gitterlänge von 2,8km und liegt als „.csv“ mit dem folgenden inhaltlichen Aufbau vor:

- geographische Breite, Länge (in WGS84)
- Windrichtung in Grad
- Windgeschwindigkeit in Knoten
- Höhe in m über MSL
- Messdichte in Messungen pro Gitterpunkt

Um die Erkennbarkeit der Messungen zu verbessern ist das Rastergitter um den Faktor 3 vergrößert. Andernfalls ist die Windrichtung, auf Din A4, nicht erkennbar.

Die internationalen Flughäfen der BRD und die für die Flugstreckenberatung relevanten Militärflughäfen liegen ebenfalls als „.csv“- Datei (Inhalt: „Position“ und „Bezeichnung“) vor.

Die nachfolgenden Kartenprodukte sind mit Hilfe von QGIS erstellt. Die Daten sind als „.csv“- Dateien importiert. Als Hintergrund ist die „world.shp“ [vgl.:28] eingebunden. Die Karten stellen das Windfeld des jeweiligen Höhenniveaus dar. Die Windrichtung ist als „Vektorfeldmarkierung“ auf 5° gerundet in Grad dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten sind gemäß der Colorierungsvorschrift des DWD als eingefärbter Punkt visualisiert. Da kein Anschlussmodell zur Verfügung steht sind die Daten zu den Rändern hin verfälscht. Dieser Effekt ist in den folgenden Karten als streifenförmige Struktur an den Rändern zu erkennen. Um die Datenqualität über Deutschland sicherzustellen ist ein ausreichend großes Messfeld dargestellt, welches die deutschen Grenzen großzügig überlappt.

6.1.7.1. Aus Mode S generierter Datensatz des Intervalls, 12.00 UTC bis 12.30 UTC

Darstellung und synoptische Interpretation der Windrichtung und - geschwindigkeit für die einzelnen Höhenstufen:

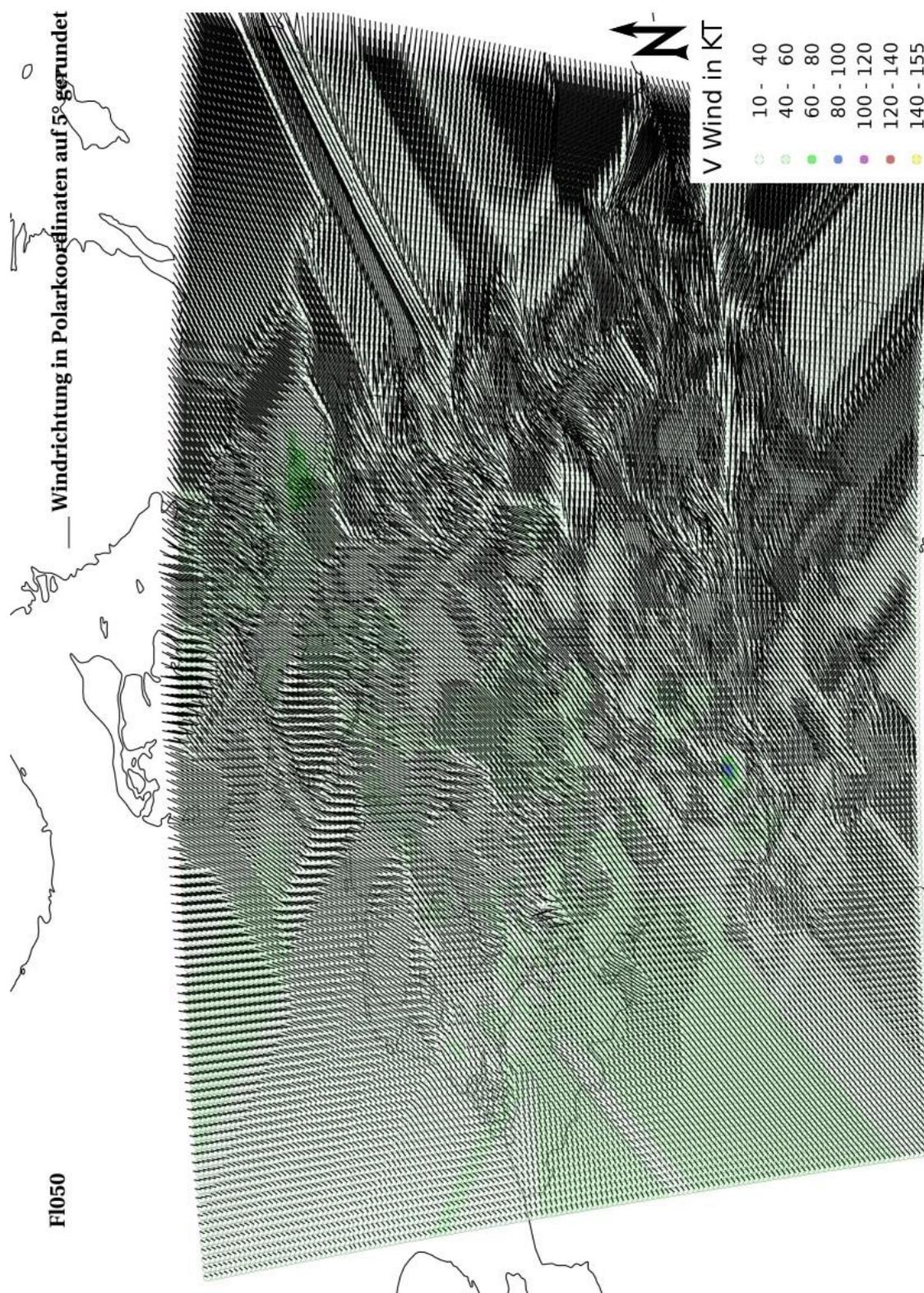


Abb. 6.1-7: h1, FL050, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende

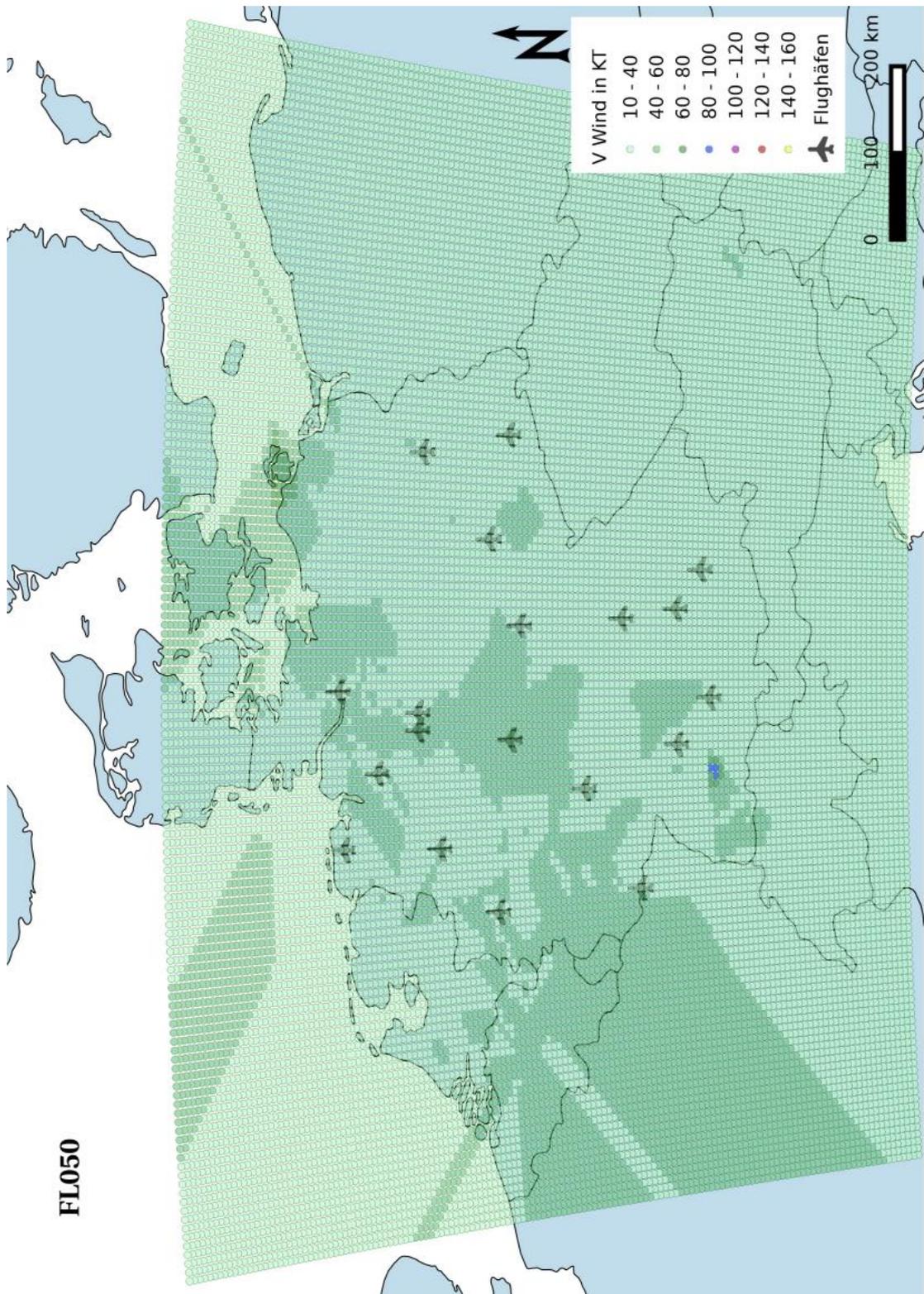


Abb. 6.1-8: h1, FL050 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD

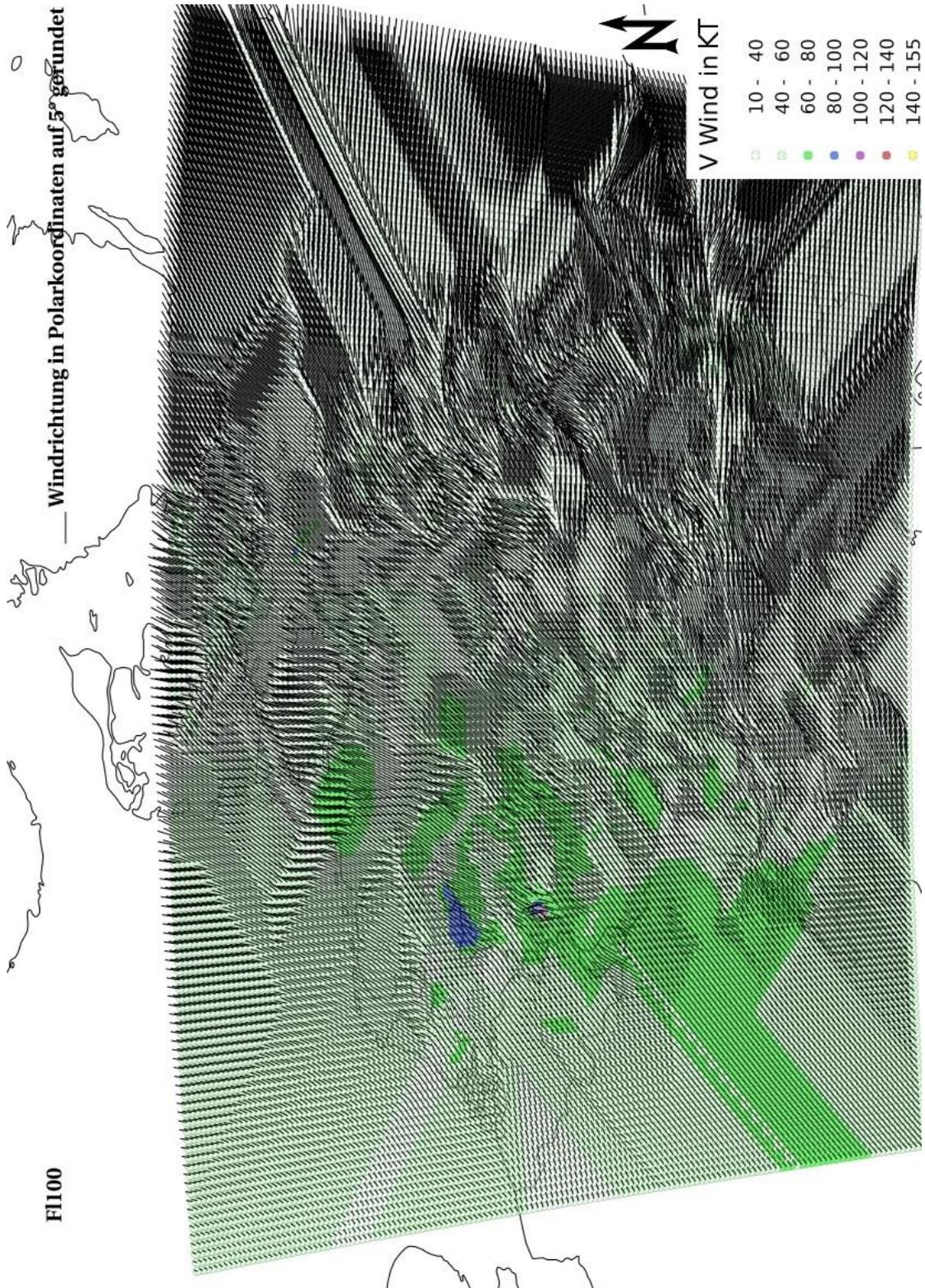


Abb. 6.1-9: h2, FI100, Maßstab: 1:3 500 000 Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende

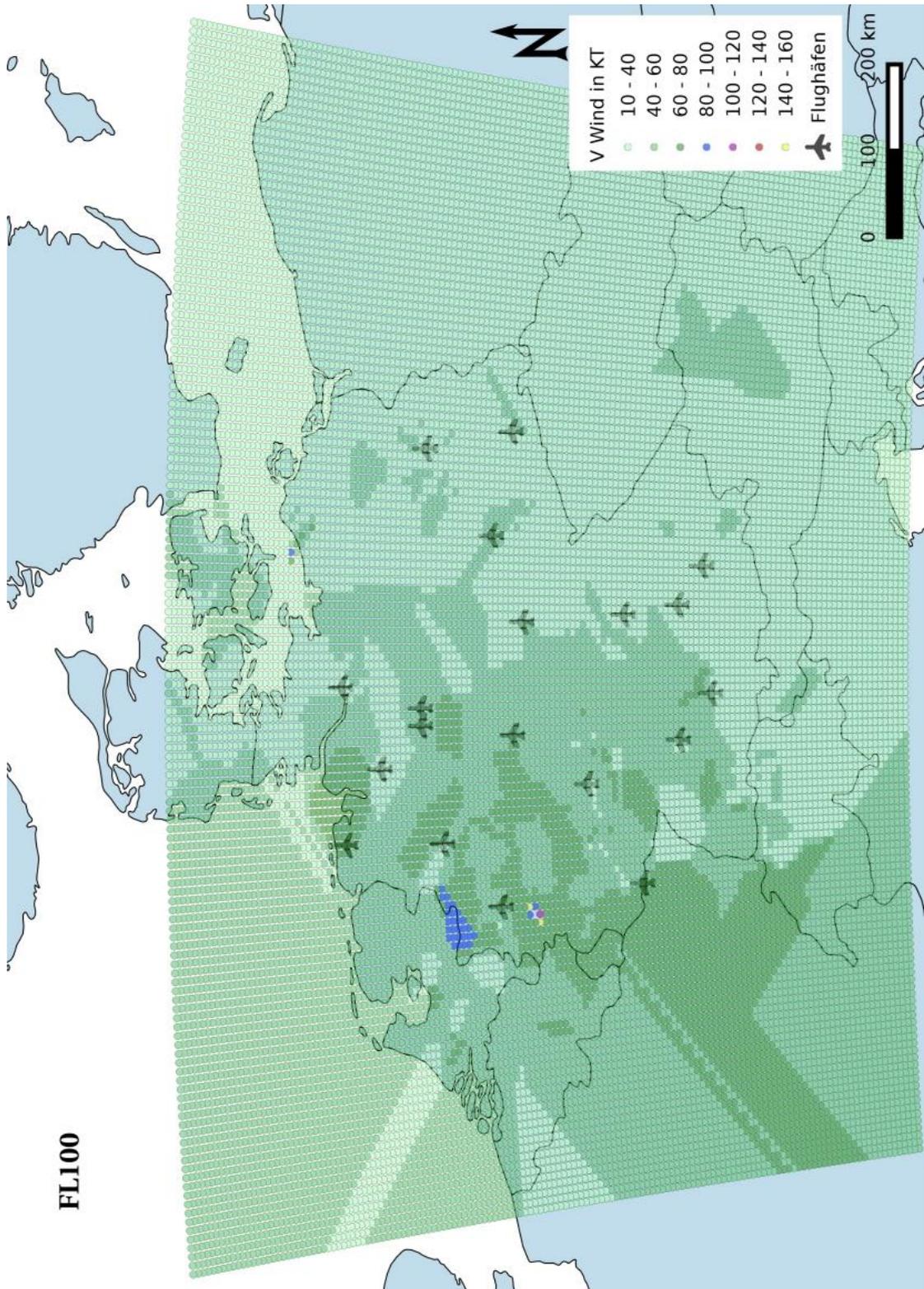


Abb. 6.1-10: h2, FL100 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsforschrift DWD

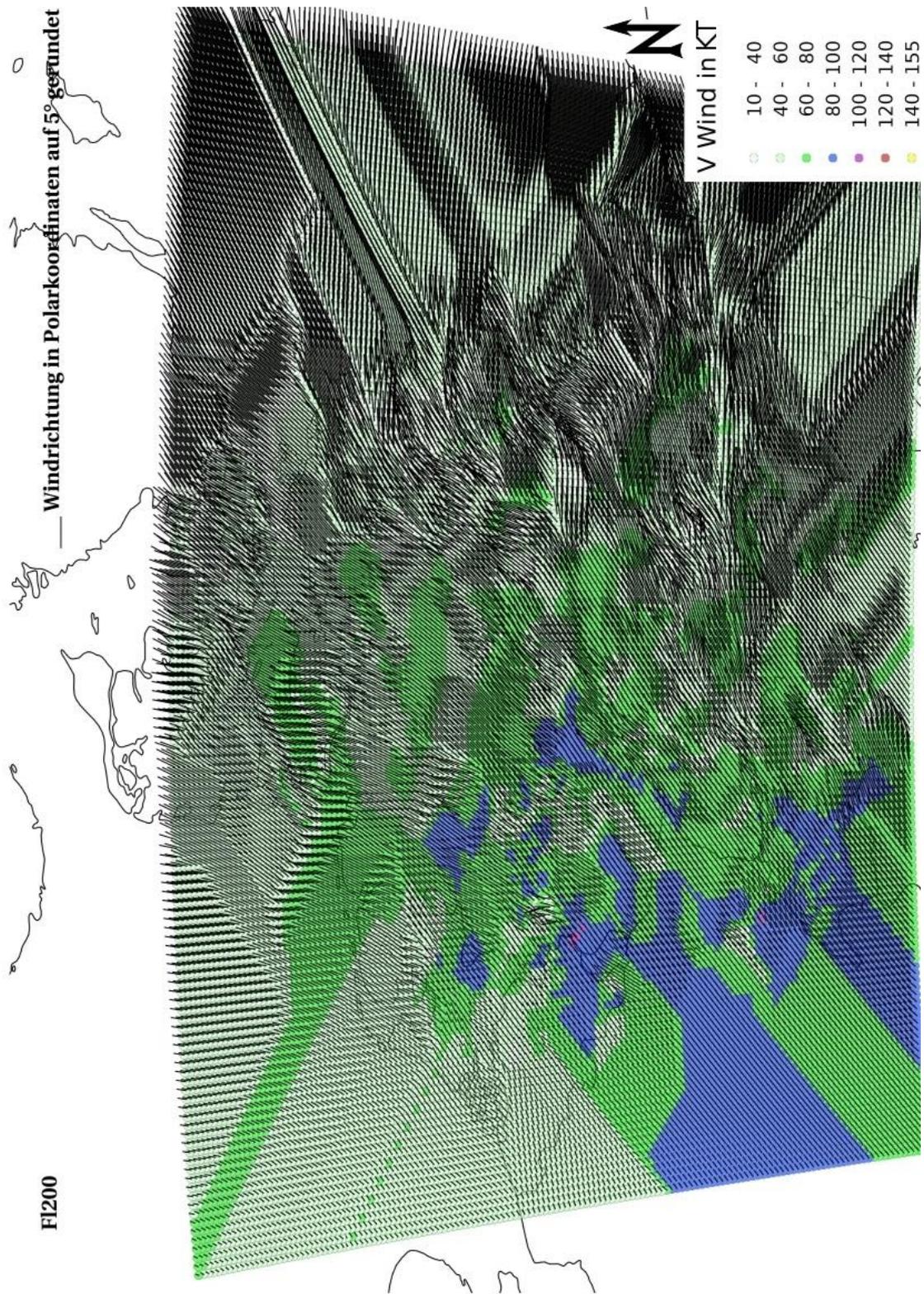


Abb. 6.1-11: h3, FL200, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende

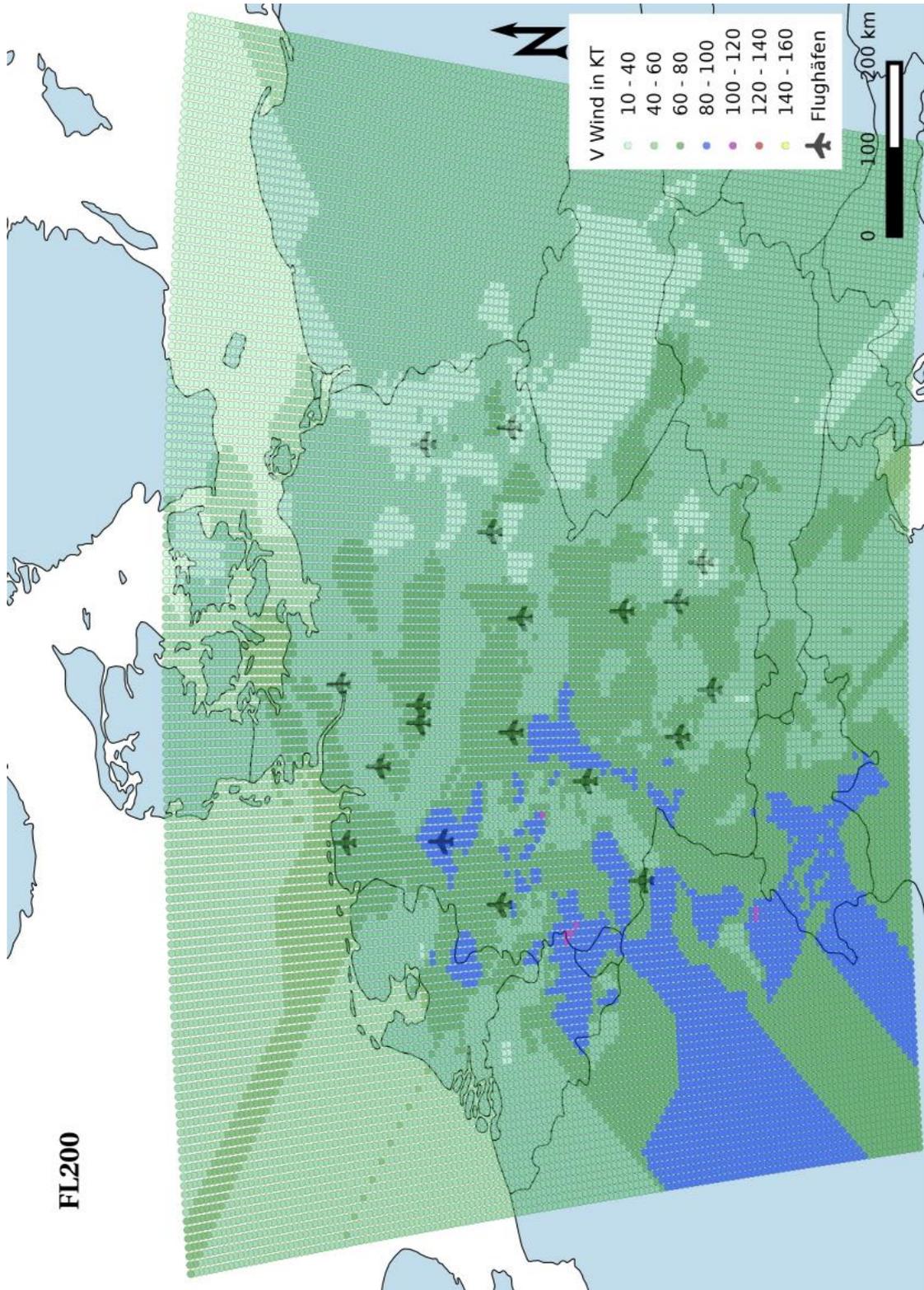


Abb. 6.1-12: h3, FL200 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD

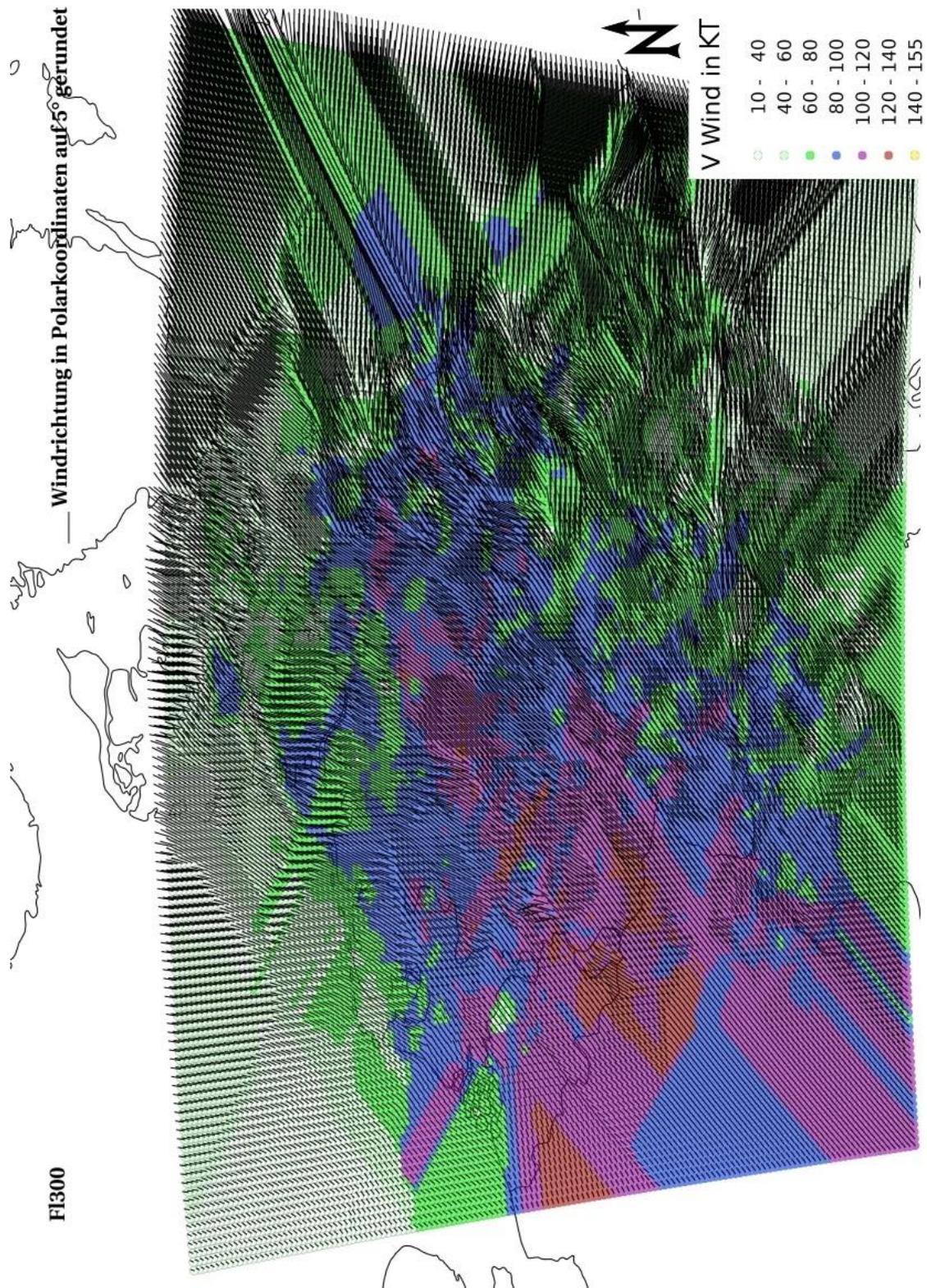
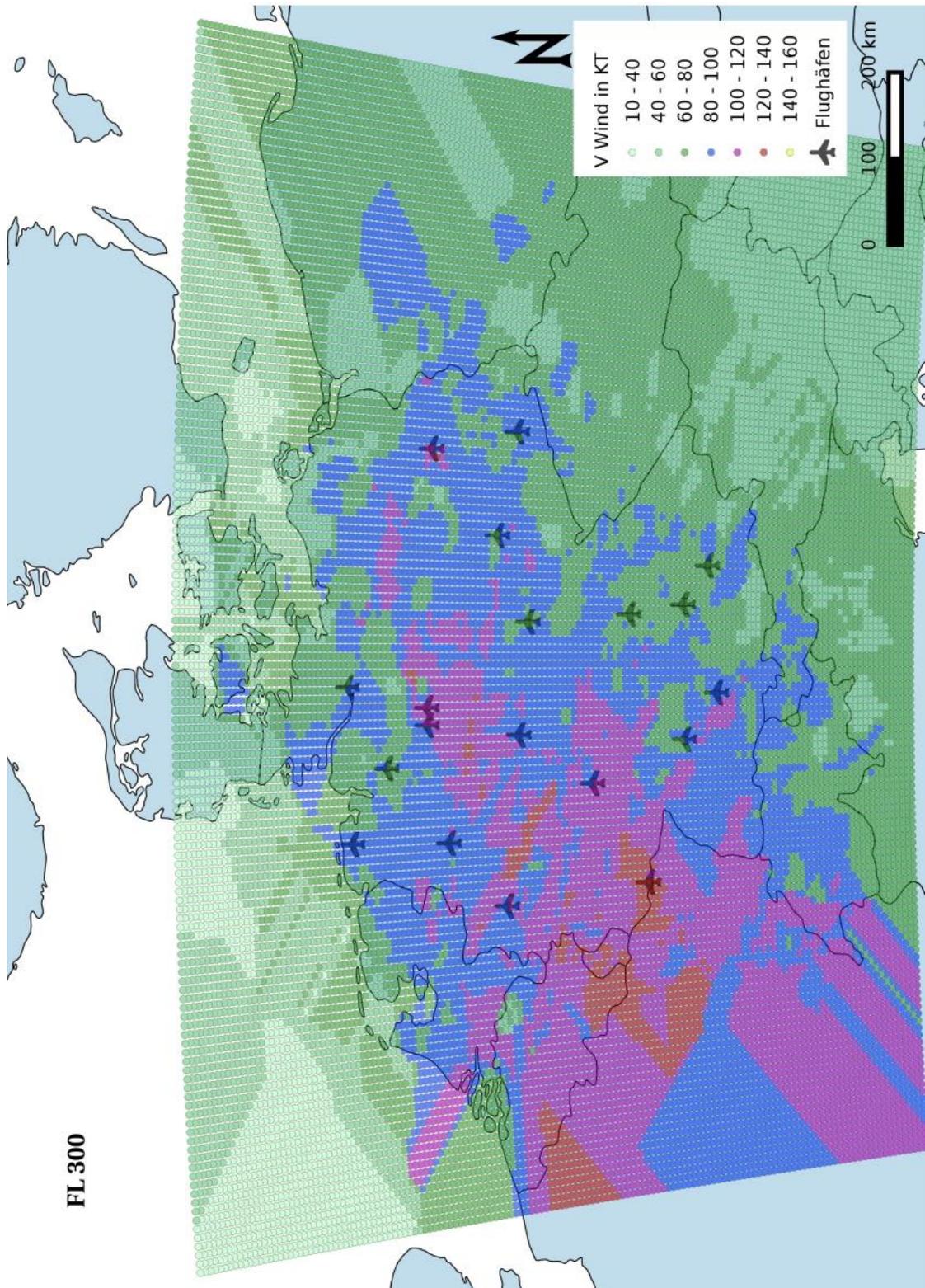


Abb. 6.1-13: h4, FL300, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende



FL 300

Abb. 6.1-14: h4, FL300 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD

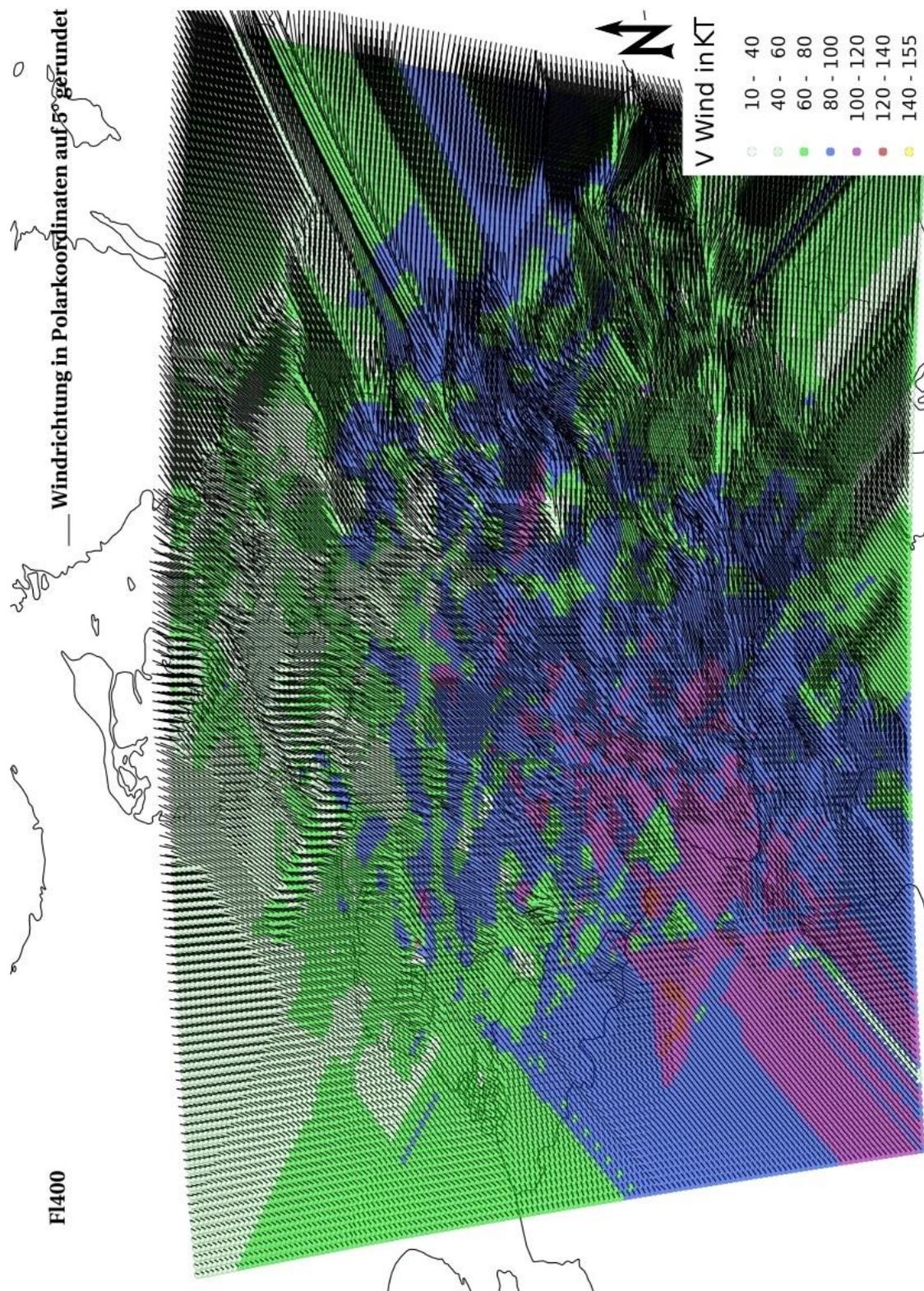


Abb. 6.1-15: h5, FL400, Maßstab: 1:3 500 000, Darstellung des Windfelds in Grad auf 5° gerundet und der Windgeschwindigkeit farblich gemäß Colorierungsvorschrift DWD siehe Legende

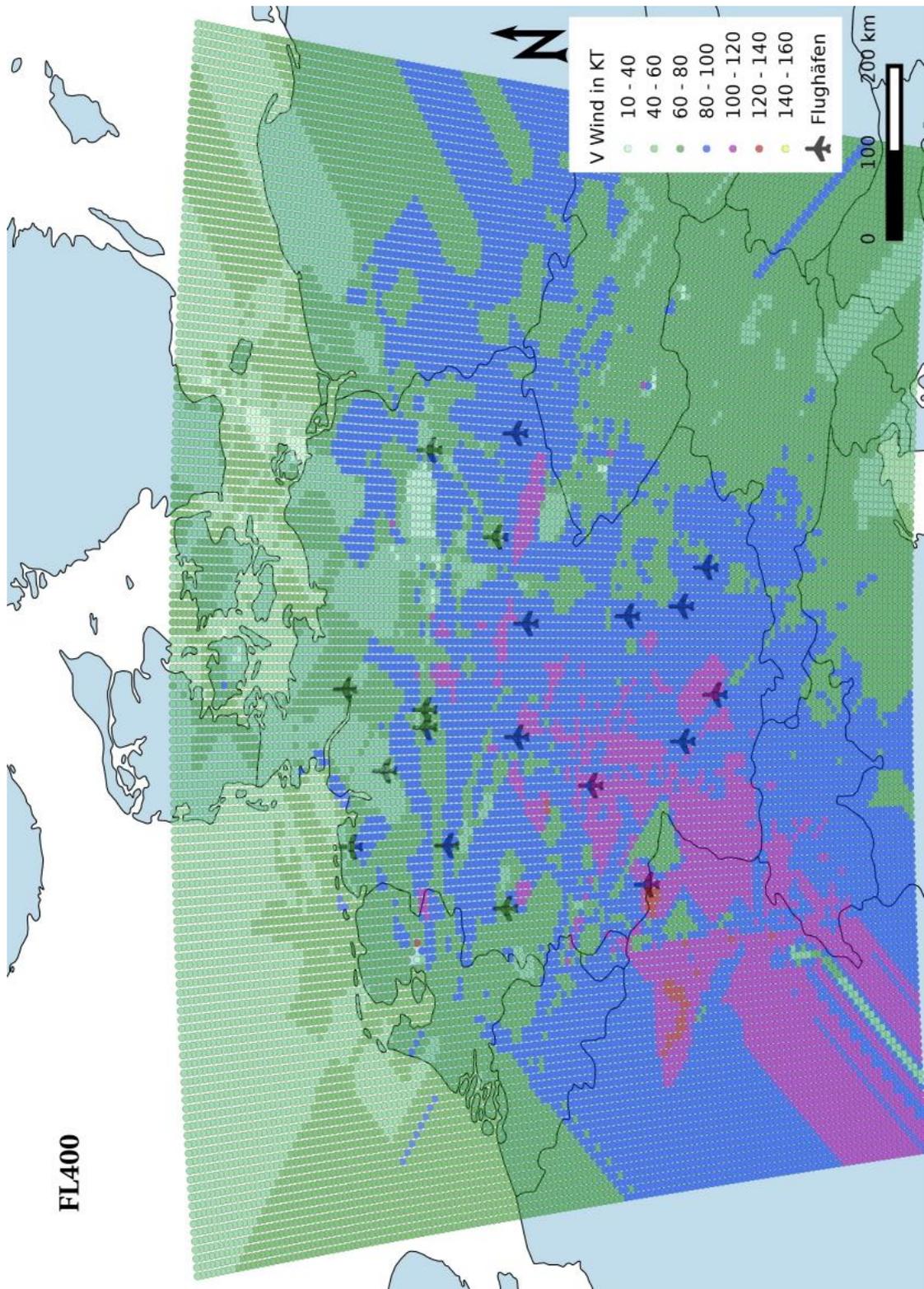


Abb. 6.1-16: h5, FL400 Isofläche der Windgeschwindigkeit farblich markiert gemäß Colorierungsvorschrift DWD

Gegenüberstellung von EUR SWC und Mode S Messung:

	EUR SWC - DWD	Mode S Messung
<b>Produktart</b>	numerische Vorhersage	Messung
<b>Produktinhalt</b>	Windrichtung und - Geschwindigkeit, Temperatur, fluggefährdende Wettererscheinungen	Windrichtung und - Geschwindigkeit,
<b>Gültigkeit</b>	24h ab Ausgabezeitpunkt	noch keine
<b>Zeitpunkt der Messung der meteorologischen Größen in der Atmosphäre</b>	aktuellste Messung ist 30min vorher durchgeführt worden	Ca. < 1 min Zeitverlust zwischen der Messung und dem fertigen Produkt
<b>Anzahl der Messwerte in Deutschland</b>	9 Radiosondenstationen, Aufstiege zweimal pro Tag	ca. 442550 pro 30min im Schnitt
<b>zeitliche Auflösung</b>	viermal pro Tag	48 mal pro Tag
<b>räumlich vertikale Auflösung</b>	FL050, FL100, FL140, FL180, FL240, FL270, FL300, FL320, FL340, FL360, FL390, FL410, FL450, , FL530, SWC, SATBILD	gesamter kontrollierter Luftraum, Daten auf die Höheniveaus FL050, FL100, FL200, FL300, FL400 jeweils interpoliert
<b>räumlich horizontale Auflösung</b>	6 Werte pro Höheniveau	siehe Messdichte des Datensatzes Abb. 6.1-17, Abb. 6.1-18, Abb. 6.1-19, Abb. 6.1-20, Abb. 6.1-21

*Tabelle 6.1-2: Vergleich der Mode S Messung mit dem operationell verwendeten Produkt (EUR SWC DWD) in der Verkehrsfluffahrt*

#### 6.1.7.2. Synoptische Interpretation und Vergleich der generierten Windfelder aus Mode S Daten mit der EUR SWC des DWD

Die Vergleichsdaten der EUR SWC des DWD befinden sich im Anhang (9.1 Windkarten für den 05.05.2015). Die Windgeschwindigkeit ist gemäß der Colorierungsvorschrift des DWD nachträglich eingetragen, um einen Vergleich zu erleichtern.

##### FL050 Abb. 6.1-7

Beim Windfeld von Mode S (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) zeigt sich ein leicht diffuses Bild mit einer erkennbaren Windrichtung aus Südwest. Ursächlich sind in dieser Höhe die Verdichtung der Messwerte zu den Flughäfen hin und der Einfluss der Orographie. Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten von bis zu 40 – 60KT, im Westen Deutschlands und einem Maximum von 80 – 100KT im Bereich des Feldbergs, lässt sich auf Leeturbulenz an den Mittelgebirgen und Alpen schließen. In der EUR SWC DWD (Abb. 9.1-1: *Wind und Temperaturkarte für Europa im FL050, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h*) ist dieses Phänomen nicht erkennbar. Dort ist das Windmaximum an der Nordseeküste bei den Niederlanden zu finden. Die Translation in Südwest-, Nordost - Richtung ist ebenfalls vorhanden und die Abweichung im Süden Deutschlands durch die Mittelgebirge ist mit einem Windföhnchen eingefangen. In beiden Karten ist das Windfeld im Nordosten Deutschlands diffluent.

##### FL100 Abb. 6.1-9

In FL100 gewinnt die Struktur des Windfelds an Schärfe. Gegenüber FL050 ist der orographische Einfluss in Mitteldeutschland geringer. Die Flugbewegungen an den Flugplätzen verteilen sich, entsprechend der Luftraumstruktur, auf ein breiteres Gebiet. Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten an der Westdeutschen Grenze auf. Nach Osten hin folgt eine Geschwindigkeitskonvergenz mit einer leichten Diffluenz des Windfelds im Bereich der Ostsee. Im Lee der Alpen ist die Windgeschwindigkeit unauffällig und das Windfeld ähnlich unscharf wie in FL050. Die Alpen sind dort 3000m ü.N.N hoch und erzeugen Leeefekte mit Turbulenz bis zum Thüringer Wald. Auf der EUR SWC DWD (Abb. 9.1-1: *Wind und Temperaturkarte für Europa im FL050, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h*) sind diese Informationen nicht abzulesen. Das Windmaximum ist in Mitteldeutschland mit 65KT angegeben und zeigt keine Nord – Süd – Struktur wie bei Mode S. Die Translative Strömung besitzt über der Ostsee ebenfalls in einen leicht diffluenten Ausgang.

### FL200 Abb. 6.1-11

Der Trend zur Homogenisierung der Windfeldstrukturen setzt sich in FL200 fort. Eine Translation aus SW, mit einem diffluenten Ausgang im NO Deutschlands, ist erkennbar. Die höchsten Windgeschwindigkeiten befinden sich entlang der Westdeutschen Grenze und erreichen, vereinzelt, bis zu 100 -120KT. In der EUR SWC DWD (*Abb. 9.1-3: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL180, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h*) ist die Nord – Süd – Achse maximaler Windgeschwindigkeiten zu sehen. Sie befindet sich jedoch nicht an der Westdeutschen Grenze sondern liegt über Mitteldeutschland. Die Diffluenz über der Ostsee ist ebenfalls sichtbar.

### FL300 Abb. 6.1-13

Die Struktur des Windfelds ist in FL300 analog zu FL200. Der Jet zeigt hier sein Maximum mit Windgeschwindigkeiten bis zu 120 – 140KT im Westen Deutschlands. Seine Achse verläuft in einem leichten Bogen von Luxemburg über Hannover nach Berlin. Die Struktur der Darstellung bei Mode S gleicht der EUR SWC DWD (*Abb. 9.1-4: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL300, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h*). Nur die Windgeschwindigkeit ist bei Mode S teilweise höher und zeigt sich fragmentierter.

### FL400 Abb. 6.1-15

Die Struktur des Windfelds entspricht dem darunterliegenden Niveau. Der Jet ist nicht so stark ausgeprägt wie in FL300 und seine Achse, mit den höchsten Windgeschwindigkeiten, verläuft südlicher, von Baden Württemberg über Thüringen nach Sachsen, ebenfalls in einem Bogen. Die EUR SWC DWD (*Abb. 9.1-5: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL390, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h*) zeigt ein vergleichbares Bild, wobei das Isotachenfeld, entlang der Jetachse, schmaler ist als bei Mode S.

### Zusammenfassender Vergleich der beiden Produkte

Beide Produkte stellen die atmosphärischen Gegebenheiten in Art und Ausprägung nahezu gleich dar. Es existieren ab und zu Verschiebungen oder geringfügige Abweichungen in der Ausprägung. Diese sind nicht willkürlich sondern folgen einer Ordnung. So wird die maximale Windgeschwindigkeit bei Mode S im Schnitt fast immer um 10 - 20KT höher angegeben. Die Linksdrehung des Windfelds mit der Höhe ist bei Mode S ebenso erkennbar und zeigt die zum Messtermin vorherrschende Kaltluftadvektion. Die Position einzelner Strukturen variiert ebenfalls richtungstreu. Das ist den unterschiedlichen Eigenschaften der Produkte zuzuschreiben (siehe Tabelle 6.1-2). Mode S ist eine Messung und gibt den realen

Zustand der Atmosphäre innerhalb einer halben Stunde, ab 12.00 UTC, wieder. Die EUR SWC DWD ist ein numerisches Vorhersageprodukt das 24h ab 12.00 UTC gültig ist. Eine Abweichung der Produkte ist unter diesen Gesichtspunkten nicht vorhanden. Mittels Mode S – Windmessungen ist es möglich ein repräsentatives, detailliertes und hochauflösendes Bild der atmosphärischen Zustände bis in FL400 darzustellen.

### 6.1.7.3. Messdichte der einzelnen Höhenstufen der Mode S Messung

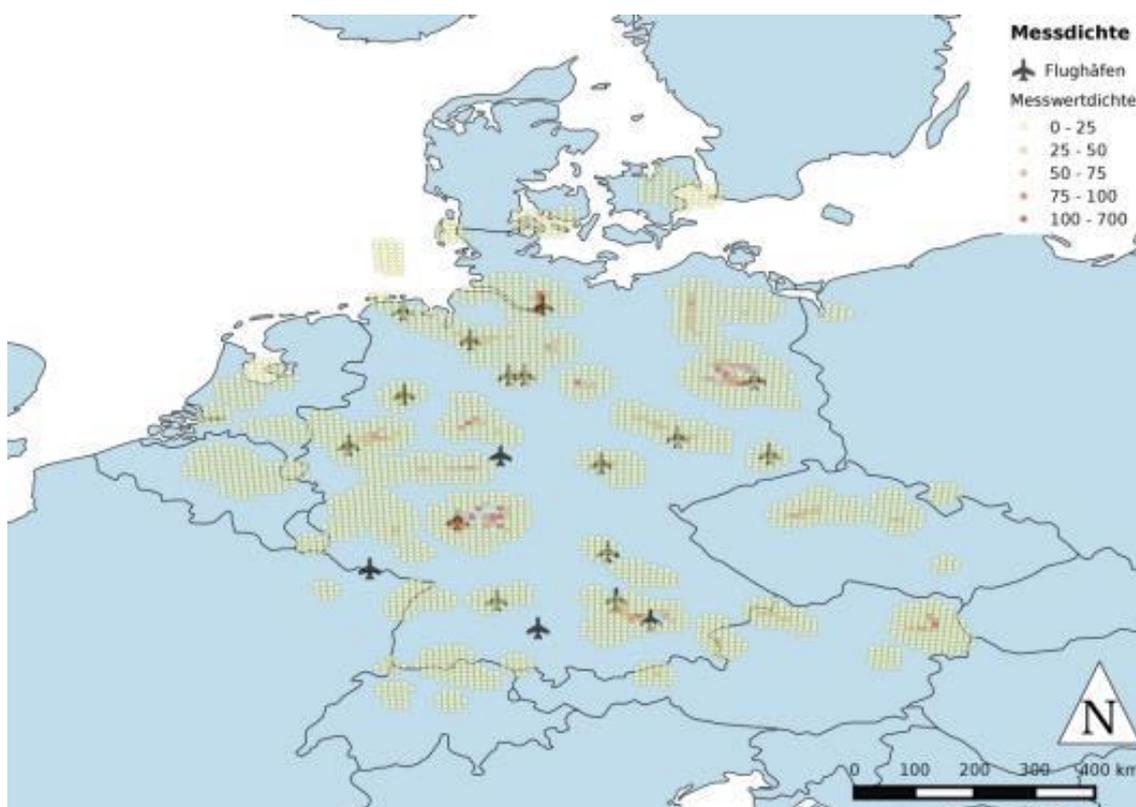


Abb. 6.1-17: *h1, FL050, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte*

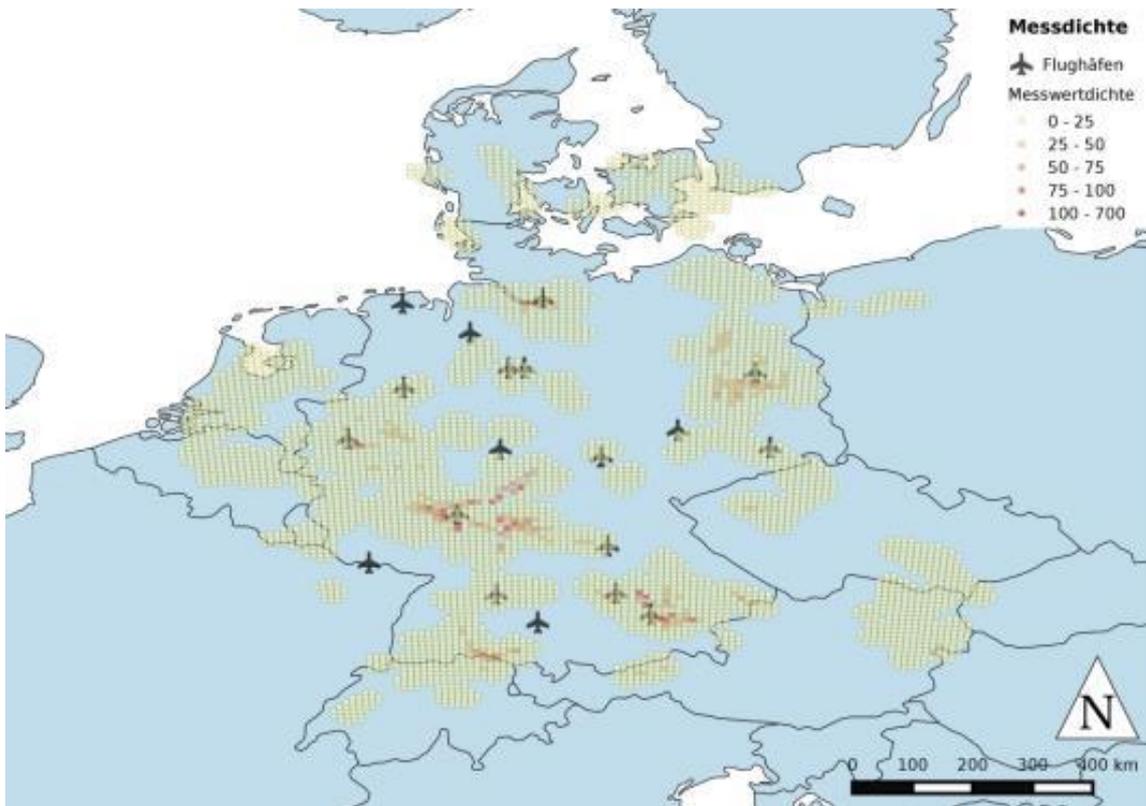


Abb. 6.1-18: h2, FL100, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte

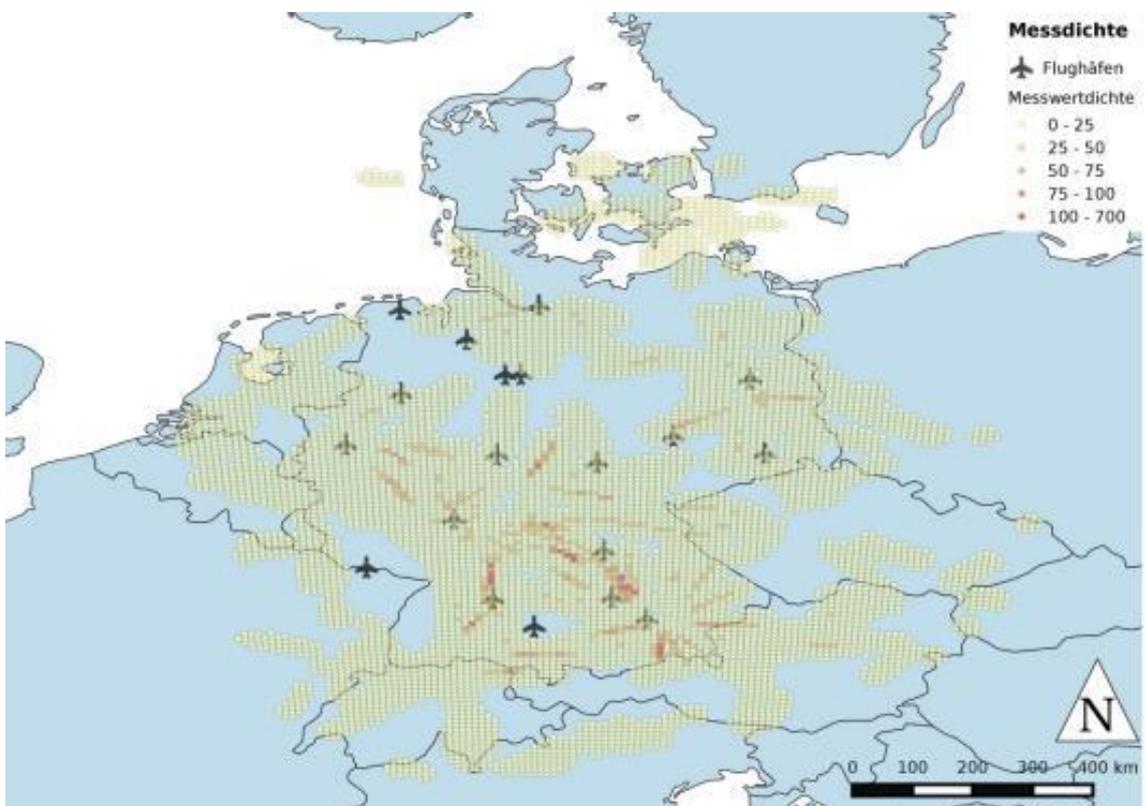


Abb. 6.1-19: h3, FL200, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte

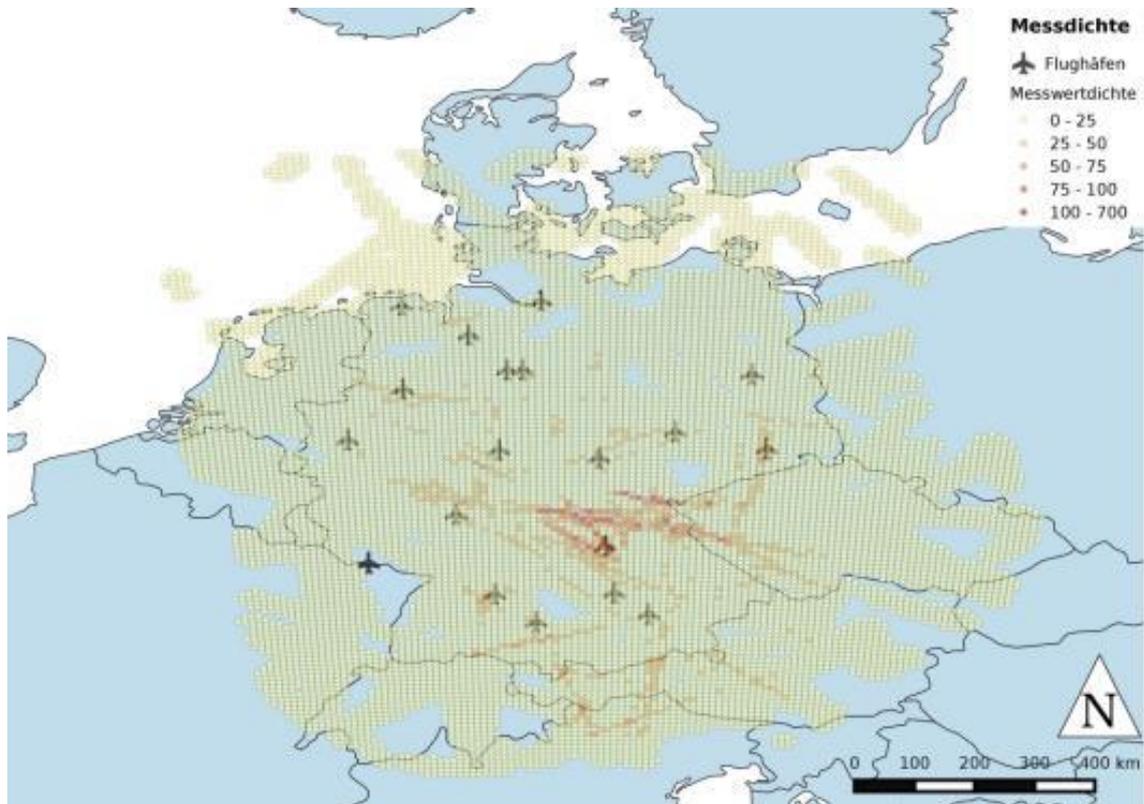


Abb. 6.1-20: h4, FL300, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte

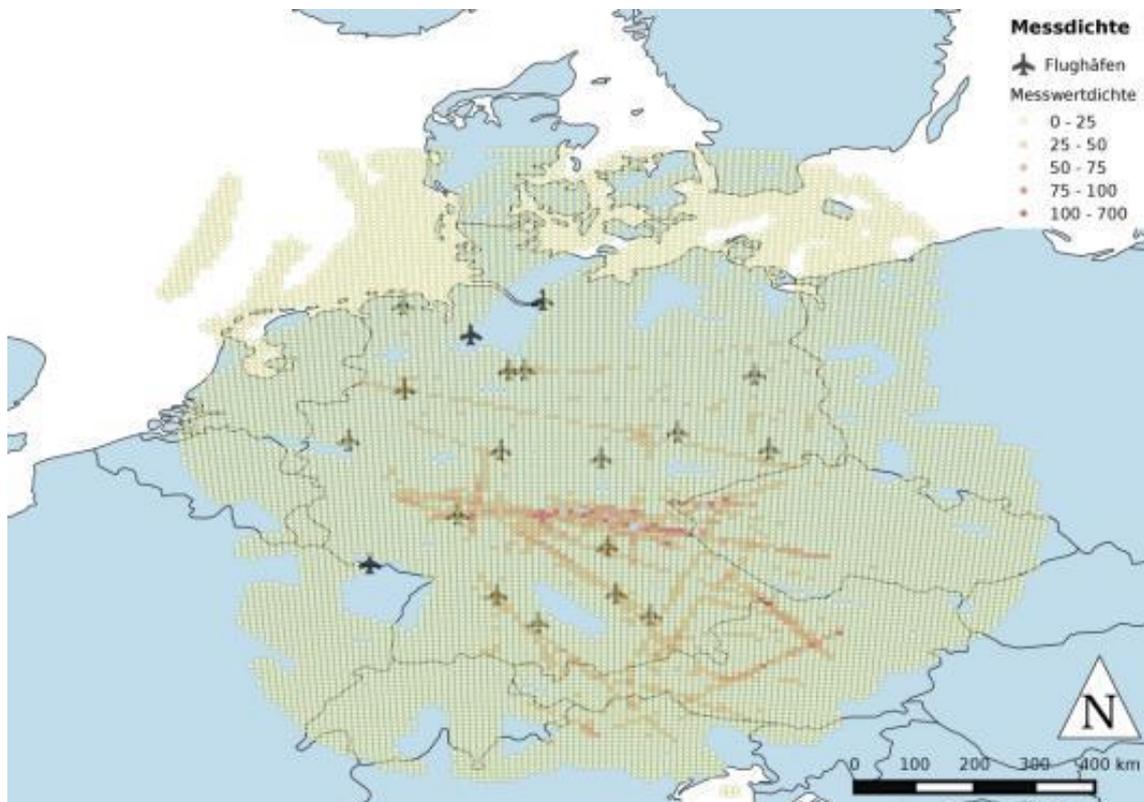


Abb. 6.1-21: h5, FL400, 12.00 – 12.30UTC, Anzahl der aus Mode S generierten Werte

Betrachtet man die Messdichte der einzelnen Höhengiveaus fällt auf, dass sich zum Boden die Messdichte zu den internationalen Verkehrsflughäfen konzentriert. Im Querschnitt ist eine Trichterstruktur zur Flugfeld hin erkennbar. Eine Erklärung liefert der Aufbau der Luftraumstruktur (Abb. 6.1-22). Jedes Flugzeug, in der Start- und Landephase, bewegt sich innerhalb der Flugzone C/D des Flughafens. Diese Zone ist für jede andere Nutzung gesperrt.

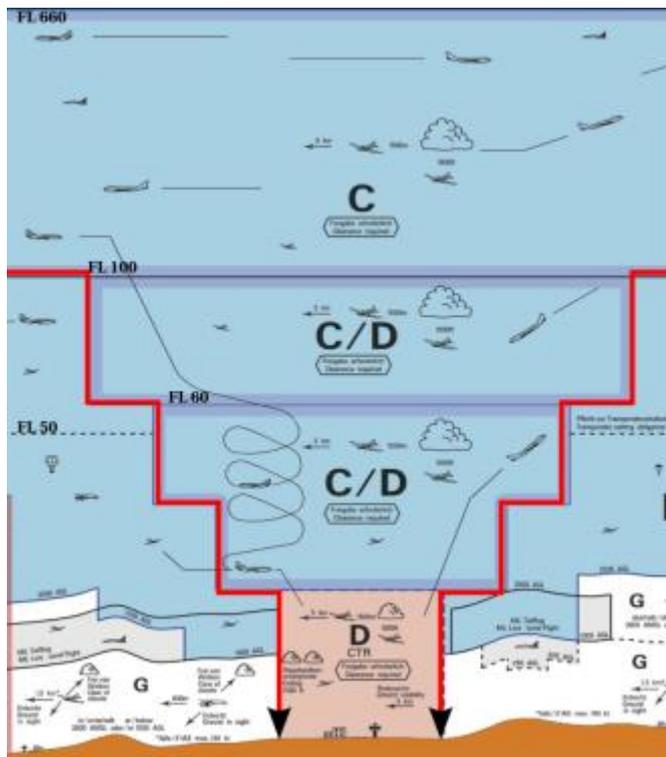


Abb. 6.1-22: Ausschnitt aus der Luftraumstruktur [vgl.: 18], der „Trichter“ der durch die Lande- und Startphase der LFZ erzeugt wird ist rot gekennzeichnet

In der Folge entstehen wertvolle Höhenprofile der Atmosphäre in den genannten Zonen bis zum mittleren Niveau. Die vertikale Wertedichte ist an den internationalen Verkehrsflughäfen über die gesamte Atmosphäre am höchsten. Im untersten Niveau sind die Punktfelder gleichmäßig über das Messfeld verteilt. Die Abdeckung ist deutlich höher und gleichmäßiger als die Verteilung der 9 Radiosondenstationen die nur zweimal täglich eine Messung durchführen. Eine ausreichend flächendeckende Verteilung von Messwerten zur Interpolation auf ein gleichmäßiges Raster, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** is **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, ist gegeben.

Ab FL200 aufwärts beginnen sich die Messlücken zu schließen, um dann in FL400 ganz zu verschwinden. Die Flugstraßen weisen eine besonders hohe Dichte an Messungen auf. Bei den wenigen Lücken, die in den Abbildungen noch zu sehen sind, handelt es sich um zu der Zeit, für besondere Flugvorhaben, gesperrte Lufträume. Dauerhafte Sperrungen sind nur durch Naturkatastrophen, wie Vulkanausbrüche o.a., bedingt. Letztendlich wird überall dort gemessen wo auch geflogen wird. Auf den Luftstraßen misst der „Vordermann“ für den „Nachflieger“.

## **6.2. Mode S Windmessung als Parameter in der Flugwetterberatung für Inlandsflüge der Bundeswehr**

### **6.2.1. Meteorologische Beratung von Streckenflügen in der Bundeswehr am 05.05.2015**

Das DB518 wird zur Dokumentation von Flugstreckenberatungen und Fluggebietsberatungen verwendet. Alle auftragsrelevanten Informationen, die durch den zuständigen Wetterberater vor Flugantritt eingetragen werden, sind erfasst. Abschnitt E beschreibt das zu erwartende Wetter während des Flugs. Im Unterpunkt „Upper Wind KT Temp °C“ ist der, im Flug in Flughöhe vorherrschende Wind, eingetragen. Die Windrichtung ist auf 10° Grad gerundet und die Windgeschwindigkeit in Knoten angegeben. Bei einer markanten Änderung der Wetterbedingungen auf der Flugstrecke ist diese entsprechend zu unterteilen und mündlich zu erläutern. Die Strahlstromachse (Jetstream) mit Lage, Höhe, Richtung und Geschwindigkeit ist in Abschnitt F, Unterpunkt 7 zu finden. Die Verlagerung, Intensitätsänderung oder gewünschte Ausweichrouten sind mündlich zu erläutern und zu dokumentieren. [vgl.: 24]

Für den Tag der Mode S Aufzeichnung liegen für verschiedene LFZ (fiktive) Streckenflugwetterberatungen vor. Die Beratungen sind nach den gültigen Vorschriften der Bundeswehr erstellt und genügen den Anforderungen an eine gültige Streckenflugwetterberatung:

- Eurofighter: Neuburg (ETSN) nach Wittmundhafen (ETNT)
- CH 53: Laupheim (ETHL) nach Fritzlar (ETHF)
- C 160: Wunstorf (ETNW) nach Berlin Tegel (EDDT)

#### **6.2.1.1. Bereitstellung der Mode S Messungen entlang der Flugkorridore**

Die Datengrundlage bilden die Mode S Messungen die als „.csv“ – Dateien, halbstündlich ab 12.00UTC am 05.05.2015, verfügbar sind. Für Deutschland liegen die internationalen und die betreffenden militärischen Flugplätze ebenfalls als „.csv“ Dateien vor. QGIS ermöglicht eine Extraktion der Wind - Daten entlang der Flugstrecke und Speicherung im Format „Shapefile“. Bei Flügen die länger als eine halbe Stunde dauern ist die Flugstrecke in halbe Stundenabschnitte aufgeteilt. Hierfür ist eine konstante Reisegeschwindigkeit festgelegt und die Flugstrecke anhand der durchflogenen Koordinaten in Teilabschnitte unterteilt, denen der jeweilige zeitlich relevante Datensatz zugeordnet ist. Die Speicherung der Ergebnisse erfolgt

als „.csv“ Datei um eine statistische Auswertung mittels LibreOfficeCalc (Tabellenkalkulation) zu ermöglichen.

## 6.2.2. Meteorologische Beratung von Streckenflügen mit Hilfe von Mode S Winddaten

### 6.2.2.1. Mit der CH53 von Laupheim (ETHL) nach Fritzlar (ETHF) am 05.05.2015 ab 12.00 UTC

Laupheim Standortkoordinaten in Deziamlgrad (WGS 84):

- Latitude: 48,220297°
- Longitude: 9,910019°

Fritzlar Standortkoordinaten in Deziamlgrad (WGS 84):

- Latitude: 51,114575°
- Longitude: 9,285444°

Durchschnittliche Flugeschwindigkeit → ca. 215 km/h

Flugdauer inkl. Start und Landung → ca. 2h

Mode S Datengrundlage → Messung von 12.00 – 14.00 UTC

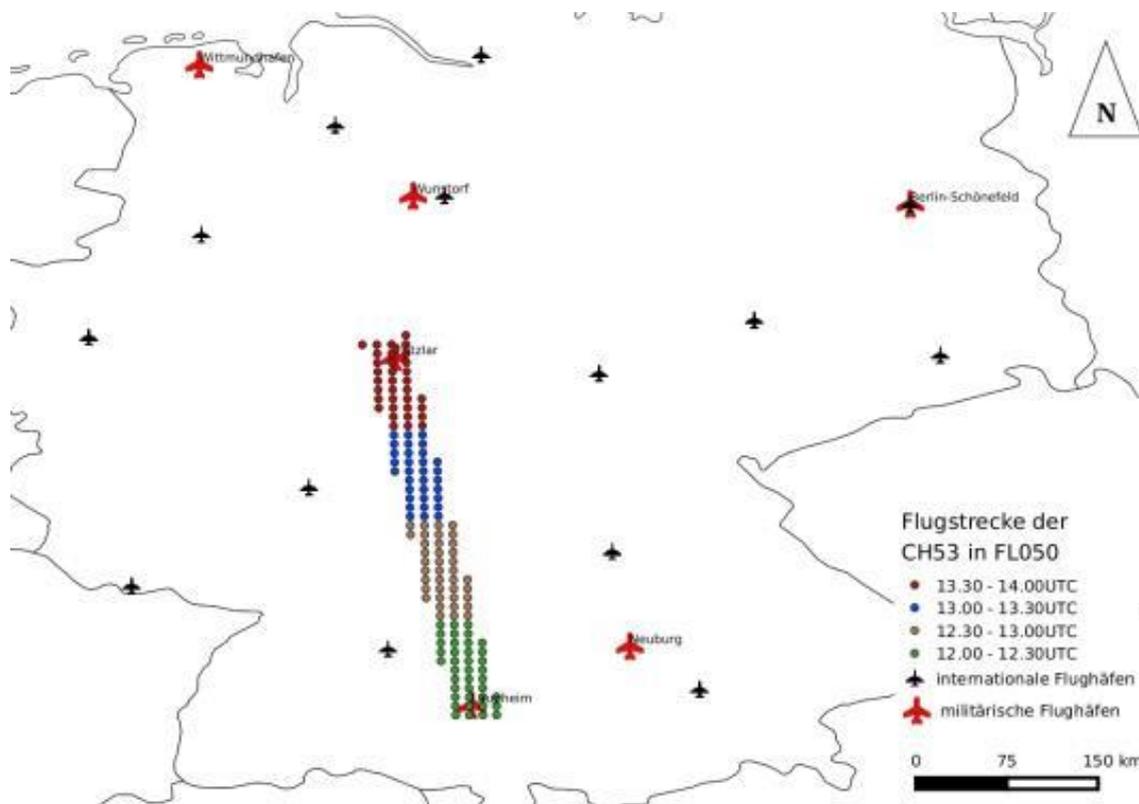


Abb. 6.2-1: Messpunkte der Mode S Messung entlang der Flugstrecke von Laupheim nach Fritzlar

Windgeschwindigkeit; Flug CH53, FL050, Laupheim nach Fritzlar, 05.05.2015, 12.00 - 14.00UTC



Abb. 6.2-2: Windgeschwindigkeit während des Flugs von Laupheim nach Fritzlar

Windrichtung Flug, CH53, FL050, Laupheim nach Fritzlar, 05.05.2015, 12.00 - 14.00UTC



Abb. 6.2-3: Windrichtung während des Flugs von Laupheim nach Fritzlar

	Windrichtung in Grad		Windgeschwindigkeit in KT	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
12.00 – 12.30 UTC	236,89	22,84	38,33	11,33
12.30 – 13.00 UTC	240,56	9,65	36,6	8,26
13.00 – 13.30 UTC	236,34	7,25	28,58	4,29
13.30 – 14.00 UTC	229,23	7,14	45	9,17
<b>Gesamt</b>	<b><u>235,86</u></b>	<b><u>14,25</u></b>	<b><u>37,16</u></b>	<b><u>10,38</u></b>

Tabelle 6.2-1: statistische Auswertung von Windrichtung und - Geschwindigkeit während der Zeitabschnitte des Flugs von Laupheim nach Fritzlar

FLIGHT WEATHER											
A	PILOT/AIRCRAFT CH53 DIXI001					Date	150505	No	01		
	FROM <b>ETHL</b> TO <b>ETHF</b> VIA <b>DIRECT</b>							ETD		1200 Z	
	---							IFR			
B	DESTINATION	ETA	MODIF GROUP	SFC-WIND KT	VIS KM	WEATHER	CLOUDS HFT GND			QNH SUNSET	
1	ETHF	1400z	TEMPO	20010G20 20020G35	10 5	-- SHRA	FEW040 BKN100 BKN250 SCT015 BKN030CB			1003 HPA	
2	DEST	---	---	---	---	---	---			---	
3	DEST	---	---	---	---	---	---			---	
4	DEST	---	---	---	---	---	---			---	
5	DEST	---	---	---	---	---	---			---	
C	GENERAL SITUATION <b>A COLDFRONT WITH EMBD TSRAGR WILL MOVE IN NORTHERN AND CENTRAL GERMANY FROM WEST TO EAST</b>										
D	TAKEOFF	RWY TEMP --- °C		DEW POINT --- °C		PRES/DENS ALTITUDE --- FT					
E	ENROUTE	CRUIS. LEVEL FT/FL	UPPER WIND KT TEMP °C	P M	FLIGHT VIS KM	WEATHER	CLOUDS		TOPS FT/FL	FZLVL FT/FL	
							HFT GND				
1	ETHL - ETHN	FL060	25035KT PS08	P M	10 ZERO	-- ---	SCT100 BKN140 FEW020 BKN030 BKN100 LOC		FL180	FL135	
2	ETHN - ETHF	FL060	21045KT PS06	P M	10 ZERO	-- SHRA	BKN050 BKN080 SCT010 BKN025CB BKN40 ISOL		FL240	FL120	
3	---	---	---	P M	-- ---	-- ---	---		---	---	
4	---	---	---	P M	-- ---	-- ---	---		---	---	
5	---	---	---	P M	-- ---	-- ---	---		---	---	
F	HAZARDS	L	M	S	COMMENTS			G REMARKS MIN QNH 1010 HPA ENROUTE			
1	THUNDER-STORM	-	-	-				---			
2	HAIL	-	-	-							
3	FREEZING PRECIPITATION	-	-	-							
4	ICING	-	M	-	MXD ICE IN CLD ABV FZLVL						
5	TURBULENCE	-	M	-	I/M/VOF SHRA GUSTS 40KT						
6	CAT	-	-	-							
7	JETSTREAM	---									
8	BIRD TAM/ BIRDSTRIKE WARNING	NO ---		VALID TILL --- Z		BSRFCST: I/M UP TO 3000 FT GND OVR ENTIRE					
H	VOID AFTER	Z		PLACE OF ORIGIN		ETHL		Z		NAME	
	EXTENDED	Z		TRANSM.DISPLAY				Z		NAME	
	EXTENDED	Z		RECEIVED				Z		NAME	

a) P=PREVAILING

b) M=MINIMUM

AGerBwAnf.-Zeichen: DB518

Abb. 6.2-4: Abb. 6.2-5: Formular DB518 Streckenflugberatung Bundeswehr gemäß der gültigen Beratungsvorschrift für Streckenflüge der Bundeswehr für den Flug von Laupheim nach Fritzlär

#### 6.2.2.2. Vergleich der Mode S Daten mit der Streckenflugberatung für den Flug von Laupheim nach Fritzlar

In den ersten 30min des Flugs, der etwa der Strecke von Laupheim nach Niederstetten (ETHN) entspricht, ist die mittlere Windgeschwindigkeit der Mode S Messung um 3,33KT höher als die des DB518. Die durchschnittliche Abweichung der Windrichtung beträgt 13°. Anhand der Standardabweichung der Mode S Messungen, Windrichtung 22,84° und - Geschwindigkeit 11,33KT, ist eine deutliche Schwankung der Messungen ersichtlich. Da die größten Schwankungen, vor allem bei der Windrichtung zu Beginn des Flugs auftreten, sind Turbulenzen im Lee der Alpen und der Schwäbischen Alb vermutlich ursächlich. Im weiteren Flugverlauf schwankt die Windgeschwindigkeit bei Mode S zwischen 28,58KT und 45KT. Der Wind weht aus WSW zwischen 229,23° und 240,56°. Im Vergleich zum DB518, 45KT aus 210°, ist die Windrichtung bei Mode S leicht westlich eingedreht.

6.2.2.3. Mit der C160 von Wunstorf (EDNW) nach Berlin Tegel (EDDT) am 05.05.2015 ab 12.00UTC

Wunstorf Standortkoordinaten in Deziamlgrad (WGS 84):

- Latitude: 51,457333°
- Longitude: 9,42716°

Berlin Tegel Standortkoordinaten in WGS 84:

- Latitude: 52,559686°
- Longitude: 13,287711°

Durchschnittliche Fluggeschwindigkeit → ca. 490 km/h

Flugdauer inkl. Start und Landung → ca. 1h

Mode S Datengrundlage → Messung von 12.00 – 13.00 UTC

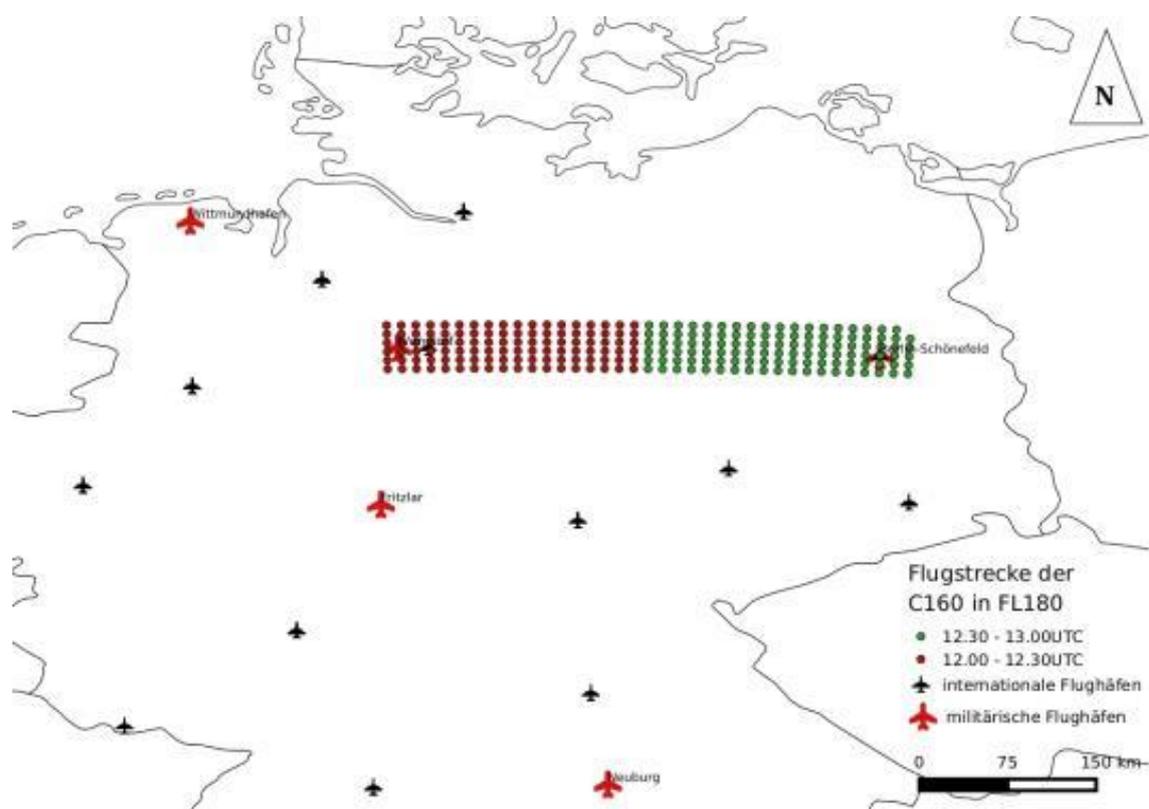


Abb. 6.2-6: Messpunkte der Mode S Messung entlang der Flugstrecke von Wunstorf nach Berlin

Windgeschwindigkeit; Flug C160, FL180, Wunstorf nach Berlin, 05.05.2015, 12.00 - 13.00 UTC

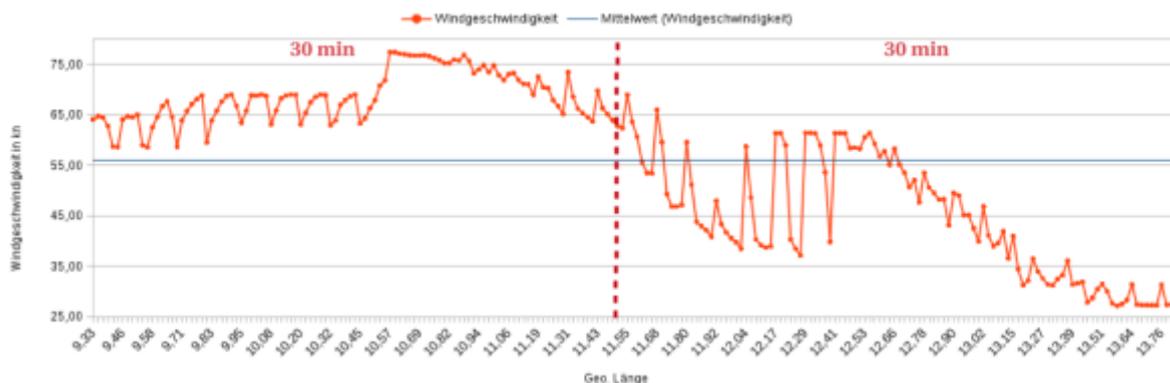


Abb. 6.2-7: Windgeschwindigkeit während des Flugs von Wunstorf nach Berlin

Windrichtung; Flug C160, FL180, Wunstorf nach Berlin, 05.05.2015, 12.00 - 13.00 UTC



Abb. 6.2-8: Windrichtung während des Flugs von Wunstorf nach Berlin

	Windrichtung in Grad		Windgeschwindigkeit in KT	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
12.00 – 12.30 UTC	218,94	3,20	68,46	4,96
12.30 – 13.00 UTC	223,51	8,71	44,32	11,84
<b>Gesamt</b>	<b><u>221,28</u></b>	<b><u>6,99</u></b>	<b><u>44,32</u></b>	<b><u>11,84</u></b>

Tabelle 6.2-2: statistische Auswertung von Windrichtung und - Geschwindigkeit während der Zeitabschnitte des Flugs von Wunstorf nach Berlin

FLIGHT WEATHER												
A	PILOT/AIRCRAFT C160 DIXI002					Date	150505	No	02			
	FROM ETNW TO EDDT VIA DIRECT							ETD 1200 Z				
	---							IFR				
B	DESTINATION	ETA	MODIF GROUP	SFC-WIND KT	VIS KM	WEATHER	CLOUDS HFT GND			QNH SUNSET		
1	EDDT	1300 z	PROB30	21010KT 24015G35	10 2.0	-- TSRA	SCT025 BKN008 BKN015CB			1003 HPA		
2	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
3	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
4	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
5	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
C	GENERAL SITUATION A COLDFRONT WITH EMBD TSRAGR WILL MOVE IN NORTHERN AND CENTRAL GERMANY FROM WEST TO EAST											
D	TAKEOFF	RWY TEMP	---	°C	DEW POINT	---	°C	PRES/DENS ALTITUDE			---	FT
E	ENROUTE	CRUIS. LEVEL FT/FL	UPPER WIND KT TEMP °C	P M	FLIGHT VIS KM	WEATHER	CLOUDS			FZLVL FT/FL		
							HFT GND		TOPS FT/FL			
1	ETNW - RIVER ELBE	FL180	19060KT MS22	P	ZERO	RA	SCT030 BKN080 BKN220		FL280	FL080		
				M	ZERO	TSRAGR	BKN006 BKN012CB ISOL					
2	RIVER ELBE - EDDT	FL180	22050KT MS16	P	ZERO	-RA	SCT030 BKN080 BKN220		FL320	FL100		
				M	ZERO	TSRA	BKN008 BKN012CB ISOL					
3	---	---	---	P	---	---	---		---	---		
				M	---	---	---					
4	---	---	---	P	---	---	---		---	---		
				M	---	---	---					
5	---	---	---	P	---	---	---		---	---		
				M	---	---	---					
F	HAZARDS	L	M	S	COMMENTS			G REMARKS MIN QNH 1010 HPA ENROUTE				
1	THUNDER-STORM	-	-	S	ISOL EMBD IN COLDFRONT			---				
2	HAIL	-	M	-	HAIL WITH SIZE UP TO 2CM			---				
3	FREEZING PRECIPITATION	-	-	-	---			---				
4	ICING	-	M	S	MOD MXD IN CLDS ABV FZLVL; SEV CLR IN CB			---				
5	TURBULENCE	-	M	S	MOD NEAR SFC G40KT; MOD/SEV IN/MVOF TS G45KT			---				
6	CAT	-	M	-	IN/MVOF JET FL110/250			---				
7	JETSTREAM	---			---			---				
8	BIRDTAM/ BIRDSTRIKE WARNING	NO	---	---	VALID TILL --- Z			BSRFCST: L/M UP TO 3000 FT GND OVR ENTIRE				
H	VOID AFTER	Z			PLACE OF ORIGIN			ETHL		Z	NAME	
	EXTENDED	Z			TRANSM./DISPLAY					Z	NAME	
	EXTENDED	Z			RECEIVED					Z	NAME	

a) P=PREVAILING

b) M=MINIMUM

AGeoBw Anf.-Zeichen: DB518

Abb. 6.2-9: Abb. 6.2-10: Formular DB518 Streckenflugberatung Bundeswehr gemäß der gültigen Beratungsvorschrift für Streckenflüge der Bundeswehr für den Flug von Wunstorf nach Berlin

#### 6.2.2.4. Vergleich der Mode S Daten mit der Streckenflugberatung für den Flug von Wunstorf nach Berlin

Während des gesamten Flugs weht der Wind der Mode S Messung aus durchschnittlich 220° mit anfänglich 68KT im Mittel. In der zweiten halben Stunde schwächt er ab auf durchschnittlich 44KT und im Landegebiet auf 27,5KT. Die Windrichtung ist nahezu deckungsgleich mit der Vorhersage des DB518. Wobei die Windgeschwindigkeit hier deutlich höher angegeben wird und sich im Laufe des Flugs, im Bereich der Elbe, lediglich um 10KT verringert. Die Landewettervorhersage mit 10KT und dreißig prozentiger Wahrscheinlichkeit von 15KT mit Böen von 35KT deckt sich mit der Mode S Messung die bei 27KT liegt. Im DB518 sind die Wolkenobergrenzen mit FL280, westlich der Elbe, und FL320, östlich der Elbe, angegeben. Während des gesamten Flugs ist vereinzelt mit Gewittern zu rechnen. An den Gewittern herrscht mittlere bis starke Turbulenz (Böen bis 45KT), sowie im Bereich des Jetstream (FL110/250).

Die vorhergesagten Turbulenzzonen sind vermutlich ursächlich für die starken Schwankungen der Mode S Messungen zu Beginn des zweiten 30 Minuten Abschnitts.

6.2.2.5. Mit dem Eurofighter von Neuburg (ETSN) an der Donau nach Wittmundhafen (ETNT) am 05.05.2015 ab 12.00UTC

Neuburg an der Donau Standortkoordinaten in Deziamlgrad (WGS 84):

- Latitude: 48,711667°
- Longitude: 11,211667°

Wittmundhafen Standortkoordinaten in Deziamlgrad (WGS 84):

- Latitude: 53,547833°
- Longitude: 7,667333°

Durchschnittliche Fluggeschwindigkeit → ca. 550 km/h

Flugdauer inkl. Start und Landung → ca. 1,5h

Mode S Datengrundlage → Messung von 12.00 – 13.30 UTC

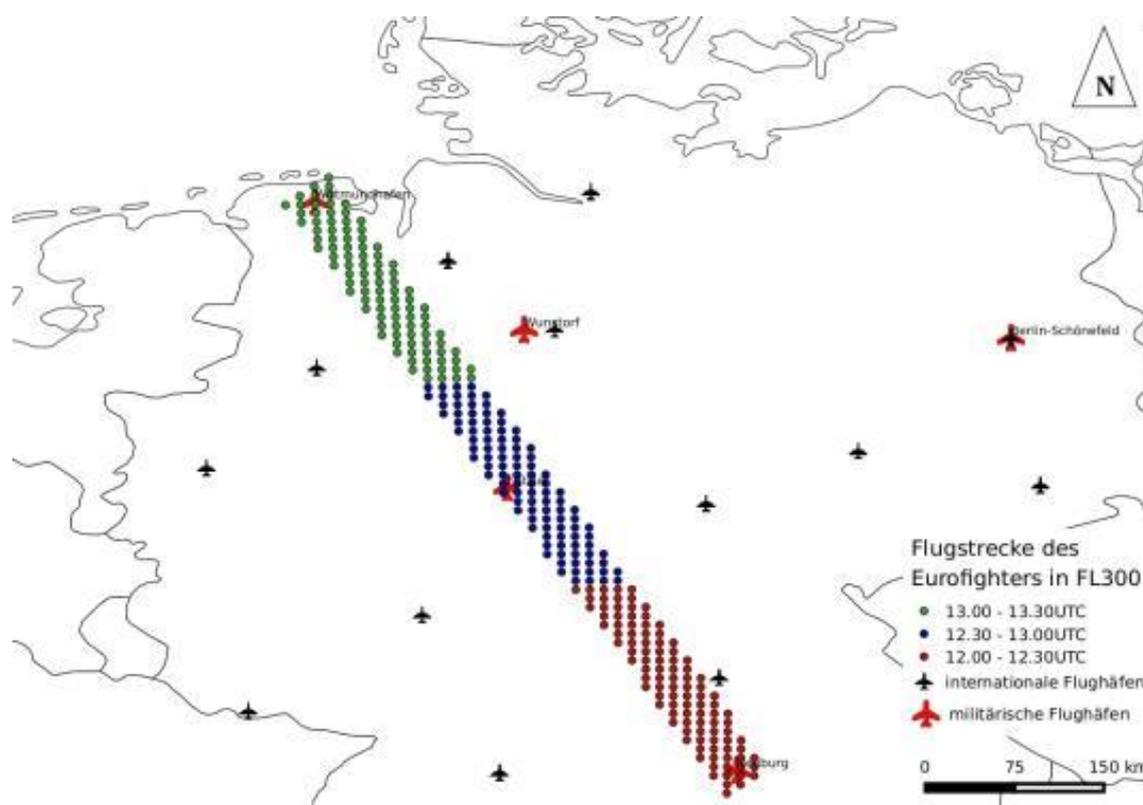


Abb. 6.2-11: Messpunkte der Mode S Messung entlang der Flugstrecke von Neuburg Donau nach Wittmundhafen

Windgeschwindigkeit; Flug, Eurofighter, FL300, Neuburg nach Wittmundhafen, 05.05.2015, 12.00 - 13.30UTC



Abb. 6.2-12: Windgeschwindigkeit während des Flugs von Neuburg Donau nach Wittmundhafen

Windrichtung; Flug, Eurofighter, FL300, Neuburg nach Wittmundhafen, 05.05.2015, 12 - 13.30UTC

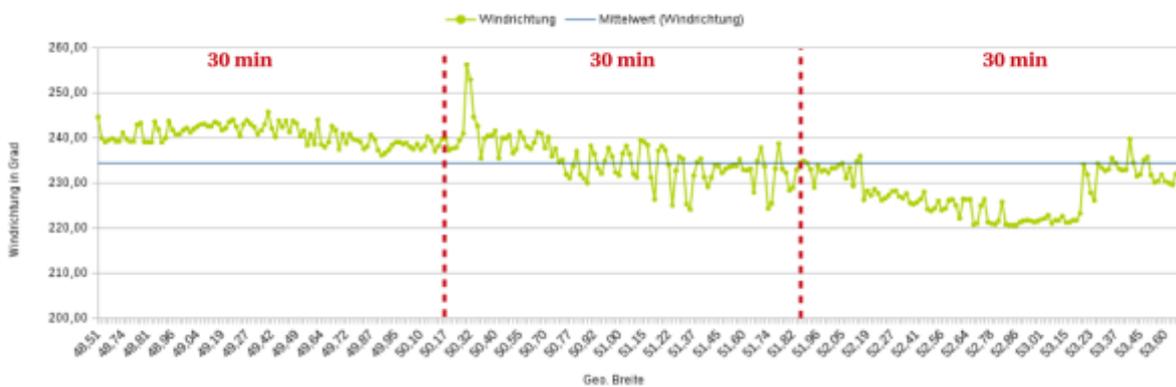


Abb. 6.2-13: Windrichtung während des Flugs von Neuburg Donau nach Wittmundhafen

	Windrichtung in Grad		Windgeschwindigkeit in KT	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
12.00 – 12.30 UTC	240,6	2,15	80,13	9,62
12.30 – 13.00 UTC	235,34	5,1	95,41	9,59
13.00 – 13.30 UTC	227,7	5	86,54	10,53
<b>Gesamt</b>	<b><u>234,34</u></b>	<b><u>6,87</u></b>	<b><u>87,34</u></b>	<b><u>11,68</u></b>

Tabelle 6.2-3: statistische Auswertung von Windrichtung und - Geschwindigkeit während der Zeitabschnitte des Flugs von Neuburg Donau nach Wittmundhafen

FLIGHT WEATHER												
A	PILOT/AIRCRAFT <b>EUROFIGHTER DIXI003</b>					Date <b>150505</b>	No <b>03</b>					
	FROM <b>ETSN</b> TO <b>ETNT</b> VIA <b>DIRECT</b>							ETD <b>1200 Z</b>				
	---							IFR				
B	DESTINATION	ETA	MODIF GROUP	SFC-WIND KT	VIS KM	WEATHER	CLOUDS HFT GND			QNH SUNSET		
1	ETNT	1330 z	TEMPO	19018G30 21025G40	10 3.0	TSRA	SCT050BKN090 SCT006 BKN010CB			997 HPA		
2	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
3	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
4	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
5	DEST	---	---	---	---	---	---			---		
C	GENERAL SITUATION <b>A COLDFRONT WITH EMBD TSRAGR WILL MOVE IN NORTHERN AND CENTRAL GERMANY FROM WEST TO EAST</b>											
D	TAKEOFF	RWY TEMP	---	°C	DEW POINT	---	°C	PRES/DENS ALTITUDE			---	FT
E	ENROUTE	CRUIS. LEVEL FT/FL	UPPER WIND KT TEMP °C	P b) M	FLIGHT VIS KM	WEATHER	CLOUDS			FZLVL FT/FL		
							HFT GND		TOPS FT/FL			
1	ETSN - EDDE	FL300	250100KT MS38	P M	10 ZERO	---	BKN050 BKN120 BKN030 BKN100 LOC		FL280	FL120		
2	EDDE - ETNT	FL300	21080KT MS42	P M	10 ZERO	RA TSRAGR	SCT030 BKN080 BKN220 SCT005 BKN008CB ISOL		FL320	FL090		
3	---	---	---	P M	---	---	---		---	---		
4	---	---	---	P M	---	---	---		---	---		
5	---	---	---	P M	---	---	---		---	---		
F	HAZARDS	L	M	S	COMMENTS			G REMARKS MIN QNH 1010 HPA ENROUTE				
1	THUNDER-STORM	-	-	S	ISOL EMBD IN COLDFRONT			---				
2	HAIL	-	M	-	HAIL WITH SIZE UP TO 2CM			---				
3	FREEZING PRECIPITATION	-	-	-	---			---				
4	ICING	-	M	S	MOD MXD IN CLDS ABV FZLVL UP TO FL160; SEV CLR ICE IN CB			---				
5	TURBULENCE	-	M	S	MOD NEAR SFC G40KT; MOD/SEV IN/NOV OF TS G45KT			---				
6	CAT	-	M	-	IN/NOV OF JET FL110/250			---				
7	JETSTREAM	---			---			---				
8	BIRDTAM/ BIRDSTRIKE WARNING	NO	---	---	VALID TILL	---	BSRFCST: L/M UP TO 3000 FT GND OVR ENTIRE					
H	VOID AFTER	z		PLACE OF ORIGIN	ETHL		z		NAME			
	EXTENDED	z		TRANSM./DISPLAY			z		NAME			
	EXTENDED	z		RECEIVED			z		NAME			

a) P=PREVAILING

b) M=MINIMUM

AGeoBw Anf.-Zeichen: DB518

Abb. 6.2-14: Formular DB518 Streckenflugberatung BW gemäß der gültigen Beratungsvorschrift für Streckenflüge der Bundeswehr für den Flug von Neuburg Donau nach Wittmundhafen

#### 6.2.2.6. Vergleich der Mode S Messung mit der Streckenflugberatung für den Flug von Neuburg Donau nach Wittmundhafen

Bei der Mode S Messung schwankt die Windgeschwindigkeit im Schnitt zwischen 15 und 25KT. Die maximale Schwankung tritt zu Beginn des Flugs auf und weitere signifikante Schwankungen sind im Eintrittsbereich des Jetstream zu sehen. Der Wind weht im Mittel beständig aus 230°. Eine Schwankung ist auch hier beim Eintritt in den Jetstream, aufgrund der Geschwindigkeitsdivergenz, vorhanden. Im DB518 wird die Windrichtung mit 250° und die Geschwindigkeit mit 100KT, 20KT höher als bei Mode S, bis Erfurt angegeben. Im restlichen Flug ist vereinzelt mit Gewittern mit Turbulenz (Böen 45KT) zu rechnen. Ebenfalls sind am Jetstream Turbulenzzonen vorhanden.

#### 6.2.3. Zusammenfassung der Vergleiche zwischen den Mode S Messungen innerhalb der Flugkorridore und den Streckenflugberatungen

Die Mode S Messungen entsprechen weitgehend den Streckenflugvorhersagen. Einzig bei der Angabe der Windgeschwindigkeit gibt es einzelne Unterschiede. Diese sind jedoch durch die Wetterlage begründet. Da der Jetstream von Südwest nach Nordost in FL110 bis FL250 verläuft kommt es zu großräumigen Turbulenzen. Ergänzend treten vereinzelt Gewitter mit Turbulenz im Umfeld auf. Ein gebietsweise inhomogenes Windfeld ist folglich gegeben. Davon ausgehend zeigen die Mode S Messungen ein präzises Bild der atmosphärischen Vorgänge. Turbulenzzonen entlang des jeweiligen Flugs sind klar ersichtlich. Bei räumlicher Auswertung der kurz vor Flugantritt herrschenden Windverhältnisse wäre eine weniger Turbulenz – behaftete Flugroute planbar.

## 7. Abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen, sowohl des Windfelds über Deutschland, als auch der Streckenflugberatungen geht eindeutig hervor, dass Mode S basierte Windmessungen operationell verwendeten Messungen ebenbürtig sind. Ihre Generierung ist mit der der AMDAR Windmessungen (siehe 3.5 *Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR)*) identisch. Die qualitativen Rahmenbedingungen der WMO sind somit erfüllt. Vorteile seitens Mode S Daten sind ihre höhere zeitliche sowie räumliche Abdeckung und ihre Verfügbarkeit. Für die Flugsicherung sind sie nur ein Nebenprodukt das von den rechtlichen Regelungen für LFZ im kontrollierten Luftraum profitiert. Das Sensornetzwerk zur Luftraumüberwachung ist lückenlos, deutlich ausfallsicherer und verlässlicher als jegliches meteorologisches Messnetz. Alle Daten sind Eigentum der jeweiligen Flugsicherung und von ihr beziehbar. Trotz der Einstufung der hier verwendeten Datenquelle als geheim ist der meteorologische Informationsgehalt, unter Berücksichtigung aller Sicherheitsbedenken, jederzeit extrahierbar. Ein weiterer Vorteil ist das bereits bestehende Netz zur Verbreitung von Luftverkehrsdaten (siehe 5.1.5.1 *Luftraumüberwachungs – Daten - Netzwerk SURNET*). Für die in der Master Thesis genutzten Daten stand kein Anschlussmodell zur Verfügung, so dass zu den Rändern hin eine Verzerrung der interpolierten Winddaten resultierte. Ein globales meteorologisches Vorhersagesystem würde dieses Problem lösen. Zusätzlich ist eine globale Erfassung der Mode S Winddaten, in einem Datenverbund, und die Ergänzung mit anderen Windmessungen denkbar.

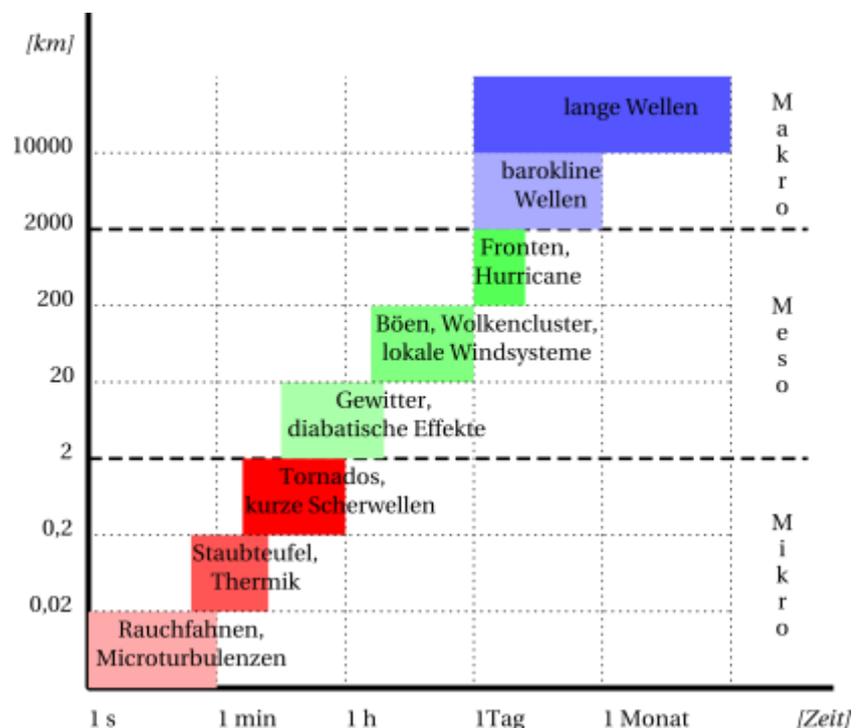


Abb. 6.2-1: Mit Mode S erfassbare meteorologische Phänomene im zeitlichen und räumlichen Verhältnis

Die hohe Messfrequenz führt zu einer immens hohen Datenmenge die es erlaubt, für operationelle meteorologische Messnetze, subskalige Phänomene abzubilden. Bei einer Abtastfrequenz von 6s sind selbst Microturbulenzen erfassbar. *Abb. 6.2-1* zeigt alle windgebundenen, mittels Mode S Messungen detektierbaren, Wettererscheinungen in ihrer räumlichen Ausdehnung und durchschnittlichen Lebensdauer.

Mode S Windmessungen schließen die Lücke zwischen den Windmessungen durch Satelliten (METEOSAT - ASCAT), die die Wellbewegung der Ozeane detektieren und hierdurch den Wind bis in 1000m Höhe über den Ozeanen ableiten, den bodengestützten Höhenwindmessungen mittels Radar und dem vergleichsweise grobmaschigen, niederfrequenten Radiosondennetz.

Zusammenfassend entsprechen die Mode S Windmessungen anderen vergleichbaren meteorologischen Messungen und bieten eine höhere Auflösung sowie eine größere Aktualität.

## **8. Ausblick**

Aufgrund der Messfrequenz, der hohen Messdichte über Mitteleuropa und der Ausfallsicherheit sind für die aus Mode S gewonnenen Windmessungen zahlreiche Anwendungen denkbar.

Im Bereich der Luftsicherheit sind meteorologische Gefahren besser erfassbar, sowohl räumlich, zeitlich als auch in ihrer Art und Ausprägung. Der Katastrophenschutz würde von der Möglichkeit einer präzisen Ausbreitungsanalyse und Vorhersage von Schadstoffen in der Atmosphäre profitieren.

Innerhalb des kontrollierten Luftraums lässt sich eine Durchflussgeschwindigkeit der jeweiligen Flugstraßen ermitteln und der Flugverkehr entsprechend optimieren, bei gleichzeitiger Einhaltung aller sicherheitsrelevanten Aspekte. Durch die exakte Kenntnis der Windverhältnisse, kurz vor Flugantritt, ist eine präzisere Planung des Flugvorhabens möglich. Abflug und Ankunftszeiten sind besser kalkulierbar und die Lufträume, inklusive der Flughäfen, sind effizienter nutzbar.

Die zu erwartende Reichweite des Luftfahrzeugs lässt sich, durch entsprechende Nutzung der atmosphärischen Windverhältnisse, erhöhen. Bei einer Luftnotlage, in der es nicht sicher ist, ob das Flugzeug den nächsten Flughafen erreicht, ist es möglich dem LFZ den bestmöglichen Flugpfad innerhalb des vorherrschenden Strömungsfelds zuzuweisen, um eine Katastrophe abzuwenden. In der Transportfliegerei ist, unter Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Gegebenheiten, ein besseres Verhältnis von verbrauchtem Treibstoff pro Kilogramm Last erzielbar.

Für die atmosphärische Forschung bieten die Mode S Daten zahlreiche Möglichkeiten. Anhand der hohen räumlichen Auflösung zu einem Termin ließen sich die Polarfronttheorie (Bjerknes) und die anknüpfende Conveyor Belt Theorie (Browning und Harrold) verfeinern.

## 9. Anhang

### 9.1. Windkarten für den 05.05.2015

Um das Starkwindband (Jet) über Europa hervorzuheben sind Windgeschwindigkeiten oberhalb von 60KT von Hand gemäß der Zeichen- und Colorierungsvorschriften des DWD, eingetragen.

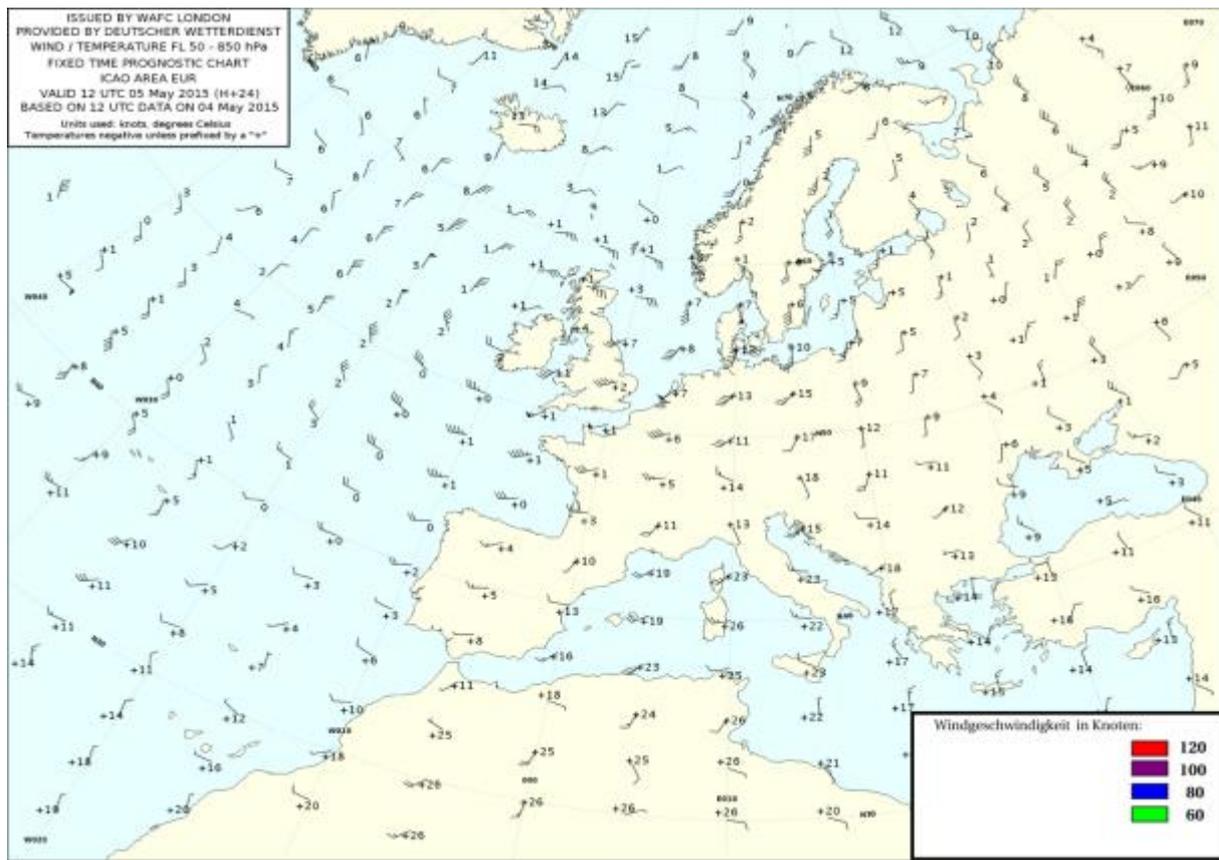


Abb. 9.1-1: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL050, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h

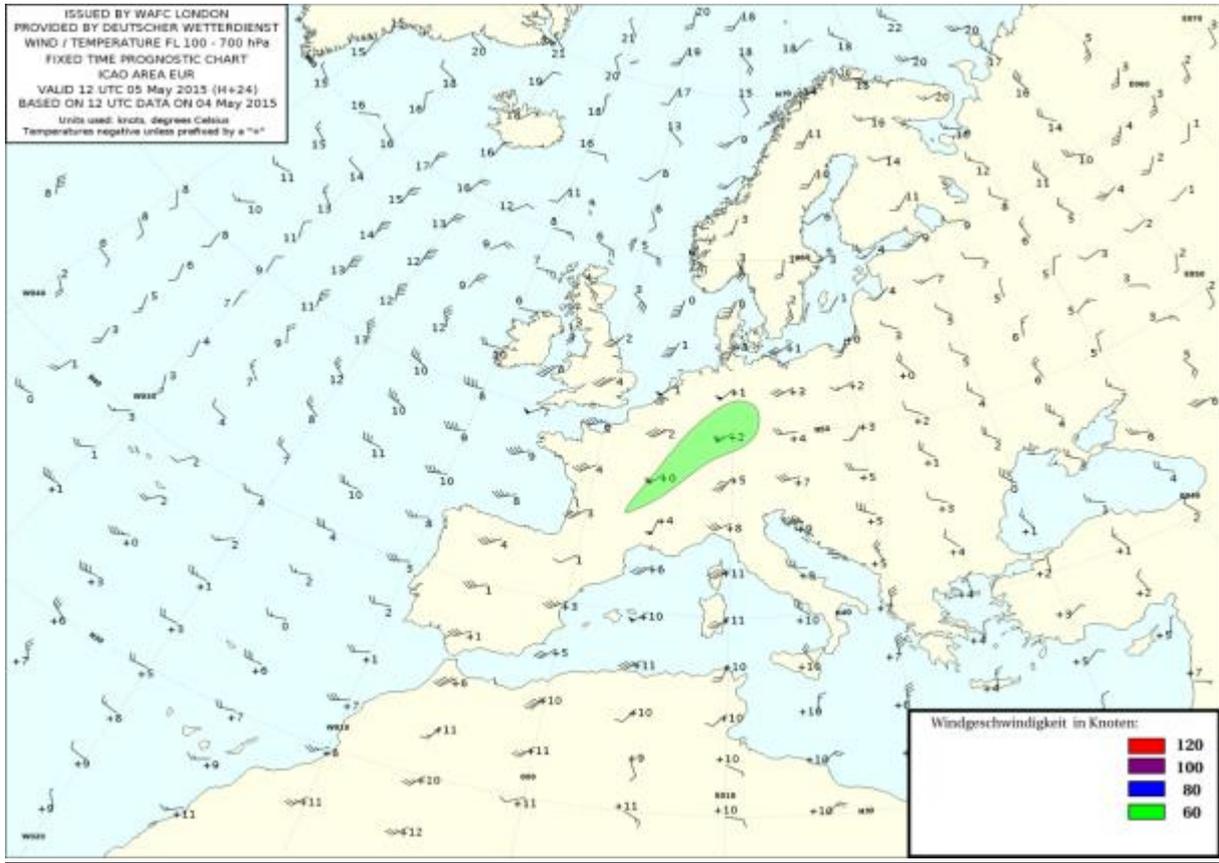


Abb. 9.1-2: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL100, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h

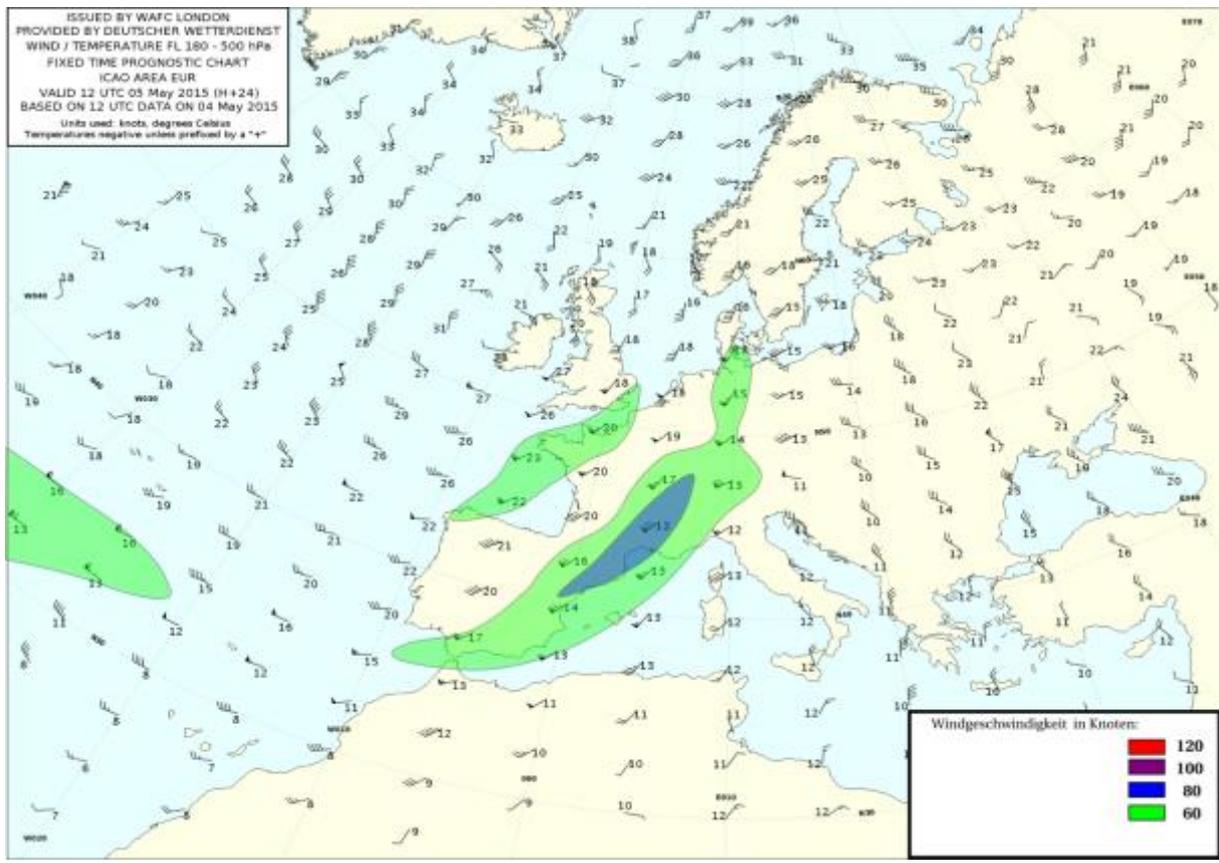


Abb. 9.1-3: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL180, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h

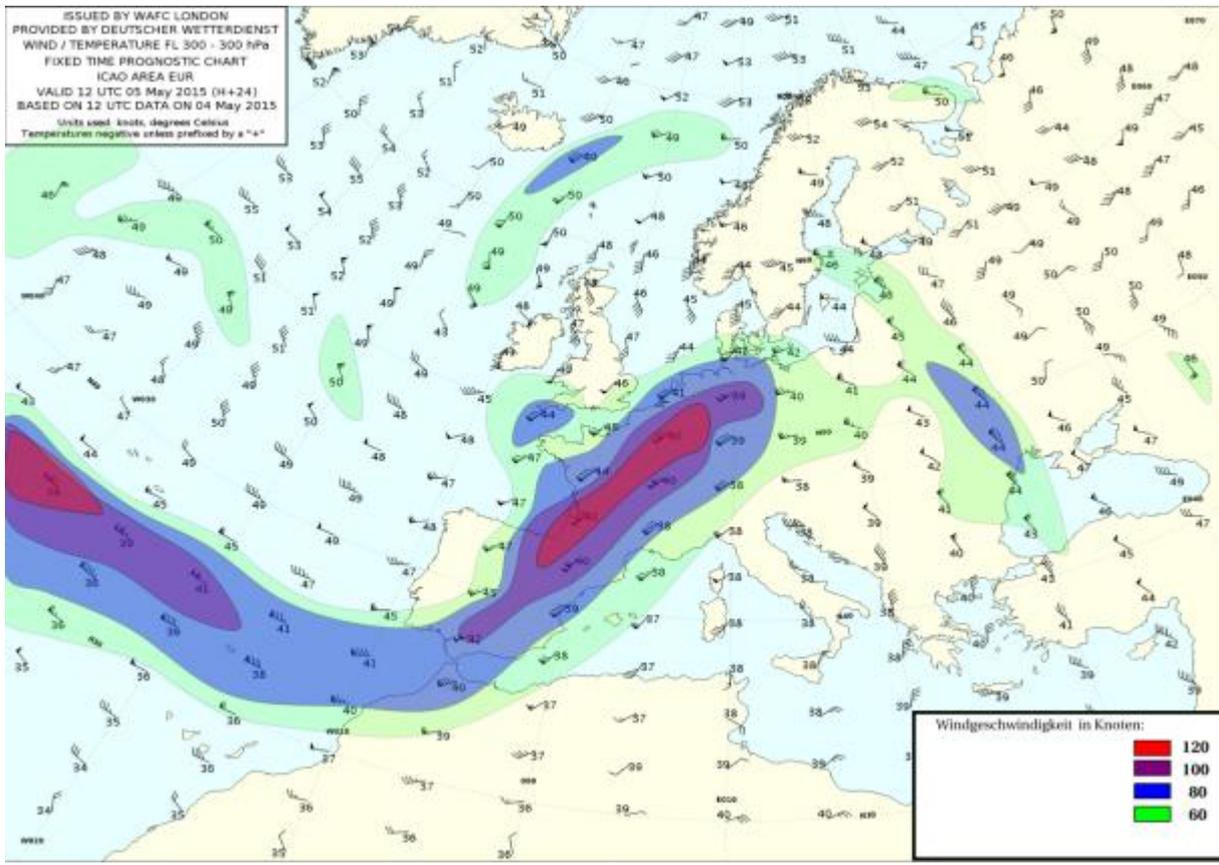


Abb. 9.1-4: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL300, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h

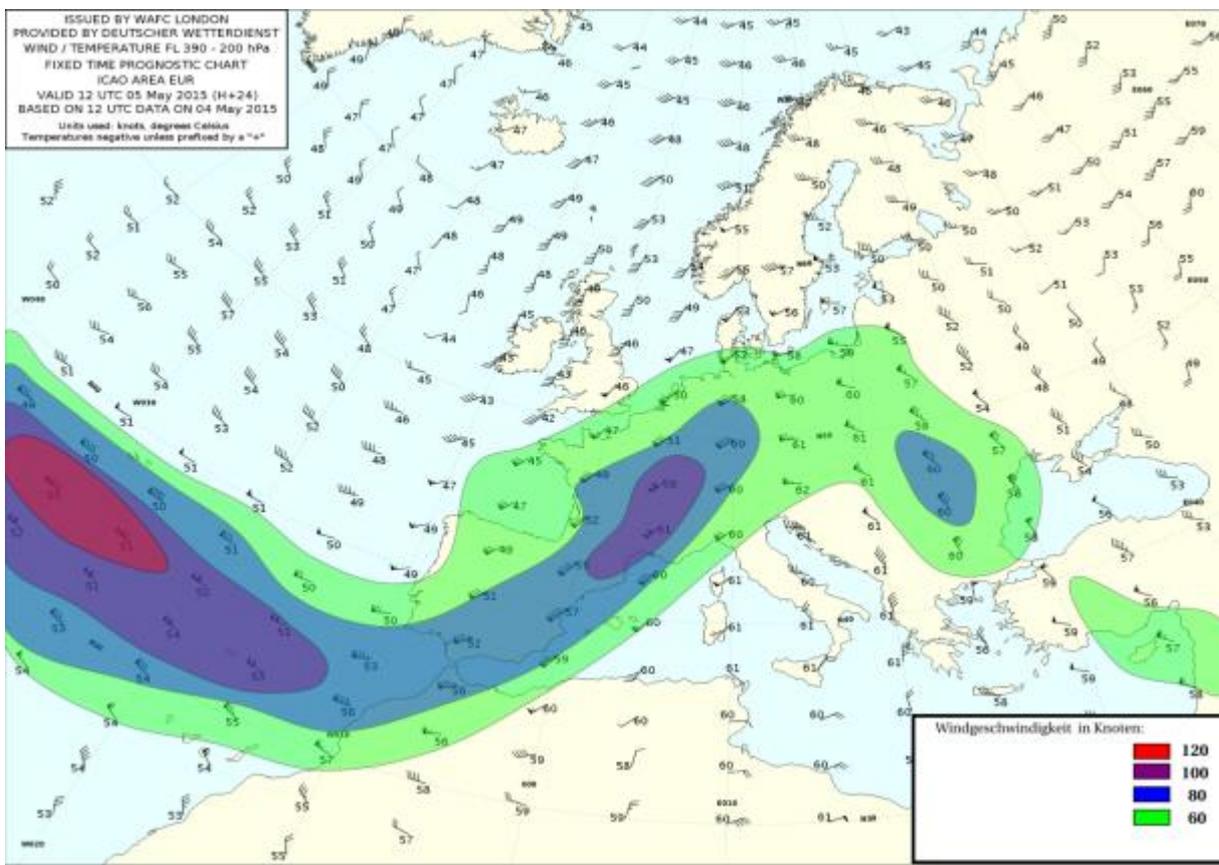


Abb. 9.1-5: Wind und Temperaturkarte für Europa im FL390, gültig 05.05.2015 12.00 UTC+24h

[vgl.: 34]

## 9.2. Auszug aus dem ASTERIX Code

Die in der Tabelle aufgeführten Bestandteile des ASTERIX – Codes sind für die meteorologische Auswertung im Rahmen dieser Arbeit relevant:

Position	<b>Data Item I048/040,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• gemessene Position des LFZ in Polarkoordinaten</li><li>• Nordausrichtung des LFZ</li><li>• Maximale Reichweite des Transpondersignals → 256NM Genauigkeit → 0,0055°</li><li>• Data Item I048/042, Position in Kartesischen Koordinaten</li><li>• Maximale Reichweite des Transpondersignals → 256NM (Diese Information ist optional)</li></ul>
Flughöhe des LFZ	<b>Data Item I048/090,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Flight Level ist die Höhe der Flugfläche in Fuß Genauigkeit → 25 Fuß</li></ul>
Zeitangabe	<b>Data Item I048/140,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Uhrzeit in UTC im 24h – Format Genauigkeit → 1/128s</li></ul>
Flugbahngeschwindigkeit und Kurs	<b>Data Item I048/200,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Geschwindigkeit in NM/s; Genauigkeit → 0,22KT</li><li>• Polarkoordinaten in Grad; Genauigkeit → 0,0055°</li></ul>
ID des Luftfahrzeugs (ICAO 24bit adresse)	<b>Data Item I048/220,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• eindeutige Luftfahrzeug – ID als 24bit Mode S Adresse Ist in jeder ASTERIX - Meldung enthalten</li></ul>
Kommunikation/ ACAS Leistungsfähigkeit und Fluglage	<b>Data Item 1048/230,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Leistungsfähigkeit des Transponders,</li><li>• Leistungsfähigkeit des Kollisionswarnsystems (ACAS) und die Fluglage</li><li>• ...</li><li>• Ausgabe der Leistungsfähigkeit der Höhengabe → 100ft (0) oder 25ft (1)</li><li>• ....</li></ul> Ist in jeder ASTERIX - Meldung enthalten
Luftfahrzeugkennzeichen	<b>Data Item 1048/240,</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Kennzeichen das ein Luftfahrzeug eindeutig identifiziert</li></ul> Ist in jeder Asterix – Meldung enthalten

Abb. 9.2-1: Auszug aus dem ASTERIX - Code

[vgl.: 45]

## **10. Begriffserklärungen**

### **ASTERIX**

*All Purpose***ST***ructured***E***urocontrol***Su***R**veillance***I***nformation***Ex***change*

Zur Kommunikation zwischen Sekundärradar und Transponder verwendet EUROCONTROL das binäre Datenformat Asterix. Es ist nach ISO 7498 standardisiert und übertragungsartunabhängig (WAN, LAN, IP,...) um den Austausch von Radarüberwachungsdaten national und international zu erleichtern. Alle Mitglieder der „Europäischen Zivilluftfahrt- Konferenz“ nutzen Asterix in der Luftraumüberwachung.

[vgl.: 46]

### **10.1. Das Flugflächensystem und seine Nomenklatur FLxxx**

In der Luftfahrt sind Flugflächen Flächen gleichen Luftdrucks. Sie werden ihrer Höhe über Normaldruck der ICAO- Standardatmosphäre (1013,25 hPa) in Hektokuß angegeben. FL100 entspricht einer Höhe von 10000 Fuß über Normaldruck.

### **10.2. Die Flugregeln und ihre Nomenklatur**

Bei Flugvorhaben unterscheidet man zwischen Instrumentenflug (IFR) und Sichtflug (VFR). IFR stützt sich auf die dem Piloten zur Verfügung stehenden Instrumente und den zuständigen Fluglotsen. Das Flugvorhaben ist bei der zuständigen Flugsicherung bis mindestens 1h vor Flugantritt einzureichen. Hauptsächlich wird es im kontrollierten Luftraum und bei Nacht angewendet. Eine entsprechende, rechtlich festgelegte Ausrüstung des Luftfahrzeugs ist vorgeschrieben.

[vgl.: 35, /Instrument\_Flight\_Rules]

VFR ist der Flug nach Sichtflugregeln. Er findet außerhalb des kontrollierten Luftraumes statt. Wie der Name schon aussagt fliegt der Pilot ausschließlich nach Sicht. Um die Luftsicherheit zu wahren sind Mindestabstände zu anderen fliegenden Objekten einzuhalten. Sind „Visual Meteorological Conditions“ (VMC) für das Flugvorhaben nicht gegeben darf der Flug nicht angetreten werden.

[vgl.: 35, /Visual\_Flight\_Rules]

### 10.3. Synoptische Termine

„Synoptische Termine“ sind international festgelegte Zeiten an denen synoptische Beobachtungen durchgeführt werden. Sie sind unterteilt in:

Haupttermine in UTC	Zwischentermine in UTC	Stundentermine in UTC
00	03	jede Stunde
06	09	
12	15	
18	21	

Tabelle 10.3-1: Synoptische Termine

[vgl.: 36]

### 10.4. Synoptische Station

Eine meteorologische Station an der achtmal täglich zu den dreistündigen Terminen Beobachtungen und Messungen durchgeführt werden. Zwischen den Terminen werden außerdem fortlaufend Auftreten, Dauer und Intensität von markanten Wettererscheinungen aufgezeichnet. ...“

[vgl.: 36]

### 10.5. Isotachen

Linien gleicher Windgeschwindigkeit

[vgl.: 36]

### 10.6. Fluggeschwindigkeiten in der Luftfahrt

[vgl. : 37]

#### 10.6.1. Wahre Fluggeschwindigkeit

„Die *Wahre Fluggeschwindigkeit* (engl. *true air speed, TAS*) ist die tatsächliche Geschwindigkeit eines Luftfahrzeuges relativ zur umgebenden Luft.“

#### 10.6.2. Geschwindigkeit relativ zum Boden (Groundspeed)

„Die *Geschwindigkeit über Grund* (engl. *ground speed, GS*) bezeichnet die um den Windeinfluss (also die Bewegung der durchflogenen Luftmasse selbst) korrigierte *Wahre Fluggeschwindigkeit*. Sie stellt die Geschwindigkeit eines Luftfahrzeuges relativ zur Erdoberfläche dar.“

### 10.6.3. Mach Zahl

„Die *Mach-Zahl* ist das Verhältnis der *TAS* zur Schallgeschwindigkeit bei gegenwärtiger Lufttemperatur.“

### 10.7. Kata - , Anafront

Bergeron hat zwei Charakteristika für Warm – und Kaltfronten definiert. Bei der Anafront gleitet die Warmluft relativ zur Kaltluft auf diese auf. Bei der Katafront gleitet die Warmluft relativ zur Kaltluft von dieser ab.

[vgl.:38]

### 10.8. Windrichtung

Die Windrichtung ist, meteorologisch, als die Richtung aus welcher der Wind weht definiert. Anhand des Polarwinkel (Azimut) wird sie bestimmt. Zur Richtungsangabe dient die Kreiseskala in 360° unterteilt. Die Richtungsangaben in Grad beziehen sich rechtsweisend auf geographisch Nord = 360°, Ost = 90°, Süd = 180° und West=270°.

[vgl.: 36]

## 11. Abkürzungsverzeichnis

ACAS →	Aircraft Collision Avoidance System (Kollisionswarnsystem)
ADC →	„Air Data Computer“; Bordcomputer
ADR →	Airspace Data Repository
ADS →	automatische bordabhängige Überwachung
ADS-B →	Automatic Dependent Surveillance; automatische bordabhängige Überwachung (System der Flugsicherung)
AMDAR →	„Aircraft Meteorological Data Relay“; Messnetz zur Messung von meteorologischen Werten an Linienflugzeugen
ANSP →	Air Navigation Service Provider
AIS →	Aeronautical Information Service
AIP →	Aeronautical Information Publication
ASTERIX →	All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange Protokoll zur Übertragung von Flugüberwachungsdaten
ATS →	Air Traffic Service
BUFR →	universelles Datenformat zur Speicherung von meteorologischen Informationen
CAT →	Clear Air Turbulence ;Turbulenzzone an Jet Streams
COSMO →	Consortium of small scale Modelling; numerisches Wettermodell
EUROCONTROL →	Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt
GDS →	globaler Datensatz des Deutschen Wetterdienstes
GS →	Ground Speed
GTS →	„global telecommunicationsystem“ globales System zur Verteilung von Nachrichten der WMO
ICAO →	International Civil Aviation Organisation
IFR →	Instrument Flight Rules ; Instrumentenflug
IRU →	Internal Reference Unit; Sensor der Beschleunigung und Drehrate misst
KLA →	Kaltluftadvektion
MSL →	MeanSea Level; Standard Meereshöhe
LFZ →	Luftfahrzeug
LP →	Luftpaket
PALT →	PressureAltitude; Druckhöhe
QGIS →	freies Geoinformationssystem zum Betrachten, Bearbeiten und Erfassen von räumlichen Daten

RADNET → Radar Data Network  
RBSN → Regionally Basic Synoptic Network  
RMCDE → Surveillance Message Conversion and Distribution System  
RVSM → Reduced Vertical Separation Minimum; dtsh. Reduzierte Vertikalstaffelung ;  
vertikaler Mindestabstand 1000 Fuß von Luftstraßen FL290 – FL410  
SDDB → Surveillance Data Distribution Board  
SSR → Secondary Surveillance Radar  
SURNET → Surveillance Data Network  
TAR → Tracking and Ranging ; Radar zur Luftraumüberwachung  
TAS → True Airspeed  
UK NATS → UK National Air Traffic Service  
UTC → „Coordinated Universal Time“; Weltzeit  
WAFC → World Area Forecast Centre  
WLA → Warmluftadvektion  
WMO → „World Meteorological Organization“; Weltorganisation für Meteorologie

## 12. Literaturverzeichnis:

- [1] WMO-No.544 Manual on the Global Observing System, Volume 1, Global Aspects, 2003, Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva – Switzerland
- [2] WMO-No.8 Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 7th Edition-2008, World Meteorological Organization – Geneva – Switzerland
- [3] WMO Technical Report No. 2014 -01, WIGOS
- [4] WMO Aircraft Meteorological Delay (AMDAR) Reference Manual, WMO- No. 958, 2003 , Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva – Switzerland
- [5] DWD Allgemeine Meteorologie; ISBN:3-88148-236-9; S37
- [6] ICAO, Annex 3, Meteorological Service for International Air Navigation, Eighteenth Edition July 2013, S51ff.
- [7] Aeronautical Information Manual, U.S. Department of transportation, 03.04.2014
- [8] ICAO Doc4444 Air Traffic Management Fifteenth Edition – 2007 / Chapter 8 ff.
- [9] Regelung der europäischen Kommission „Commission Regulation (EC) NO 1032/2006 of 6 July 2006“
- [10] [www.gps.gov](http://www.gps.gov) ;[http://de.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System#GPS\\_III](http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System#GPS_III); Datum Aufruf (12.03.2015)
- [12] DWD:> Aufgabenspektrum > Meteorologische Datengewinnung > Datengewinnungsverfahren > Flugzeugmessungen; Datum Aufruf (25.02.2015)
- [13] Wikipedia: „Das Sekundärradar“; Datum Aufruf (05.02.2015)
- [14] [http://www.dfs.de/dfs\\_homepage/de/Unternehmen/Zahlen%20und%20Daten/Statistiken/Annual\\_Summary\\_2014.pdf](http://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Zahlen%20und%20Daten/Statistiken/Annual_Summary_2014.pdf); Datum Aufruf (25.02.2015)
- [15] [http://www.comsoft.aero/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/rmcde\\_01.pdf](http://www.comsoft.aero/fileadmin/_migrated/content_uploads/rmcde_01.pdf); Datum Aufruf (18.03.2015)
- [16] Wikipedia >> Deklination (Geographie); Datum Aufruf (17.03.2015)
- [17] DFS -> Unternehmen -> Zahlen und Daten -> Statistiken -> LIZ Bulletin 19/2015; Datum Aufruf (30.03.2015)
- [18] [www.dfs.de/dfs\\_homepage/de/Flugsicherung/Luftraum/Luftraumstruktur\\_11122014.pdf](http://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Luftraum/Luftraumstruktur_11122014.pdf); Datum Aufruf (27.03.2015)
- [19] <http://www1.wetter3.de/Archiv/>; Datum Aufruf (23.04.2015)
- [20] Verordnung über die Flugsicherungs-ausrüstung der Luftfahrzeuge vom 26. November 2004 (BGBl. I S. 3093)
- [21] [gesetze-im-internet.de](http://gesetze-im-internet.de) >>LuftVG §27ff; Datum Aufruf (18.03.2015)
- [22] Eurocontrol: Model Guidelines and Procedures for the Provision of Live Surveillance

- Data in an International Context; Edition 1.0, 12.09.2001; Datum Aufruf (18.03.2015)
- [23] Eurocontrol; Specification for ATM Surveillance System Performance (Volume 1)  
DOCUMENT IDENTIFIER: EUROCONTROL-SPEC-0147; Edition Number 1.0; Date  
30.03.2012; S26ff.
- [24] BesAnGeoInfoWBw 1-15-230 Oktober 2011, S25ff
- [25] <http://amdar.noaa.gov/docs/bams/2.html> ;Monthly average of the daily count of aircraft  
wind observations used in the NCEP/NCAR global reanalysis from 1960 through 1999.  
Courtesy of R. Kistler, NCEP; Datum Aufruf (02.02.2015)
- [26] „[http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-  
documents/Defense\\_Brochures-documents/Honeywell\\_Magnetic\\_Sensors\\_and\\_  
Compassing\\_Solutions.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Honeywell_Magnetic_Sensors_and_Compassing_Solutions.pdf)“; Datum Aufruf (02.06.2015)
- [27] [https://de.wikipedia.org/wiki/Effektive\\_Klimaklassifikation](https://de.wikipedia.org/wiki/Effektive_Klimaklassifikation); Datum Aufruf (09.06.2015)
- [28] <http://www.gadm.org/version1>; Datum Aufruf (06.05.2015)
- [30] Eurocontrol Study; Study on the legal aspects of ATM services and the possible impact  
on SWIM; 12.07.2012; Ed. Num. 1.01
- [31] DWD Leitfaden Nr.1 Allgemeine Meteorologie; 3. Auflage Offenbach am Main  
1987; ISBN 3-88148-236-9; S49ff.
- [32] Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst 8; Synoptische Meteorologie;  
zweite Auflage von Manfred Kurz; Selbstverlag des DWD 1990; ISBN 3-88148-262-8;  
S67ff
- [33] [www.pcmnet.de](http://www.pcmnet.de) ->Allg. Wetterkarten -> Vertikalprofile ->Messungen ->  
Radiosondenstationen in Europa; Datum Aufruf (12.05.2015)
- [34] [www.pcmnet.de](http://www.pcmnet.de) -> Verkehrsluftfahrt
- [35] <http://www.eurocontrol.int/lexicon/lexicon/en/index.php/>; Datum Aufruf (16.03.2015)
- [36] Meyers kleines Lexikon Meteorologie; Mannheim 1987; ISBN 3-411-02661-8
- [37] [http://de.wikipedia.org/wiki/True\\_Airspeed#Wahre\\_Fluggeschwindigkeit\\_.28TAS.29](http://de.wikipedia.org/wiki/True_Airspeed#Wahre_Fluggeschwindigkeit_.28TAS.29);  
Datum Aufruf (06.05.2015)
- [38] Bergeron, T.: Über die dreidimensionale verknüpfende Wetteranalyse. Geophys. Publ. 5,  
Nr.6 (1928)
- [39] Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations.  
*AnnalesGeophysicae*, Volume 12, pp. 691–710
- [40] internes Geoinformationssystem der Airbus Defence and Space
- [41] Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft; Drüe,  
Frey, Hoff, Hauf; Quarterly Journal of the royal meteorological society 134 (2008) S229  
– 239

- [42] Assimilation of Mode S Aircraft Observations in COSMO-KENDA; Heiner Lange, TijanaJanjic; Hans Ertel Centre for Weather Research, Data Assimilation Branch, Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland, 2015
- [43] Journal of Geophysical Research Vol.116, D10111 doi:10.1029/2010JD015264,2011; High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by ModeS air traffic control radar; S.de Haan
- [44] American Meteorological Society Feb 2003, S84; Moninger ,Mamrosh, Pauley
- [45] Eurocontrol Standard DocumentforSurveillance Data Exchange Part4: Category 048 v1.21
- [46]www.eutocontrol.int/asterix; Datum Aufruf (02.03.2015)

### **13. Softwareverzeichnis**

MS Word 2010

QGIS 2.9.0-Master

InKscape 0.48

Gimp 2.8.14

LibreOffice Calc Version:4.3.7.2

Opensuse Linux

Bash

GIS Airbus D&S