



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Sverre Reinke

Entwicklung eines Modells zum Verschleiß und der Abnutzung eines Flugzeugreifens anhand von OpenSkyNet Daten

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Nomenklatur

α	Längsschlupfverhältnis
κ	Längsschlupfverhältnis
μ	Längsschlupfverhältnis
ω	Winkelgeschwindigkeit
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
FLARM	Kollisionswarngerät für Kleinflugzeuge
GPS	Global Positioning System
m	Masse
Mode S	Sekundärradar Standard
NLG	Frontfahrwerk
OSN	OpenSky Network
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
ATRA	Advanced Technology Research Aircraft
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung
c_0	Fluggeschwindigkeit
COG	Schwerpunkt (Centre of Gravity)
FOD	Schaden durch Fremdkörper (Foreign Object Damage)
G	Gewichtskraft
ICAO-Code	Eindeutiger Flugplatzcode
k_R	Rollwiderstandsbeiwert
LH	Linke Seite (left handed)
m_B	Brennstoffmasse
m_{MTOW}	Maximales Startgewicht
MLG	Hauptfahrwerk

Nomenklatur

NLG	Nose Landing Gear
R_e	Reifenumfang
B_S	spezifischer Treibstoffverbrauch
R_W	Reichweite
RH	Rechte Seite (right handed)
T	Schubkraft der Triebwerke
V_x	Fahrtgeschwindigkeit des Reifens

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Aufgabenstellung und Durchführung	7
3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe	8
3.1. Flugzeug und Fahrwerk	8
3.2. Aufbau eines Flugzeugreifens	9
3.3. Versagenskriterien eines Flugzeugreifens	10
3.3.1. Reifenabrieb	11
3.3.2. Schnitte und Beschädigungen durch Fremdkörper	16
3.3.3. Lokaler Abrieb	16
3.4. Daten, ihre Nutzung und wichtige physikalische Zusammenhänge	17
3.4.1. OpenSky Network	17
3.4.2. D-ATRA	19
3.4.3. Bezeichnungen der Luftfahrt	20
3.4.4. Breguet'sche Reichweitenformel	20
4. Umsetzung	22
4.1. Abnutzungsbasierter Verschleiß eines Flugzeugreifens	22
4.1.1. Wirkende Kräfte am Fahrwerk eines Airbus A320	22
4.1.2. Analyse der verschleißbedingten Reifenabnutzung	23
4.1.3. Bestimmung von Fahrwerkslasten im Taxi-Betrieb	24
4.1.4. Bewertung von Flughäfen	26
4.2. Außerordentliche Abnutzung eines Flugzeugreifens	28
4.2.1. Erkennen von Schäden am Reifen	28
4.2.2. Modell zur Fehlernachverfolgung	29
5. Auswertung und Ergebnisse	33
5.1. Modell zum abnutzungsbasierten Verschleiß	33
5.1.1. Ergebnisse des Verschleißmodells	33
5.1.2. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	34
5.2. Fehlerrückverfolgung	36
5.2.1. Ergebnisse des Modells zur Fehlerrückverfolgung	36
5.2.2. Analyse der Ergebnisse	36
6. Zusammenfassung und Fazit	39
7. Ausblick	39
Literatur	40
A. Liste der Flughäfen der verwendeten Flugdaten	41

1. Einleitung

Obwohl ein Flugzeug zum Fliegen gedacht ist, muss es auch am Boden fahren, um an sein endgültiges Ziel zu gelangen. Dabei sind die Reifen enormen Belastungen ausgesetzt. Sie müssen bei allen Witterungen funktionieren, müssen Lasten von mehreren Tonnen tragen und bei Geschwindigkeiten weit über 100 km/h standhalten. Im Gegensatz zu Reifen in der Automobilindustrie ist es bei Flugzeugen üblich, diese wieder aufzubereiten. Dies spart zum einen Ressourcen, zum anderen ist es aber auch der wirtschaftliche Weg, denn ein neuer Flugzeugreifen kann so viel kosten, wie ein neuer Kleinwagen.

Wenn ein Reifen nach seiner Nutzung nicht mehr einsatzfähig ist, wird er vom Hersteller angenommen und überprüft, ob sich dieser für weitere zukünftige Einsätze wieder aufbereiten lässt. Praktischer wäre es aber, wenn der Hersteller, noch während der Reifen in Betrieb ist, digital prüfen könnte, wie der aktuelle Zustand ist.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt verfolgt genau dieses Ziel mit seinem Projekt „Digitaler Zwilling“. Es werden digitale Kopien von Bauteilen erschaffen und Simulation von Prozessen entwickelt, um frühzeitig Probleme zu erkennen und Prozesse in Echtzeit zu überwachen. Diese Arbeit ist ein Teil des Digitaler Zwilling. Ziel ist es, mit einer Simulation Rückschlüsse auf den Zustand eines Fahrzeugreifens zu erlangen.

2. Aufgabenstellung und Durchführung

In Flugzeugen und an Flughäfen werden im Verlauf des Fluges sowie während des Starts und der Landung eine Vielzahl an Daten gesammelt. Ein Großteil der Daten steht ausschließlich zur Nutzung für interne Zwecke zur Verfügung, doch einige Flugdaten werden an Bodenstationen gesendet, gespeichert und sind zur freien Einsicht verfügbar. Die dafür notwendige Infrastruktur ist umfangreich und aufwendig und verursacht durch ihre Wartung und Instandhaltung fortlaufend Kosten. Solange die gespeicherten Daten jedoch nicht genutzt werden, steht diesen kein Gewinn gegenüber.

Ziel dieser Arbeit ist es, die durch OpenSkyNet (OSN) frei zugänglichen Flugdaten zu nutzen und mithilfe dieser Aussagen über den Verschleiß von Flugzeugreifen zu gewinnen. Hierfür soll in der Programmiersprache Python ein Programm geschrieben werden, das auf Grundlage der Daten von Zeit, Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung eines Flugzeugs Rückschlüsse über den Zustand seiner Bereifung zulässt.

Für die Modellerstellung sollen Daten eines Flugzeuges vom Typ Airbus A320 neo verwendet werden, um hieraus ein Modell zur Abnutzung der Reifen zu entwickeln. Hierfür müssen die zur Verfügung stehenden Daten aufbereitet und bereinigt werden. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob anhand von Fehlerfunden am Reifen Rückschlüsse über fehlerinduzierende Flughäfen getroffen werden können. Eine Verifizierung des Modells erfolgt mit aufgenommenen Daten des Airbus A320 D-ATRA, einem Flugzeug der Flotte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrttechnik. Sowohl für das Modell zum Verschleiß, wie auch für die Rückverfolgung von Fehlern ist das Vorgehen sowie wichtige Arbeitsschritte und Erkenntnisse zu dokumentieren. Ziel ist es zu prüfen, ob mit Hilfe der verwendeten Daten Rückschlüsse über den Einfluss von Flughäfen auf die Lebensdauer von Flugzeugreifen getroffen werden können.

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Grundlagen um die Abnutzung von Reifen sowie wichtigen Hintergrundinformationen, die zur Bestimmung des Verschleißes von Flugzeugreifen beitragen. Darüber hinaus wird auf die Art und Eigenschaften der verwendeten Mittel eingegangen.

3.1. Flugzeug und Fahrwerk

Das Modell wird zunächst auf Grundlage der Daten eines Flugzeuges vom Typ Airbus A320-200 entwickelt. Mit über 10.000 verkauften Flugzeugen ist die A320 Familie von Airbus die erfolgreichste und meistverkaufte Modelllinie weltweit. [5] Hierbei bildet der A320 das Grundmodell dieser Reihe. In den Abbildungen 1 und 2 sind die Dimensionen des Fliegers dargestellt. [5]

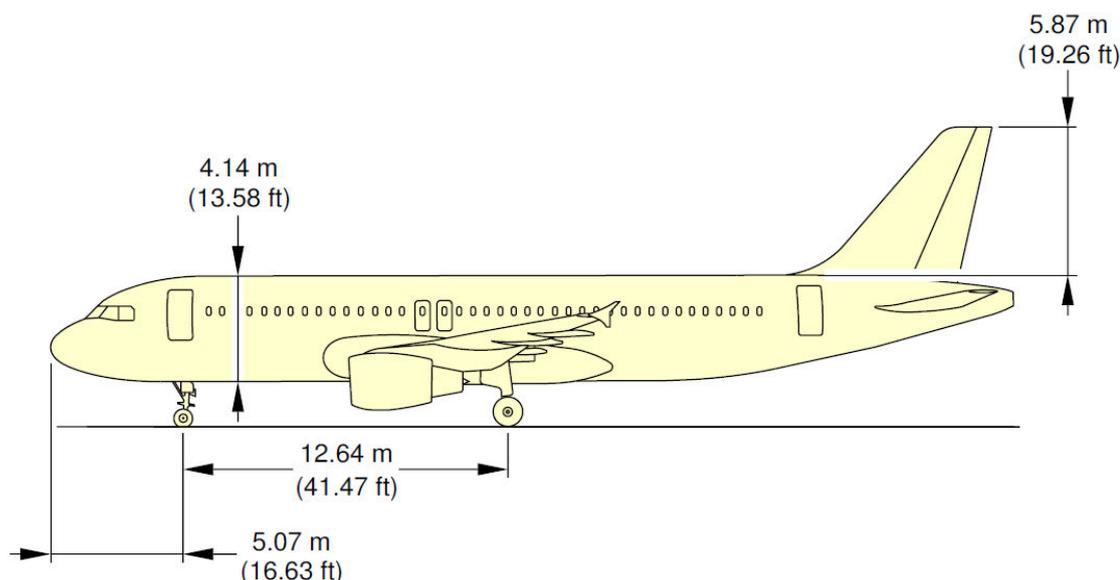


Abbildung 1: Seitenansicht eines Airbus A320 neo [6]

Das Hauptfahrwerk oder auch MLG (Main Landing Gear) liegt 22,25 m hinter der Flugzeugspitze und ist unter den Tragflächen des Flugzeuges angebracht. Die Reifen haben einen Nenndurchmesser von 49 Zoll (1245 mm). Dabei liegen die beiden Fahrwerke jeweils 3.79 m außerhalb der Mittelachse. Der Abstand zwischen den beiden Reifen an einem Fahrwerk beträgt 0,93 m, bezogen auf die Mitte der Lauffläche.

Das Frontfahrwerk oder auch NLG (Nose Landing Gear) ist 5,07 m von der Flugzeugspitze angebracht und hat damit einen Abstand von 12,64 m zum Hauptfahrwerk. Mit einem Nenndurchmesser von 30 Zoll (762 mm) ist es etwas kleiner als das Hauptfahrwerk. Der mittlere Abstand zwischen den Rädern beträgt 0,5 m. [6]

Der Airbus A320 neo, der in dieser Arbeit als Grundlage für das Modell dienen soll, hat eine maximale Startgewicht von 73,5 t, startet mit einer Geschwindigkeit von rund 150 Knoten und hat eine Reichweite von 3.200 km [4]. Für die Landung beträgt das maximal zugelassene Gewicht 66 t bei einer Höchstgeschwindigkeit von 136 Knoten [6].

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

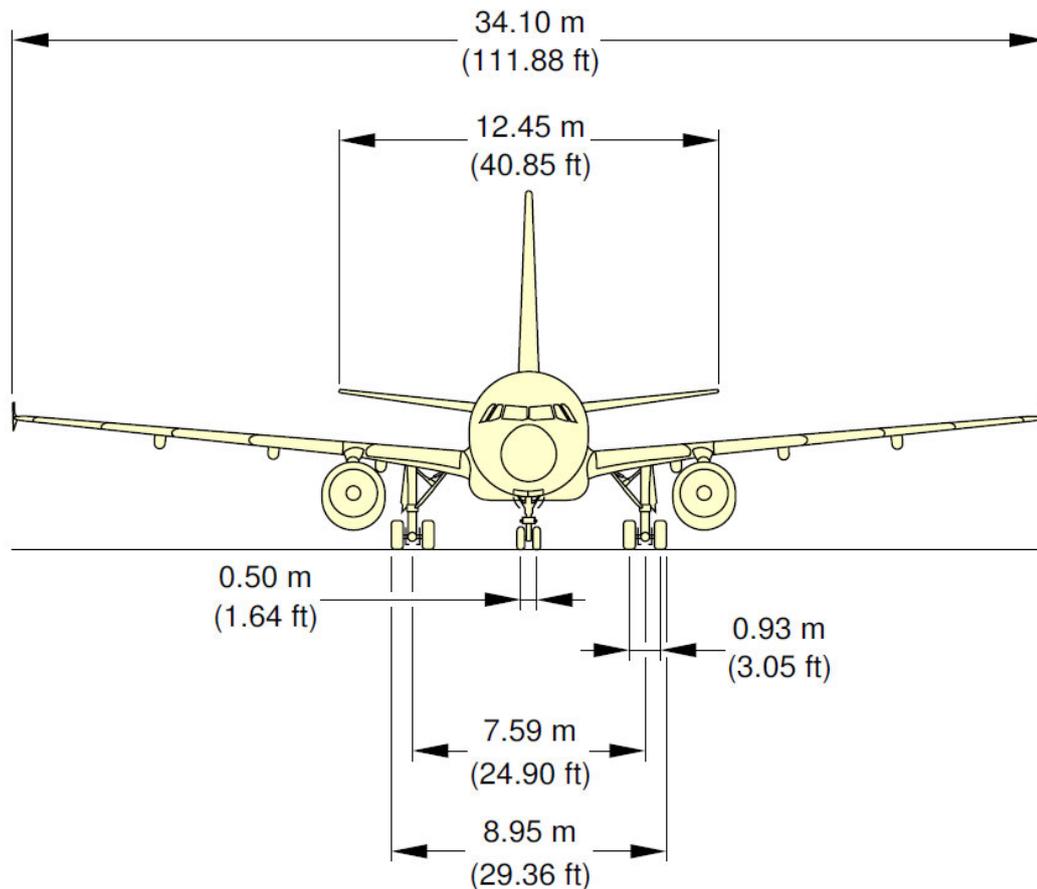


Abbildung 2: Frontansicht eines Airbus A320 neo[6]

3.2. Aufbau eines Flugzeugreifens

Flugzeugreifen sind in den Grundzügen ähnlich zu denen gängiger Fahrzeuge. Die Lauffläche (siehe Abbildung 3) erstreckt sich zwischen den beiden Seitenwänden des Reifens. Der Übergang zwischen diesen Zonen wird dabei Schulter genannt, die noch zur Lauffläche gezählt wird. Betrachtet man genauer den Wulst des Reifens, über den dieser mit der Felge verbunden wird, unterteilt man diesen wiederum von innen nach außen in die Zonen Wulstspitze, -flach, -ferse sowie den Wulst-Flanschbereich. Das Wulstflach liegt dabei an der Felge an.[16]

Im Detail können sich Reifenmodelle in einigen Punkten unterscheiden. Beispielhaft wird in Abbildung 4 ein Radialreifen der Firma Michelin dargestellt. Unter der Lauffläche ist häufig eine Schutzschicht aus einem Stahl- oder Nylongewebe mit einem darunter liegenden Grundgummi. Diese soll die innen liegenden Schichten vor Schnitten schützen. Darauf folgen einige Gürtelagen, die dem Reifen die benötigte Festigkeit in Laufrichtung bringen und somit den Durchmesser festlegen. Die darunter liegenden Gehäuselagen laufen in einem Winkel von bis zu 90° zur Rollrichtung. Abhängig vom Winkel der Gehäuselagen unterscheidet man zwischen Radial- und Bias-Reifen.

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

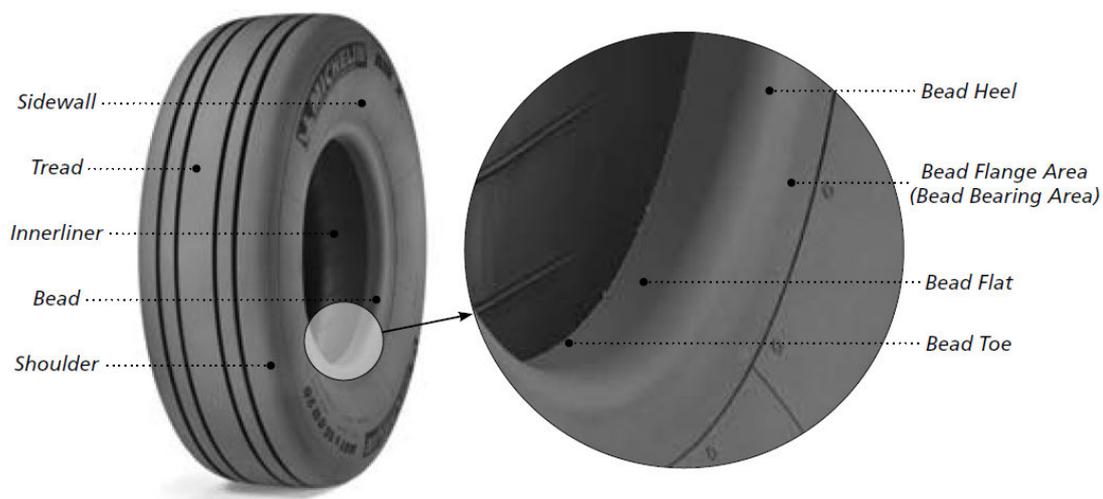


Abbildung 3: Zonen eines Flugzeugreifens [16]

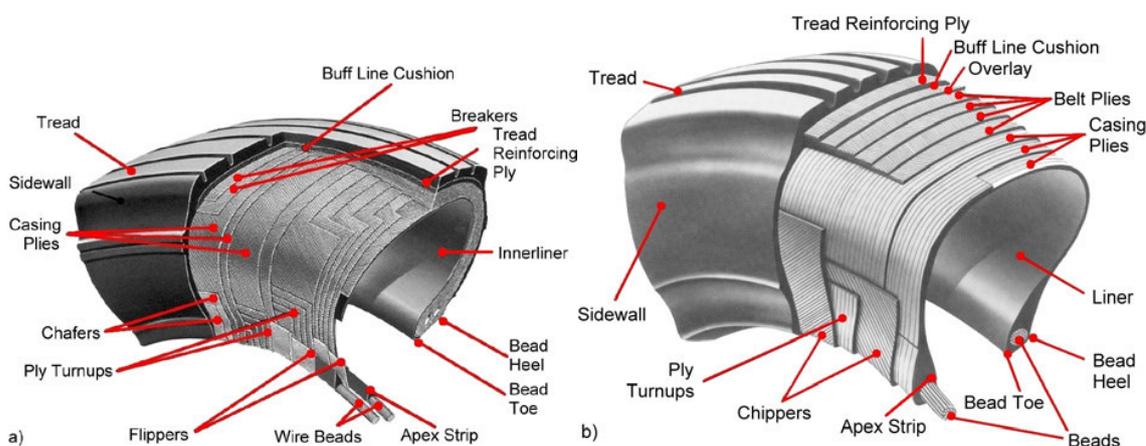


Abbildung 4: Aufbau von Diagonalreifen (a) und Radialreifen (b) [9]

3.3. Versagenskriterien eines Flugzeugreifens

Jeder Wartungseingriff an einem Flugzeug verursacht Kosten. Dabei macht auch das Fahrwerk keine Ausnahme. Hierbei spielen die Reifen selber eine relevante Rolle, denn sie haben einen Anteil von etwa 40 % an den Fahrwerkswartungen.[13]

Die Ursachen für eine Reifenwartung können vielseitig sein. Der überwiegende Teil ist jedoch auf den normalen Abrieb zurückzuführen [13]. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Kriterien, die den Wechsel eines Flugzeugreifens veranlassen. Die Kriterien können sich je nach Hersteller etwas unterscheiden. In diesem Abschnitt werden als Grundlage die Regularien des Reifenherstellers Michelin beispielhaft herangezogen. Einige der im Service & Care Manual von Michelin [16] aufgeführten Kriterien werden nachfolgend noch genauer betrachtet. Dabei ist es schwierig, jedem Kriterium einer Ursache zuzuordnen. In Abbildung 6 sind jedoch einige Punkte dargestellt, die Einfluss auf die Lebensdauer eines Reifens haben.

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

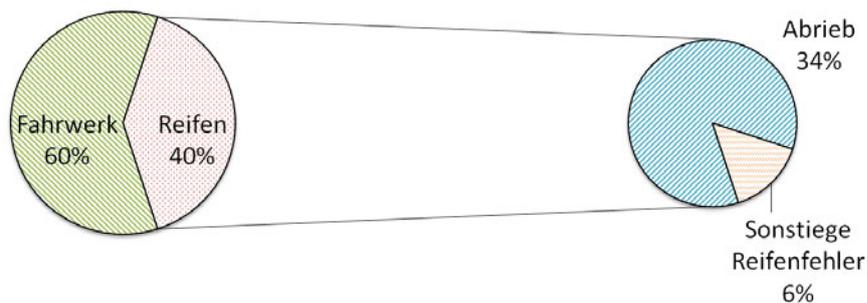


Abbildung 5: Anteil von Reifen und Abnutzung an Fahrwerkswartungen; nach [13]

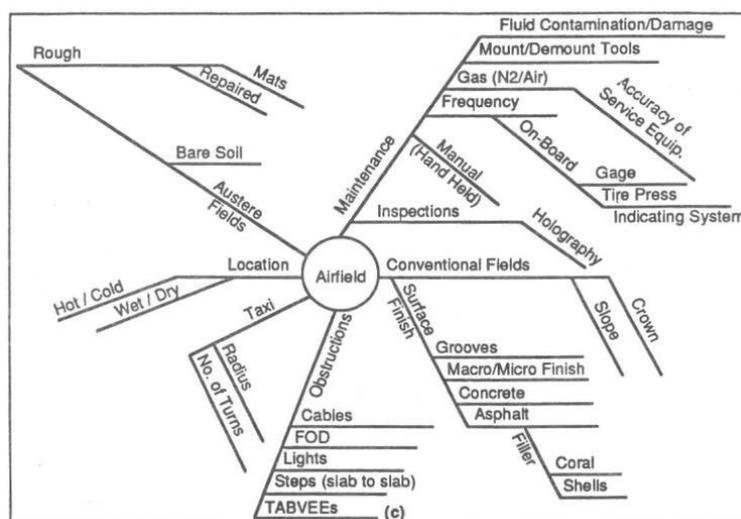


Abbildung 6: Einflüsse auf die Lebensdauer eines Flugzeugreifens [1]

3.3.1. Reifenabrieb

Reifenabrieb ist in erster Linie ein fortlaufender Prozess. Dabei unterscheidet man zwischen gleichmäßigem und ungleichmäßigem Abrieb. Gleichmäßiger Abrieb ist dabei das gängige Verschleißbild, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist.

Hierbei tritt die Abnutzung über die gesamte Lauffläche auf. Dem gegenüber steht der ungleichmäßige Abrieb. Dieser kommt zustande, wenn nicht die gesamte Breite gleichermaßen beansprucht wird.

Normaler Reifenabrieb Damit ein Abrieb am Reifen entsteht, ist eine Relativbewegung zwischen der Fahrbahn und der Lauffläche des Reifens notwendig. [12] Eine solche Relativbewegung wird im allgemeinen als Schlupf bezeichnet. Dabei kann man zwischen Längs- und Querschlupf unterscheiden. Die Bezugsrichtung ist dabei der Reifen, wie in Abbildung 8 dargestellt. [18]

Bildet die Symmetrieebene des Reifens mit der Fahrtrichtung einen Winkel α , so wird dieser Schlupfwinkel genannt. Aus ihm resultiert ein Querschlupf des Reifens.[18]

Das Längsschlupf -Verhältnis κ wird im normalen Fahrbetrieb wie folgt beschrieben: [18]

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe



Abbildung 7: Abrieb der Lauffläche[16]

$$\kappa = -\frac{V_x - R_e\omega}{V_x} \quad (1)$$

Dabei ist V_x die Fahrtgeschwindigkeit des Reifens in m/s. $R_e\omega$ ist entsprechend die Umfangsgeschwindigkeit des Reifens, zusammengesetzt aus dem Reifenumfang R_e multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit ω des Reifens. R_e wird dabei definiert als Radius ohne zusätzlich auf den Reifen wirkendes Drehmoment. An der Kontaktfläche zur Fahrbahn wirkt eine Kraft auf den Reifen, die diesen nach innen deformiert, so dass R_e kleiner ist als der Radius eines undeformierten Reifens. Durch diese Deformierung ergeben sich für die Fahrtgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit verschiedene Werte, die zum Längsschlupf des Reifens führen.[17]

Zwischen Schlupf und Widerstand eines Reifens besteht ein eindeutiger Zusammenhang. Solange die Lauffläche nicht über die Fahrbahn gleitet, ist dieser Zusammenhang zwischen Widerstand bzw. dem Widerstandskoeffizienten μ und dem Schlupfwinkel und Schlupfverhältnis linear. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 9 dargestellt. Die lineare Beziehung gilt dabei für kleine Schlupfwinkel von α kleiner 2-3 Grad. Bei größeren Winkeln beginnt der Reifen über die Fahrbahn zu gleiten. Ist dies vollständig der Fall, so ist der Widerstandskoeffizient nahezu unabhängig vom Schlupfwinkel. [18]

Auch die Radlast hat einen nahezu linearen Einfluss auf den Rollwiderstand des Reifens. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 10 dargestellt. Da der Schlupf aus einer Deformation des Reifens resultiert, erscheint dies logisch, denn mit zunehmender Last wird auch die Verformung der Lauffläche größer. [15]

Das Verhältnis von Rollwiderstand zu Radlast wird durch den Rollwiderstandsbeiwert k_R beschrieben. Für niedrige Geschwindigkeiten ist er als nahezu konstant anzunehmen. Im Allgemeinen gilt dies für Geschwindigkeiten unter 80 km/h, bei denen er mit $k_R \approx k_{R0} \approx 0,01$ angenommen werden kann. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt der Einfluss der Geschwindigkeit zu. Hierbei kann der Widerstandsbeiwert durch ein Polynom 4. Grades angenommen werden:

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

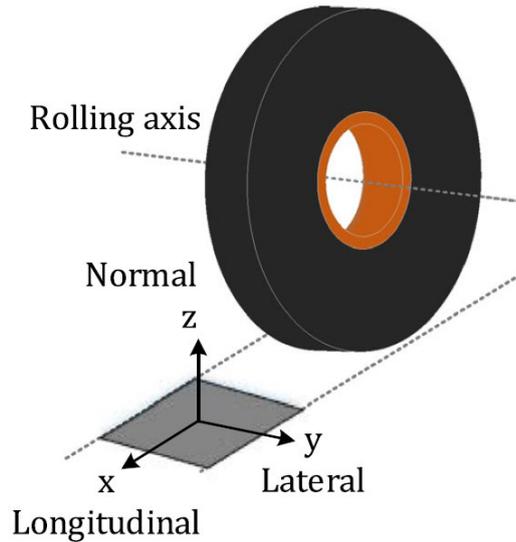


Abbildung 8: Skizze zum rollenden Reifen [18]

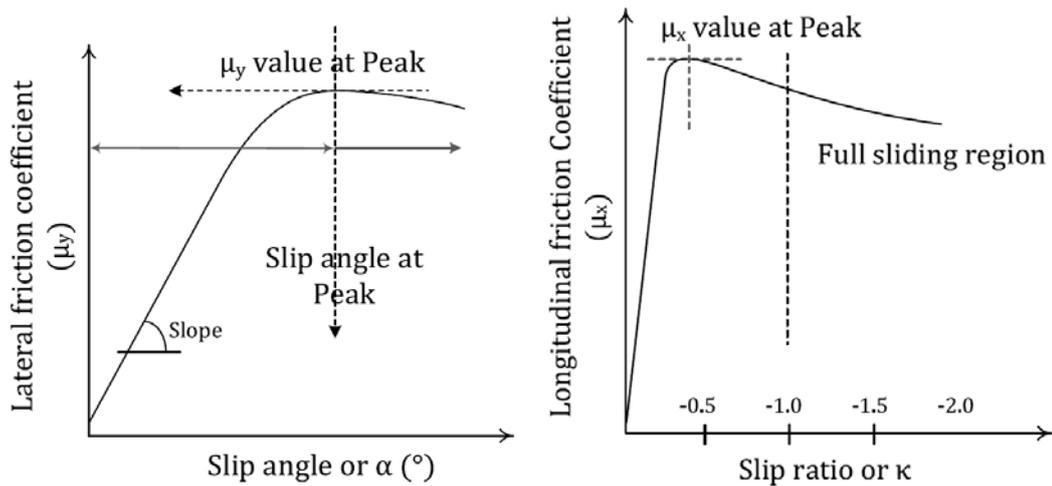


Abbildung 9: Beziehung zwischen Widerstandskoeffizient und Querschlupf (links) und Längsschlupf (rechts) [18]

[15]

$$k_R = k_{R0} + k_{R1} * \left(\frac{v_w}{100 \text{ km/h}} \right) + k_{R4} \left(\frac{v_w}{100 \text{ km/h}} \right)^4 \quad (2)$$

Wie groß der Einfluss verschiedener Rollphasen auf die Abnutzung von Flugzeugreifen ist, unterscheidet sich stark nach Einsatz der Maschine sowie den angeflogenen Flughäfen. Eine Übersicht über die durchschnittliche Abnutzung in den verschiedenen Phasen bietet hier Abbildung 11. Auffällig ist hierbei der relativ große Anteil von Lande- und Ausrollphase mit 42%. Weitere insgesamt 27% sind auf Bremsvorgänge im Taxi-Betrieb zurückzuführen, wovon 12% auf vollständige Bremsungen und 15% auf teilweise Bremsungen fallen. Der Touchdown hat im absoluten Vergleich einen relativ geringen Anteil von nur 5%. Auch wenn hier hohe Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Reifen und Fahrbahn herrschen und sich durch Gieren des Fliegers ein großer Schlupfwinkel ergibt, so ist der Gesamteinfluss dennoch unterzuord-

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

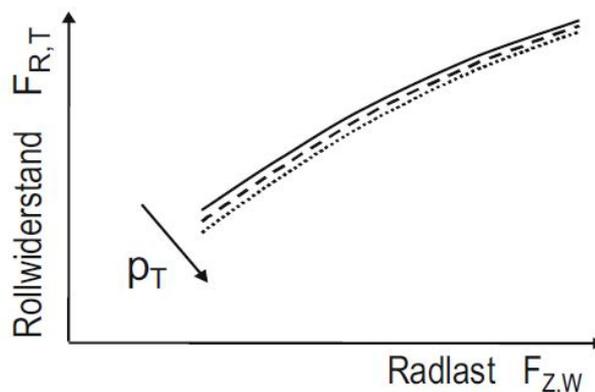


Abbildung 10: Rollwiderstand von Radialreifen als Funktion von der Radlast $F_{Z,W}$ und dem Innendruck p_T [15]

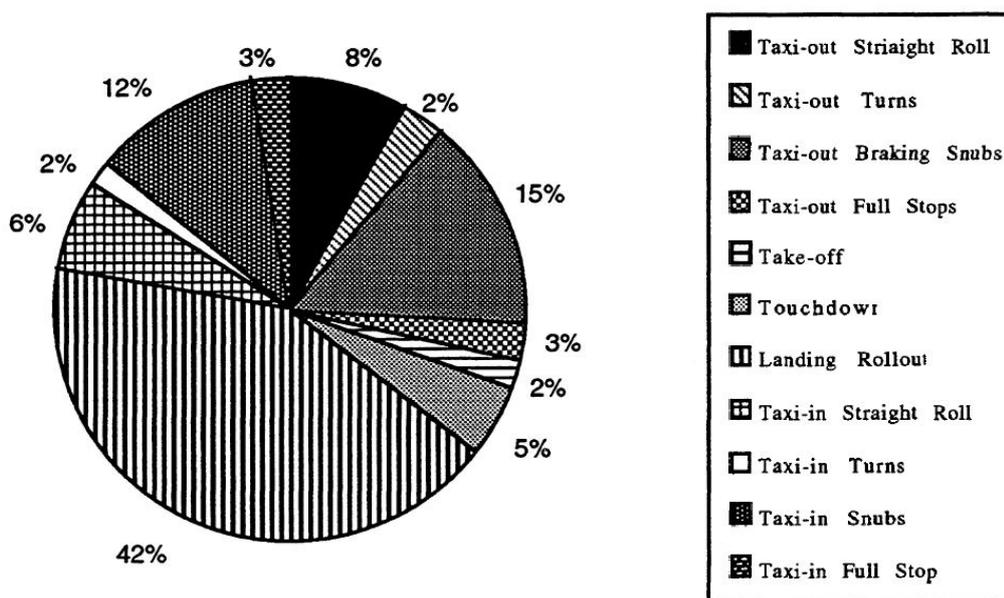


Abbildung 11: Einsatzbedingte Abnutzung von Flugzeugreifen [13]

nen [13][10]. Vereinfacht lässt sich jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Landungen und dem Abrieb der Reifen feststellen (Abbildung 12). Laut Megan K. Lay und William W. Macy liegt der absolute Abrieb des Reifenprofils im Durchschnitt bei 0,02212 inch bzw. 0,562 mm pro Flug. [13]

Ungleichmäßiger Reifenabrieb

Ist der Abrieb an einem Reifen nicht gleichmäßig, ist dies in der Regel auf eine nicht fachgemäße Nutzung zurückzuführen. Eine Ursache kann ein falsch eingestellter Reifendruck sein. Aus diesem Grund muss der Reifendruck vor dem ersten Flug jedes Tages geprüft werden. Die Prüfung geschieht dabei im unbeladenen Zustand, wobei der Reifendruck eines montierten Reifens etwa 4 % höher ausfällt.[16] Zu niedriger Reifendruck hat generell einen größeren Abrieb, wie in Abschnitt 3.3.1 bereits erläutert, sowie im Speziellen eine höhere Abnutzung der äußeren Laufflächen zur Folge (siehe Abbildung 13). Darüber hinaus wird der Schulterbereich

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

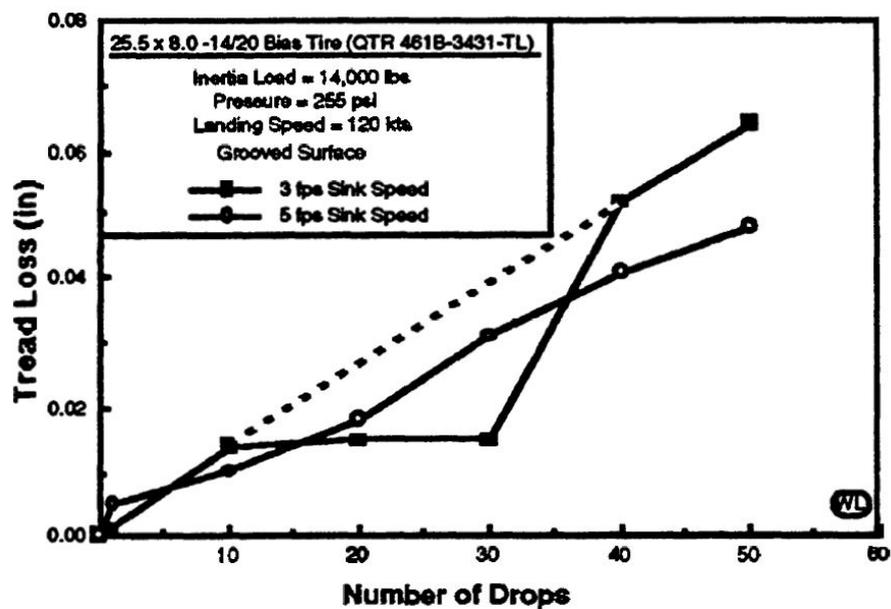


Abbildung 12: Einfluss der Landung auf den Reifenabrieb [13]

stärker belastet und es kommt vermehrt zu Versprödungen, die Brüche und Risse zur Folge haben können. Wird bei der Prüfung eine Unterschreitung von 95% des angegebenen Sollwertes festgestellt, muss der Reifen auf mögliche Ursachen für einen Druckverlust untersucht werden. [16] Ein Druck zwischen 95% und 99 % des Nennwertes liegt im Bereich des gewöhnlichen



Abbildung 13: ungleichmäßig abgenutzter Reifen [16]

täglichen Druckverlustes. In dem Fall wird dieser ohne weitere Überprüfung auf den maximalen Arbeitsdruck von 105 % des Nennwertes aufgefüllt. [16]

Ein zu starker Reifendruck hat, wie in Abbildung 10 dargestellt, einen positiven Effekt auf den Widerstandsbeiwert des Reifens und damit nach [15] auch einen geringeren Gesamtabrieb. Durch eine nach außen gewölbte Lauffläche steht dem allerdings ein stärkerer Verschleiß der inneren Lauffläche gegenüber, welche die Lebenswartung eines Reifens verkürzt. Auch die Wahrscheinlichkeit für Schnitte sowie Schäden durch Fremdkörper, allgemein bekannt als FOD (foreign object damage) (siehe Abschnitt 3.3.2), wird ebenfalls durch überhöhten Druck gesteigert. [16] Darüber hinaus hat er einen negativen Einfluss der Fahreigenschaften zur Folge, wie Schlingern und ein verminderter Halt in Kurvenfahrten. [15] Nach Michelin [16] wird ab einem

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

Reifendruck von mehr als 105 % des Nennwertes von überhöhtem Druck gesprochen. Wird ein überhöhter Druck festgestellt, wird dieser dokumentiert und auf einen Arbeitsdruck von 100 % - 105 % des Nennwertes gesenkt.

Neben dem absoluten Druck jedes einzelnen Reifens, muss auch der Druckunterschied von Reifen auf dem selben Achsgestell geprüft werden, da Differenzen zu einer ungleichen Lastverteilung führen. [16] In Abbildung 14 ist die Lastverteilung zweier ungleich gefüllten Reifen eines Achssystems dargestellt. Während der eine Reifen mit dem Nenndruck gefüllt ist, weist

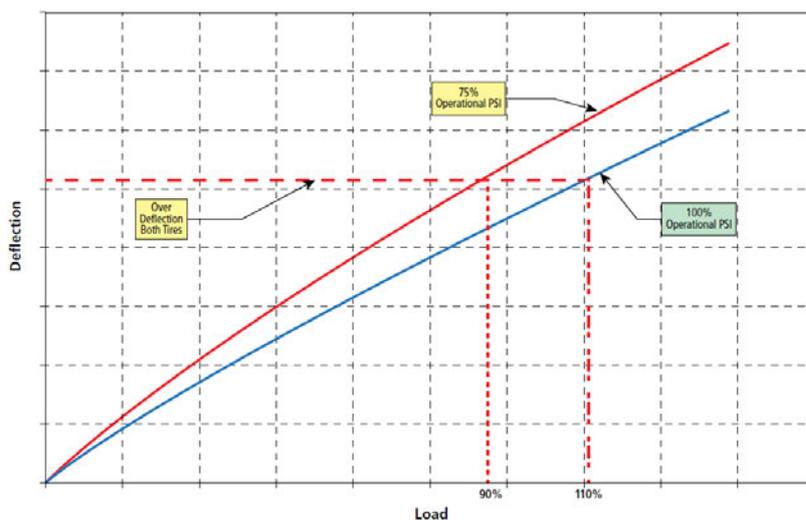


Abbildung 14: Einfluss ungleicher Reifendrücke auf die Reifenlast[16]

der Zweite nur 75% des Nenndruckes auf. Dabei ist zu erkennen, dass bei normaler Belastung der Reifen mit dem geringeren Druck nur 90 % der Normallast übernimmt, wohingegen der stärker befüllte Reifen mit 110 % belastet wird.

3.3.2. Schnitte und Beschädigungen durch Fremdkörper

Ein Reifen kann auch Beschädigungen durch die Einwirkung von Fremdkörpern erfahren, sogenannte FOD. Hierbei entstehen lokale Schnitte oder Fehlstellen durch das Überfahren oder den Einschlag von Fremdkörpern. Nach einem FOD kann ein Reifen weiter verwendet werden, wenn durch ihn die Verstärkungslage unter der Lauffläche nicht beschädigt wird. Darüber hinaus dürfen Schnitte, unabhängig von ihrer Tiefe, nicht über eine komplette Profilrille reichen. Kreisförmige Schäden mit einem Durchmesser von über 9,5 mm führen ebenfalls zum Wechseln des Reifens. [16]

3.3.3. Lokaler Abrieb

Lokaler Abrieb, sogenannte Flat Spots, wie er in Abbildung 15 dargestellt ist, entstehen durch Schleifen des Reifens über die Fahrbahn, ohne dass sich dieser mitdreht. Gründe hierfür können starke Bremsvorgänge sein. Insbesondere am Bugfahrwerk können auch enge Kurvenfahrten zu einem solchen Abrieb führen. Sofern die Schutzschicht des Reifens nicht erreicht wird, kann ein Reifen wieder aufbereitet und erneut verwendet werden. Andernfalls ist keine Reparatur des Reifens möglich.



Abbildung 15: Flat Spot mit Reifenbruch [16]

3.4. Daten, ihre Nutzung und wichtige physikalische Zusammenhänge

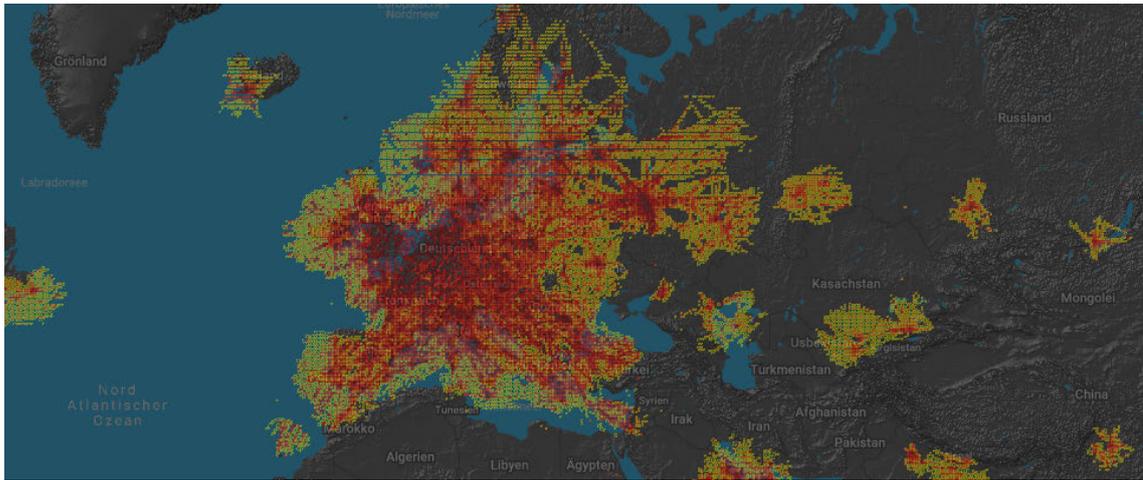
Die in der Arbeit verwendeten Daten und ihre Ursprünge werden in diesem Abschnitt beschrieben. Darüber hinaus folgen einige physikalische Zusammenhänge, die für spätere Berechnungen von Bedeutung sein können.

3.4.1. OpenSky Network

Das OpenSky Network (OSN) ist eine gemeinnützige Organisation, die mit Hilfe ihrer Gemeinschaft Luftfahrt Daten aufzeichnet und sammelt. Mit ihrem Netzwerk aus Empfängerstationen sammeln und speichern sie bereits seit 2003 Daten, die sie im Gegensatz zu vielen anderen Organisationen ungefiltert jedem zu akademischen und wissenschaftlichen Zwecken zur Verfügung stellen. Die über 3500 Sensoren mit einer weltweiten Abdeckung haben bereits über 25 Billionen Daten der Typen ADS-B, Mode S, TCAS und FLARM gesammelt. Damit stellen sie das größte Luftfahrt-Überwachungssystem dieser Art dar mit dem Ziel, die internationale Luftfahrtforschung voranzutreiben.[2]

ADS-B steht für Automatic Dependent Surveillance - Broadcast . Weltweit besitzen etwa 70 % aller Verkehrsflugzeuge einen Sender für für ADS-Daten [13]. In Abbildung 17 ist die Funktionsweise der Übertragung schematisch dargestellt. Das Flugzeug bestimmt seine Position mittels GPS sowie weitere Daten über bordinterne Systeme. Diese Daten werden auf 1090 MHz oder 979 MHz weiter an ein Netz aus Empfangsstationen gesendet. Dabei können die gesendeten Daten von Bodenstationen mit einer Entfernung von bis zu 480 km empfangen werden. Die maximale Reichweite der zu übermittelnden Daten hängt jedoch neben lokalen Bedingungen zum

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe



<https://opensky-network.org/network/facts>

Abbildung 16: Beispiel OSN - Abdeckung am 02.07.2019 [2]

großen Teil von der aktuellen Flughöhe ab. Da bei niedrig fliegenden Flugzeugen die Signale leicht von Gebäuden gestört werden können, ist bei diesen die Sendereichweite wesentlich geringer als bei höher fliegenden. [7]

Die übermittelten Daten beinhalten folgende Informationen: [2]

- Zeit (Unixzeit)
- Flugzeugidentifikation (icao24)
- Position (Dezimalkoordinaten)
- Geschwindigkeit (m/s)
- Kurs (Grad)
- Steiggeschwindigkeit (m/s)
- Callsign
- Flugzeug am Boden (Wahr oder Falsch)
- alert/spi
- squawk (Identifikationscode)
- Höhe (barometrisch, m)
- Höhe (GPS, m)
- Letzter Kontakt (Zeit letzter empfangener Daten)
- Datenzeit (Zeit der Datenerhebung)
- Weitere Spalten: mintime, maxtime, und msgcount

Der Spalte des letzten Kontakts (lastcontact) kommt eine besondere Bedeutung zu. Solange sich das Flugzeug in einem gut abgedeckten Bereich befindet, sollten die gespeicherten Daten in der Regel nicht älter als 1-2 Sekunden sein. Sollte jedoch kein Kontakt zu einer Bodenstation bestehen oder einzelne Daten nicht verfügbar sein, wird das letzte empfangene Signal wiederholt, bis neue Daten verfügbar sind. Die maximale Zeit für die Wiederholung von Daten liegt bei

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

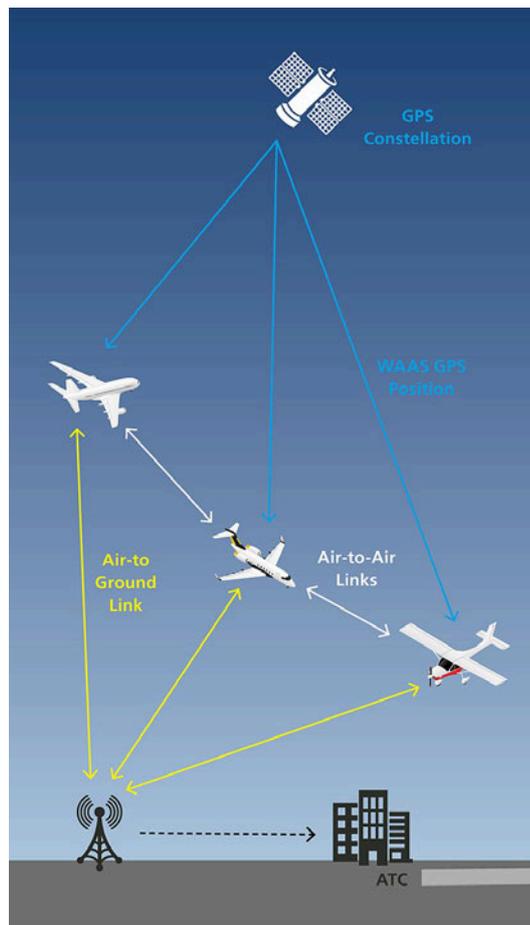


Abbildung 17: Funktionsweise von ADS-B [3]

15 Sekunden. Sollte eine Datenspalte oder die gesamten Daten für längere Zeit nicht verfügbar sein, werden für diesen Zeitpunkt keine Daten gespeichert. Wenn für einen Zeitraum von über 300 Sekunden keine Daten von einem Flieger empfangen werden, so wird die Aufzeichnung gestoppt. [2]

3.4.2. D-ATRA

D-ATRA ist ein Flugzeug des DLR vom Typ A320-232, das zu Forschungszwecken mit weiteren Sensoren ausgerüstet wurde, die über den normalen Bestand eines A320 weit hinaus gehen. ATRA steht dabei für Advanced Technology Research Aircraft. Ende 2008 wurde er vom DLR übernommen. Seitdem werden u.a. Forschungen zur Erprobung aeroelastischer Messverfahren, Triebwerksmessungen, Erprobung alternativer Treibstoffe oder Untersuchungen zur Wirbelschleppenforschung durchgeführt. [11]

Welche Daten erhoben werden, hängt unter anderem von dem aktuellen Forschungsziel ab, für die Sensoren und Messeinrichtungen an Bord verbaut sind. Ein Datenteil besteht jedoch meist aus Beschleunigungsdaten des Fliegers in der Luft sowie am Boden. [11]

3.4.3. Bezeichnungen der Luftfahrt

Im Rahmen dieser Arbeit werden die in der Luftfahrt üblichen Bezeichnungen, wie in Abbildung 18 dargestellt, verwendet. Dabei sind die Bezeichnungen wie folgt definiert: [8]

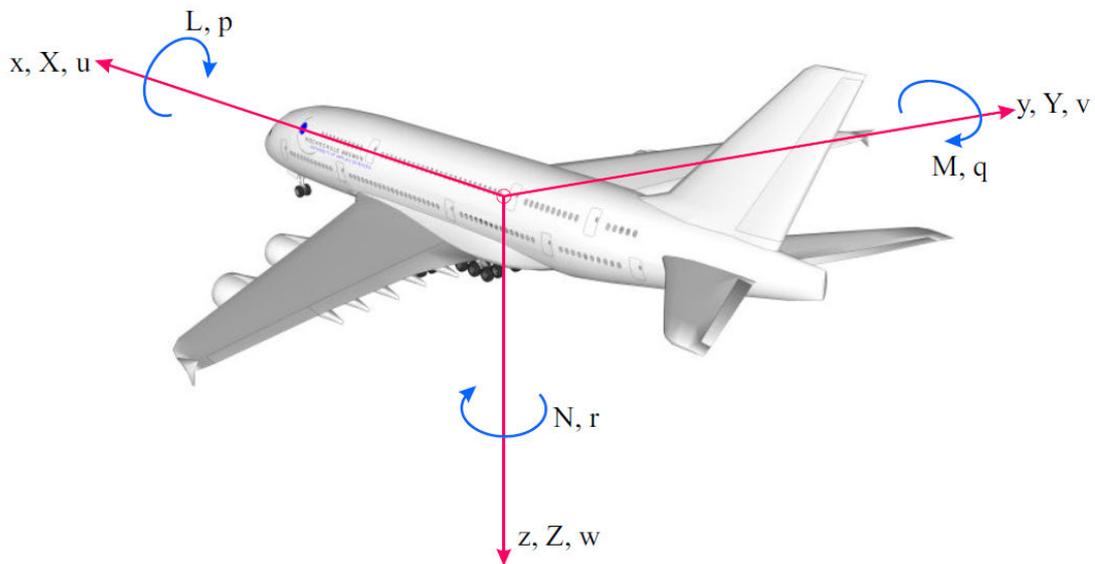


Abbildung 18: Bezeichnungen der Luftfahrt [8]

Positionsvektor:	$s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$
Kraftvektor:	$R = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$
Momentenvektor:	$Q = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix}$
Geschwindigkeitsvektor:	$V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$
Drehgeschwindigkeitsvektor:	$\Omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$
Lagewinkelvektor:	$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi \\ \Theta \\ \Psi \end{bmatrix}$

Wenn nicht anders definiert, werden diese Bezeichnungen verwendet.

3.4.4. Breguet'sche Reichweitenformel

Häufig stellt sich die Frage nach der Reichweite eines Flugzeuges. Um diese zu bestimmen, wird oft auf die Breguet'sche Reichweitenformel zurückgegriffen. Diese nach Louis Charles

3. Wichtige Grundlagen und Hintergründe

Breguet benannte Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Reichweite eines Flugzeuges R_W sowie der Masse m , dem spezifischen Treibstoffverbrauch B_S und der Flugeschwindigkeit c_0 . [9]

$$R_w = c_0 * t = \frac{c_0}{g * \epsilon * B_S} * \ln \left[\frac{m_{MTOW}}{m_{MTOW} - m_B} \right] \quad (3)$$

Der Index MTOW steht dabei für maximum take-off weight, also das maximale Startgewicht . m_B beschreibt die Masse des verbrauchten Brennstoffes , ϵ steht für die Gleitzahl und g für die Erdbeschleunigung mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Die Gleitzahl ist bei einem Flugzeug leicht variabel und hängt u.a. von der Masse des Fliegers ab. Für einen A320 kann diese jedoch als konstant mit etwa $\epsilon = 16$ angenommen werden [20]. Auch der spezifische Treibstoffverbrauch kann in dieser Vereinfachung als konstant angesehen werden und für den betrachteten Flieger mit $B_S = 0,03542 \text{ kg/Nh}$ gesetzt werden [14]. [9]

4. Umsetzung

In diesem Abschnitt wird der Aufbau und die Umsetzung verschiedener Modelle beschrieben, die Rückschlüsse auf den Zustand eines Flugzeugreifens geben. Dabei wird zwischen zwei Fällen unterschieden:

1. Abnutzungsbasierter Verschleiß eines Flugzeugreifens
2. Außerordentliche Abnutzung eines Flugzeugreifens

Beide Modelle sind zunächst getrennt voneinander zu betrachten. Zusammen sollen sie durch frei verfügbare Daten ein umfassendes Bild über den aktuellen Zustand geben.

4.1. Abnutzungsbasierter Verschleiß eines Flugzeugreifens

Im ersten Modellteil wird auf den normalen abnutzungsbasierter Verschleiß eines Flugzeugreifens eingegangen. Hierfür geben frei zugängliche Daten des OpenSky Network (siehe Abschnitt 3.4.1) die Grundlage zu den folgenden Berechnungen.

4.1.1. Wirkende Kräfte am Fahrwerk eines Airbus A320

Für die Untersuchung werden die wirkenden Kräfte eines Airbus A320 im Bodenbetrieb betrachtet. In den Abbildungen 19 und 20 sind die für diese Arbeit relevanten am Flugzeug wirkenden Kräfte mit ihrer Wirkrichtung eingezeichnet.

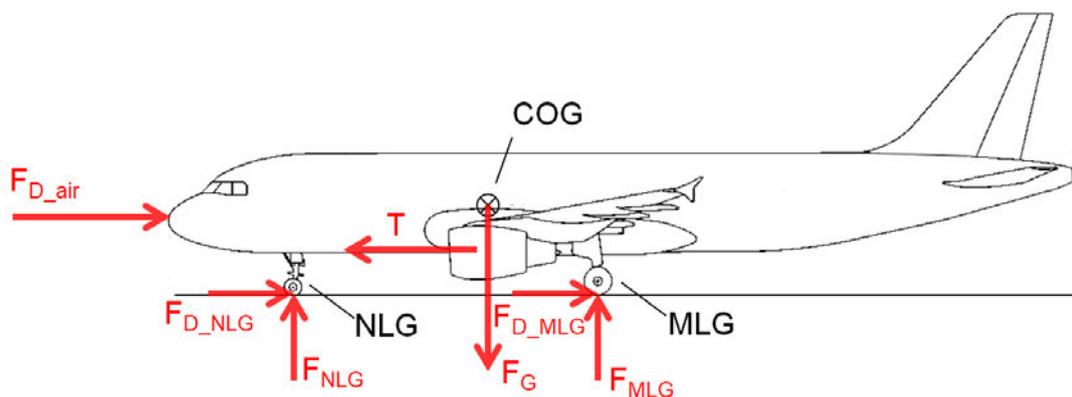


Abbildung 19: Kräfte diagramm Airbus A320 - Seitenansicht; nach [19]

Die Gewichtskraft G des Flugzeuges greift im Schwerpunkt (COG) an. Die Schubkraft T ist von den Triebwerken aus in positive x -Richtung gerichtet. Alle Kräfte F an den Fahrwerken sind in negative x - bzw. z -Richtung gerichtet und mit dem entsprechenden Index des Fahrwerks versehen. Dabei steht der zusätzliche Index LH für das in Fahrtrichtung linke Fahrwerk, RH für das in Fahrtrichtung rechte. Kräfte, die in negativer y -Richtung auf das Fahrwerk wirken, sind mit dem zusätzlichen Index y gekennzeichnet.

4. Umsetzung

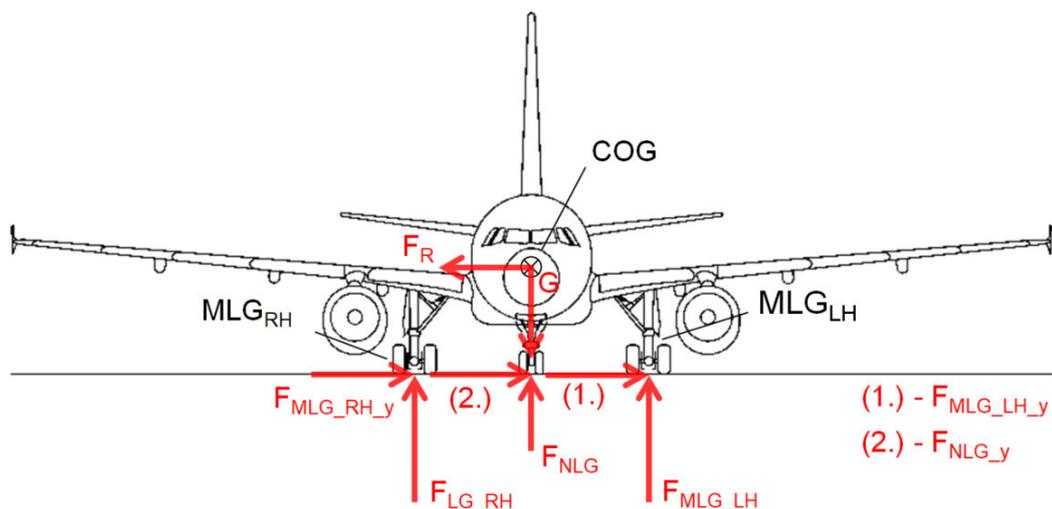


Abbildung 20: Kräfte diagramm Airbus A320 - Frontansicht; nach [19]

4.1.2. Analyse der verschleißbedingten Reifenabnutzung

In Abschnitt 3.3.1 wurde bereits beschrieben, dass verschiedene Bodenphasen einen unterschiedlichen Einfluss auf den Abrieb eines Reifens haben. Diese unterschiedlichen Anteile sind in Tabelle 1 aufgelistet. Um nun von den ADS-B Bodendaten Rückschlüsse auf den Reifenverschleiß zu ziehen, können diese Anteile entsprechend den gemessenen Daten zugeordnet werden. Zunächst muss hierfür eine Basis geschaffen werden, wie groß der Anteil jeder einzelnen Phase durchschnittlich am gesamten Bodenbetrieb aller Flughäfen ist. Mithilfe der Daten aus dem OSN lässt sich für einzelne Flüge der Bodenbetrieb bewerten. Vergleicht man nun die Daten eines einzelnen Fluges mit der zuvor ermittelten Basis, zeichnet sich ab, ob die Abnutzung der Reifen für den Flug über oder unter dem Durchschnitt liegt.

Bodenphase	Prozentualer Anteil am Reifenabrieb
Taxi geradeaus	14%
Taxi in Kurven	4%
Taxi mit Bremsunterstützung	33%
Touchdown	5%
Ausrollen bei Landung	42%
Takeoff	2%

Tabelle 1: Anteil der verschiedenen Bodenphasen am Reifenabrieb; nach [13]

Um einen Basiswert zu erhalten, sind gute Bodendaten von vielen verschiedenen Flügen und Flughäfen notwendig. Mit 1900 Flügen sind die für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Daten jedoch zu wenig, um ein aussagekräftiges Bild zu erhalten. Stattdessen wird ein anderer Ansatz gewählt, bei dem der Rollwiderstand über die Fahrwerkslasten und die Geschwindigkeit des Flugzeuges bestimmt wird. Aus Abschnitt 3.3.1 ist bekannt, dass der Abrieb eines Reifens proportional zum Rollwiderstandsbeiwert k_R und zu den Fahrwerkslasten ist.

Auf die Bestimmung der Fahrwerkslasten wird in Abschnitt 4.1.3 genauer eingegangen. Der Rollwiderstandsbeiwert kann mit Gleichung 2 angenähert werden. Wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, ist er für geringe Geschwindigkeiten < 80 km/h nahezu konstant, während er für

4. Umsetzung

höhere Geschwindigkeiten stark ansteigt.

$$k_R = k_{R0} + k_{R1} * \left(\frac{v_w}{100 \text{ km/h}} \right) + k_{R4} \left(\frac{v_w}{100 \text{ km/h}} \right)^4$$

Speziell für Flugzeugreifen ermittelte Beiwerte konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Daher wird der Nullwiderstandsbeiwert entsprechend den Radialreifen der von Autos $k_{R0} = 0,01$ angenommen, was auch in etwa dem Beiwert für geringe Geschwindigkeiten entspricht. Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass das Ausrollen beim Landevorgang einen Anteil von 42 % am Abrieb hat. Betrachtet man hingegen die zurückgelegte Distanz bei beim Ausrollen, beträgt diese i.d.R. weniger als 1/4 der gesamten Rollstrecke, die für Start und Landung insgesamt zurückgelegt werden. Daher werden die Parameter k_{R1} und k_{R4} so gewählt, dass der gesamte Rollwiderstand bei einer mittleren Auslaufgeschwindigkeit von ca. 45 m/s dem doppelten von k_{R0} entspricht. Somit ergeben sich folgende gewählte Werte für die Parameter:

- $k_{R1} = 0,0007$
- $k_{R4} = 0,0015$

Mit den gewählten Werten ergibt sich für k_R der in Abbildung 21 Verlauf des Rollwiderstandsbeiwertes in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

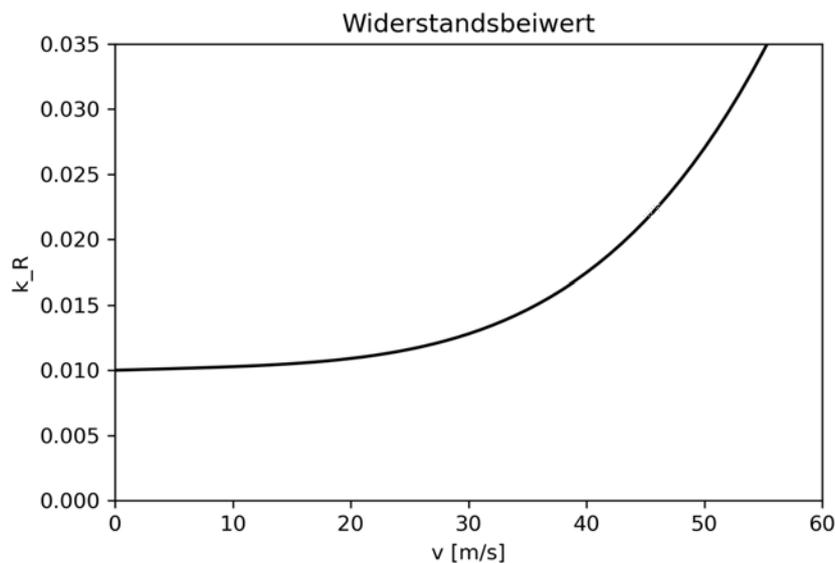


Abbildung 21: Der Rollwiderstandsbeiwert k_R in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v

4.1.3. Bestimmung von Fahrwerkslasten im Taxi-Betrieb

Die Fahrwerkslasten setzen sich aus den statischen Gewichtslasten und den dynamischen Lasten durch die Beschleunigung zusammen. Mit den in Abbildung 19 und 20 angenommenen Kräften ergeben sich daraus für die drei Fahrwerke folgende statische Lasten:

$$F_{MLG-base-RH} = \frac{x_{CG} - x_{NLG}}{x_{MLG-RH} - x_{NLG}} * m_{AC} * g$$

4. Umsetzung

$$F_{MLG-base-LH} = \frac{x_{CG} - x_{NLG}}{x_{MLG-LH} - x_{NLG}} * m_{AC} * g$$

$$F_{NLG-base} = m_{AC} * g - F_{MLG-base-RH} - F_{MLG-base-LH}$$

Dabei ist x der jeweilige Abstand zur Nase des Flugzeuges. Die Werte sind den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen. Die Masse des Flugzeuges wird mit $m_{AC} = 73.500 \text{ kg}$ angenommen, die Erdbeschleunigung g mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Um die dynamischen Kräfte zu berechnen, werden die durch den Fahrbetrieb entstehenden Beschleunigungen benötigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich das Flugzeug auf einer horizontalen Ebene bewegt und somit keine Beschleunigung in z-Richtung auftreten. Darüber hinaus wird der Einfluss der Beschleunigungen in x-Richtung auf die Fahrwerkslasten als vernachlässigbar angenommen. Diese sind zudem aufgrund der Datenlage nur schwer exakt zu ermitteln. Kleine Schwankungen bei der aufgenommenen Geschwindigkeit sind nicht zu vermeiden. Würde nun das zeitliche Differential berechnet werden, hätten diese Abweichungen einen sehr großen Einfluss auf das ermittelte Ergebnis.

Somit bleibt die Radialbeschleunigung a_{rad} als Grundlage für die dynamischen Lasten:

$$a_{rad} = \frac{v * dh * \pi}{180 * dt} \quad (4)$$

dh steht hier für die Änderung des Kurses in Bogenmaß, dt für die Zeitdifferenz und v für die Geschwindigkeit. Hieraus können nun die dynamischen Lasten bestimmt werden:

$$F_{MLG-RH} = F_{MLG-base-RH} + m_{AC} * a_{rad} * \frac{z_{CG}}{y_{MLG-RH}}$$

$$F_{MLG-LH} = F_{MLG-base-LH} - m_{AC} * a_{rad} * \frac{z_{CG}}{y_{MLG-LH}}$$

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen ist $F_{NLG} = F_{NLG-base}$.

Um zu prüfen, inwieweit die berechneten Beschleunigungslasten der Wirklichkeit entsprechen, werden diese mit gemessenen Daten an Bord des DLR-Flugzeugs D-ATRA (siehe Abschnitt 3.4.2) verglichen. In Abbildung 22 sind die gemessenen Beschleunigungslasten „load_side“ in blau und die berechneten Lasten „side_calc“ in rot für vier beispielhafte Flüge dargestellt. Bei allen Daten handelt es sich um den Taxi Betrieb vor dem Start. Es ist zu erkennen, dass die Ausschläge der berechneten Beschleunigungen in rot zeitlich den Gemessenen entsprechen. In allen Datenreihen sind die berechneten Lasten jedoch größer als die tatsächlichen. Aus diesem Grund wird ein Lastfaktor LF eingeführt.

Der Lastfaktor sollte so gewählt werden, dass die Differenz zwischen den berechneten und gemessenen Lastdaten möglichst gering ausfällt. Hierfür wird das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate gewählt. Für die Analyse stehen die Daten von 32 Flügen des D-ATRA zur Verfügung.

4. Umsetzung

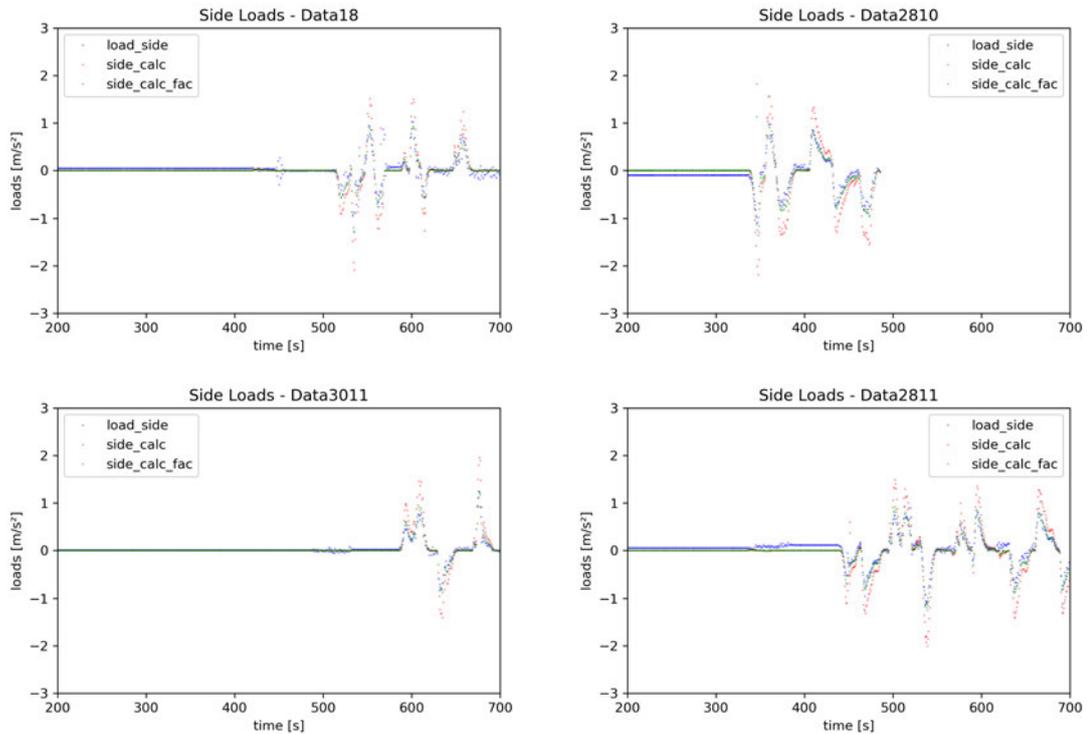


Abbildung 22: Gemessene und berechnete Seitenbeschleunigungen an Bord des D-ATRA während der Bodenphasen

Bei allen Flügen werden die Beschleunigungen nach Gleichung 4 berechnet und mit einem Lastfaktor LF multipliziert. Mit den faktorisierten Lasten wird die Summe der Fehlerquadrate Q wie folgt berechnet:

$$Q_i = \sum (a_{real} - a_{calc} * LF_i)^2$$

Da bekannt ist, dass die berechneten Lasten über den gemessenen liegen, wird mit einem Lastfaktor von $LF_0 = 0,99$ gestartet. Dieser wird so lange verringert, bis Q ein Minimum erreicht. Bei einem Lastfaktor von $LF = 0,62$ ergibt sich ein minimales Fehlerquadrat, sodass der Faktor für folgende Lastberechnungen auf diesen Wert festgelegt wird.

In den Graphen in Abbildung 22 sind die faktorisierten Daten „side_calc_fac“ in grün dargestellt. Sie haben nun eine große Übereinstimmung mit den gemessenen Daten. In den dargestellten Datenreihen 2810 und 2811 fällt allerdings auf, dass ein geringer Offset auftritt. Da dieser bei verschiedenen Datenreihen sowohl positiv als auch negativ ausfallen kann, wird davon ausgegangen, dass diese mit einer leichten Seitenlage der Flugzeuges während der Messungen zusammenhängt.

4.1.4. Bewertung von Flughäfen

Um die Taxiwege eines Flugzeuges per OpenSky Network nachzuverfolgen, ist ein Flughafen mit ausreichender Abdeckung der Empfangsmasten notwendig. Gerade in Bodennähe werden oft nur wenig oder fehlerhafte Daten übermittelt, die nicht für eine Auswertung verwendet werden können. Der in dieser Arbeit genutzte Datensatz umfasst die gespeicherten OSN Daten

4. Umsetzung

Daten von etwa 1900 Flügen aus dem Frühjahr 2019. Aus den 55 verschiedenen angeflogenen Flughäfen gilt es nun, einen geeigneten für die Untersuchung auszuwählen.

Um ein gutes Modell zu entwickeln, kommt es sowohl auf die Qualität als auch auf die Quantität der Daten an. Zunächst wird jeder Datensatz eines Fluges in drei Teile unterteilt, den Abflughafen, den eigentlichen Flug und den Zielflughafen. Die Flugphase wird nicht mehr benötigt und kann aus den Daten ausgefiltert werden. Generell wird in den ADS-B Daten überliefert, ob sich ein Flugzeug am Boden befindet. In den zur Verfügung stehenden Daten ist diese Kennzeichnung allerdings teilweise fehlerhaft. Aus diesem Grund wird ein weiterer Filter über die Aktuelle Geschwindigkeit gesetzt.

Die maximale Start- und Landegeschwindigkeit für den Airbus A320 ist mit 150 Knoten bzw. 136 Knoten angegeben, was etwa 70 bis 77 m/s entspricht (siehe Abschnitt 3.1). Um sicher nur die Bodenwege zu berücksichtigen, wird für die Simulation ein Grenzwert von 50 m/s festgelegt. Jeder Datenpunkt, der nach diesem Grenzwert noch als „on ground“ gelistet ist, wird einem Flughafen zugeordnet. Um eine Übersicht über die Verteilung der zur Verfügung stehenden Bodendaten auf die verschiedenen Flughäfen zu bekommen, werden alle gemessenen Bodenzeiten eines Flughafens zu einer „totalen Bodenzeit“ summiert und in eine Tabelle eingetragen. Tabelle 2 zeigt die Auswahl einiger Flughäfen, für die viele Daten zur Verfügung stehen. Für die komplette Liste mit allen Flughäfen, schauen Sie im Anhang A.

Nr.	ICAO	Flüge	tot. Bodenzeit [s]	Ø Bodenzeit [s]	Flughafen
1	EDDF	1891	564808	299	Frankfurt
2	LSZH	31	8111	262	Zuerich
3	EETN	26	6544	252	Tallinn
4	EHAM	62	7923	128	Amsterdam
5	EDDM	62	7134	115	Muenchen
6	LFNR	8	704	88	Berre La Fare Airport
7	LIML	20	1253	63	Mailand
8	LFPG	56	3959	71	Paris CDG
9	LIPE	4	325	81	Bologna
10	LOWW	47	2525	54	Wien

Tabelle 2: Auswahl einiger Flughäfen mit guter OSN Bodenabdeckung

Über die totale Bodenzeit kann nun die Quantität der Daten verglichen werden. Um einen Anhaltspunkt für die Qualität der Daten zu bekommen, wird darüber hinaus die durchschnittliche Bodenzeit bestimmt. Auch wenn Flughäfen verschieden groß sind, unterschiedlich lange Taxi Wege haben und sich somit auch ihre Bodenzeit unterscheidet, ist der häufige Grund für eine kurze durchschnittliche Bodenzeit, dass keine Daten übermittelt wurden. In Tabelle 2 ist zu sehen, dass die Flughäfen Tallinn, Zürich und Frankfurt mit durchschnittlich über 200 Sekunden übertragener Bodenzeit, die in etwa der Taxizeit entspricht, vermutlich über eine sehr gute ADS-B Abdeckung des Flughafens verfügen. Insbesondere der Flughafen Tallinn fällt hier ins Auge, da verglichen mit den anderen beiden für diesen kleinen Flughafen eher kurze Taxiwege zu erwarten sind. Da allerdings die absolute Bodenzeit mit knapp 157 Stunden und fast 1900 aufgezeichneten Flügen am Flughafen Frankfurt bei weitem am größten ist, wird dieser für die weitere Analyse gewählt.

In Abbildung 23 sind alle für den Flughafen Frankfurt alle aufgenommenen Datenpunkte gra-

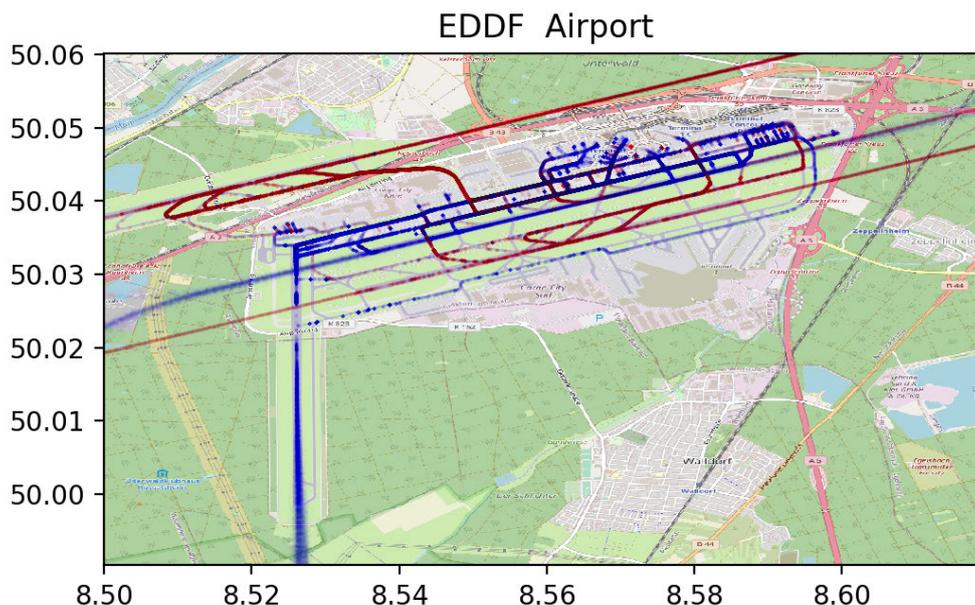


Abbildung 23: Abdeckung des OpenSky Network am Flughafen Frankfurt

phisch über einer Karte aufgetragen. Startende Flieger sind dabei in blau, landende Flieger in rot eingetragen. Hierbei ist deutlich zu erkennen, welche Strecken am Flughafen häufig befahren werden, aber auch in welchen Bereichen des Flughafens die ADS-B Abdeckung noch Lücken aufweist. So ist z.B. auf der westlich gelegenen Startbahn eine Lücke in den Datenpunkten zu erkennen, die nur durch eine schlechte Abdeckung zu erklären ist. Dennoch weist der Großteil des Flughafens eine gute Abdeckung auf.

4.2. Außerordentliche Abnutzung eines Flugzeugreifens

Neben der fortlaufenden Abnutzung durch Abrieb, können auch FODs (siehe Abschnitt 3.3.2) zum Verschleiß und Wechseln eines Reifens führen. Da diese Art von Schäden durch von außen zugeführte Gegenstände hervorgerufen werden, hat neben der Fahrweise der Flugzeuges auch die Beschaffenheit des Flughafens Einfluss auf das Auftreten der Fehlstellen. In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit ein gefundener FOD dem indizierenden Flughafen zugeordnet werden kann.

4.2.1. Erkennen von Schäden am Reifen

Vor jedem Flug wird eine Sichtkontrolle vom Flugzeug und somit auch vom Fahrwerk und den Reifen durchgeführt. Einmal täglich findet darüber hinaus eine Überprüfung des Reifendrucks statt. Umfangreichere Kontrollen finden in regelmäßigen Abständen statt. Um festzustellen, wo ein Fehler möglicherweise induziert wurde, sind möglichst kurze Abstände zwischen den Kontrollen von Vorteil. Daher wird sich bei der Überprüfung des Reifens in diesem Abschnitt ausschließlich auf die regelmäßige visuelle Prüfung vor Flugbeginn bezogen.

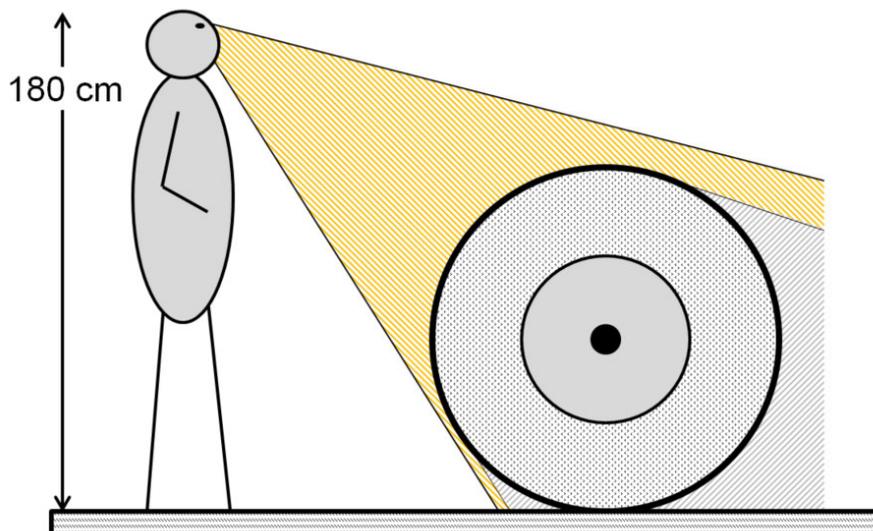


Abbildung 24: Visuelle Prüfung eines Flugzeugreifens

Ob ein FOD bei der Sichtprüfung gefunden wird, hängt stark von der Größe des Fehlers ab. Große Fehlstellen, die zu einem Ausschluss des Reifens führen (vergleiche Abschnitt 3.3.2), werden dabei mit einer höheren Wahrscheinlichkeit entdeckt, als kleinere Fehlstellen. Doch auch große Fehler werden nicht zu 100% bei der Sichtprüfung gefunden. Wie in Abbildung 24 dargestellt, liegen einige Bereiche des Reifens außerhalb des Sichtfeldes. Darüber hinaus kann sich auch ein schlechter Blickwinkel nachteilig auf das Entdecken eines FOD auswirken.

In der Literatur konnten keine konkreten Angaben dazu gefunden werden, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für das Finden eines vorhandenen FODs bei einer visuellen Kontrolle ist. Würde jeder Fehler bei einer Überprüfung der Reifen sicher gefunden werden, so könnte man die Induzierung dem vorangegangenen Flugblock und damit einem von zwei möglichen Flughäfen zuschreiben. Je geringer die Chance für das Auffinden eines Fehlers ist, desto mehr Flughäfen kommen als mögliche Ursprungsorte für den FOD in Frage.

Da die Rückverfolgung eines Fehlers bei hohen Wahrscheinlichkeiten einfacher ist, wird in dieser Analyse von dem schlechten Fall ausgegangen, dass bei einer visuellen Prüfung nur in 50% der Fälle ein vorhandener FOD gefunden wird. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein vorhandener Fehler in 50% der Fälle nach der ersten Prüfung unentdeckt bleibt. Mit jeder weiteren Sichtprüfung, die zwischen zwei Flügen stattfindet, verringert sich die Chance, dass der Fehler weiterhin unentdeckt bleibt, auf die Hälfte. Hieraus ergibt sich der in Abbildung 25 gezeigte Wahrscheinlichkeitsverlauf für das unentdeckte Vorhandensein eines FODs nach seinem Auftreten in Abhängigkeit von der Anzahl der seither stattgefundenen Flüge.

4.2.2. Modell zur Fehlernachverfolgung

Um zu prüfen, in wie weit sich Rückschlüsse ziehen lassen, an welchen Flughäfen vermehrt FODs induziert werden, wird ein Simulationsmodell verwendet. Bei diesem Modell werden zufällig künstliche Fehler erstellt. Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein vorhandener Fehler nicht gefunden wurde, mit jedem Flug und der dafür erfolgenden Kontrolle. Für die Simulation werden Flugdaten aus dem Frühjahr 2019 eines Airbus A320

4. Umsetzung

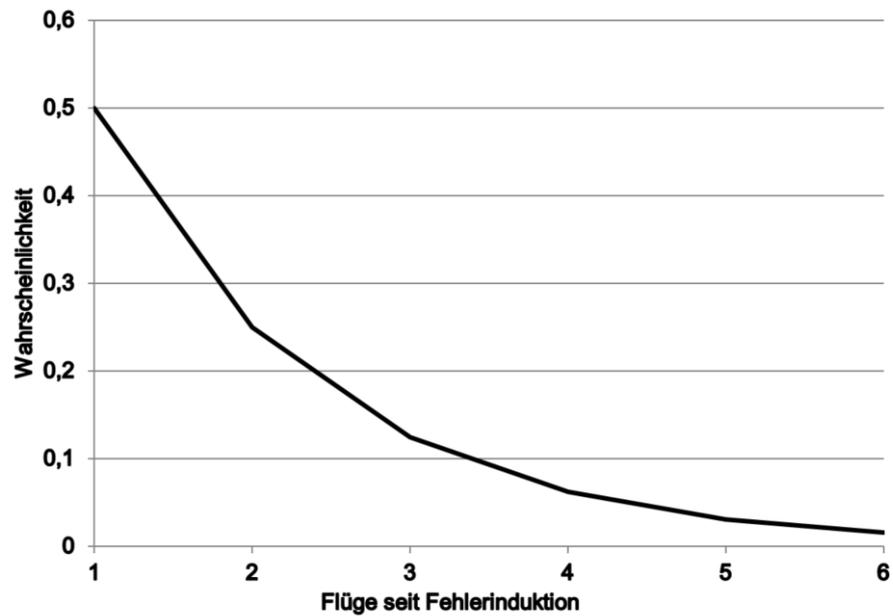


Abbildung 25: Wahrscheinlichkeit für das Nichtfinden eines induzierten FODs

verwendet. Der am Frankfurter Flughafen (ICAO-Code EDDF) stationierte Flieger hat in dem betrachteten Zeitraum knapp 1900 Flüge absolviert und 55 verschiedene Zielflughäfen angefliegen. Die Liste der Flughäfen mit der Anzahl der Flüge ist im Anhang A zu finden.

Im ersten Teil soll geprüft werden, ob ein einzelner Flughafen, an dem FODs auftreten, identifiziert werden kann. Hierfür gilt es aus der Liste der angeflogenen Flughäfen einen geeigneten auszuwählen. Der Flughafen sollte öfter angefliegen werden, sodass ein einzelner induzierter Fehler durch die Anzahl der Flüge relativiert wird. Da der Flieger in Frankfurt stationiert ist, ist Frankfurt in der Regel immer der Start- oder Zielflughafen. Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines FODs anhand einer visuellen Kontrolle nur für den vergangenen Flug, jedoch nicht für den speziellen Flughafen bestimmt werden. Jeder auftretende Fehler wird daher mit einer 50% Wahrscheinlichkeit in Frankfurt detektiert, weshalb dieser trotz der höchsten Anzahl der Flüge nicht gewählt wird.

flt_nr	departure	destination	spez. Fehlerinduktion	allg. Fehlerinduktion	Fehler vorhanden	Fehler Gefunden	Art des Fehlers	% letzter Flug
1047	EDDF	EKCH			0	0		0,00
1048	EKCH	EDDF			0	0		0,00
1049	EDDF	EDDT			0	0		0,01
1050	EDDF	EDDT			0	0		0,02
1051	EDDF	EDDT			0	0		0,03
1052	EDDT	EDDF			0	0		0,06
1053	EDDF	ESGG			0	0		0,13
1054	ESGG	EDDF			0	0		0,25
1055	EDDF	EDDM	1		1	1	FOD	0,50
1056	EDDF	EDDM			0	0		0,00
1057	EDDF	EDDM			0	0		0,00
1058	EDDM	EDDF			0	0		0,00

Tabelle 3: Simulationsmodell zur Fehlerinduktion bei Flugzeugreifen

4. Umsetzung

Für die Untersuchung wird der Flughafen München (Code EDDM) gewählt. Mit 62 Flügen ist er ein durchschnittlich, aber regelmäßig angeflogener Flughafen innerhalb der Datenreihe. Bei jedem Flug von oder zu diesem Flughafen wird ein simulierter FOD mit einer Wahrscheinlichkeit p_i induziert. Tritt ein Fehler auf, wird dies durch eine „1“ gekennzeichnet. Tritt kein Fehler auf, bleibt die Zelle leer. In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt des Simulationsmodells dargestellt. Bei Flug Nr. 1055 wird hier zufällig ein künstlicher Fehler induziert. Sobald ein Fehler auftritt, bleibt dieser so lange bestehen, bis dieser bei einer visuellen Kontrolle gefunden wird.

Wie in Abschnitt 4.2.1 bereits erwähnt, wird in dieser Simulation davon ausgegangen, dass ein vorhandener Fehler mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % bei einer Prüfung entdeckt wird. Ist in der Spalte „Fehler vorhanden“ in Tabelle 3 eine „1“, so wird in der Spalte „Fehler Gefunden“ geprüft, ob dieser entdeckt wird. Im positiven Fall wird dies wiederum durch eine „1“ gekennzeichnet. Für den Fall, dass kein Fehler entdeckt wird, steht dort eine „0“. Nachdem ein Fehler gefunden wurde, wird in der rechten Spalte „% letzter Flug“ berechnet, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass der gefundene Fehler auf der jeweiligen Etappe aufgetreten ist. Diese entwickelt sich dabei wie in Abbildung 25 dargestellt.

In einer zweiten Matrix, wie ein Ausschnitt in Tabelle 4 dargestellt ist, wird die Fehlerrückverfolgung ausgewertet. Dabei wird jedem angeflogenen Flughafen die Anzahl der zu oder von ihm stattgefundenen Flüge sowie die während des Flugblocks induzierten Fehler zugeordnet. Jeder induzierte FOD wird demnach zwei Flughäfen zugesprochen, wie in Tabelle 4 Frankfurt (EDDF) und München (EDDM). Nach dem gleichen Prinzip wird für jeden Flughafen die Anzahl der Flüge aufgelistet, bei welchem ein Fehler vorhanden war und wie oft ein Fehler gefunden wurde. Die Ergebnisse sind in den Spalten „Fehler vorhanden“ und „Fehler gefunden“ zu sehen.

Flughafen	Fehlerhäufigkeit	Anzahl Flüge	Wahrscheinlichkeit	Fehler vorhanden	Fehler gefunden	Höchste
EDDF	7	1891	0,36	21	14	
LSZH	0	31	0,60	0	0	
EETN	0	26	0,00	0	0	
EHAM	0	62	0,60	1	1	
EDDM	7	62	3,50	9	5	1
LFNR	0	8	0,24	0	0	
LIML	0	20	0,01	0	0	
LFPG	0	56	0,91	2	2	
LIPE	0	4	0,00	0	0	
LOWW	0	47	0,10	0	0	
EGPH	0	10	2,51	1	1	0,5
EBBR	0	25	0,03	0	0	
EKCH	0	75	0,00	0	0	
FPKK	0	9	0,00	0	0	

Tabelle 4: Bewertungsmatrix der Fehlerrückverfolgung von induzierten FODs

Aus den gesammelten Informationen wird nach Gleichung 5 die prozentuale Fehlerwahrscheinlichkeit W_{FL} für jeden Flughafen berechnet. p_{FL} ist dabei die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers während des letzten Fluges, wie sie in Tabelle 3 berechnet wurden. n_{FL} steht für die Anzahl der Flüge an einem Flughafen.

$$W_{FL} = \frac{\sum p_{FL}}{2 * n_{FL}} * 100 \quad (5)$$

4. Umsetzung

Da jeder induzierte Fehler zwei Flughäfen zugeordnet wird, steht im Nenner der Gleichung eine Zwei, um den entstandenen Effekt wieder auszugleichen.

Position	Bewertung
1	1
2	0,5
3	0,3
4 +	0

Tabelle 5: Erfolgsbewertung bei der Fehlerrückverfolgung

Weist der Flughafen, an dem die Fehler induziert werden, die höchste Wahrscheinlichkeit W_{FL} auf, so wird die Rückverfolgung als voller Erfolg gewertet. Doch auch, wenn sich der Flughafen an der Position mit der zweit-oder dritthöchsten Wahrscheinlichkeit befindet, ist dies als Teilerfolg zu bewerten. So bekommt jeder Flughafen eine Bewertung mit einer Punktzahl, entsprechend Tabelle 5. Für die Analyse müssen mehrere Simulationen durchlaufen werden, wobei nach jedem Durchlauf geschaut wird, ob sich der gewählte Flughafen unter den drei am besten bewerteten befindet. Zur Ermittlung der Erfolgchance E wird die Summe aller Bewertungen B für den gewählten Flughafen, hier München, gebildet und durch die Anzahl der Simulationen n_S geteilt.

$$E = \frac{\sum B}{n_S} \quad (6)$$

5. Auswertung und Ergebnisse

In diesem Abschnitt folgt die Präsentation der Ergebnisse sowie die Auswertung dieser. Dabei werden die beiden Teile zum abnutzungs-basierten Verschleiß und zur außerordentlichen Abnutzung durch FOD zunächst getrennt betrachtet. Eine gemeinsame Interpretation erfolgt im Fazit 6.

5.1. Modell zum abnutzungs-basierten Verschleiß

Trotz einer großen Menge an Daten, einer entsprechenden Vorbereitung der Daten sowie einer Analyse passender Flughäfen, konnte kein Flug gefunden werden, bei dem die Qualität der Daten für eine Simulation und Berechnung des Abriebes ausreicht. Aus diesem Grund wurden stattdessen Datensätze vom dem D-ATRA Flieger des DLR verwendet. Für die Berechnung wurde dabei ausschließlich auf die Daten zugegriffen, die auch im OpenSky Network zur Verfügung stehen. Da diese allerdings lokal im Flugzeug gesammelt werden, gehen keine Daten durch eine schlechte Funkübertragung zur Bodenstation verloren.

5.1.1. Ergebnisse des Verschleißmodells

Ziel des Verschleißmodelles ist es, anhand von ADS-B Daten, die über das Open Sky Net für jeden frei zugänglich sind, Rückschlüsse auf die Abnutzung der Flugzeugreifen zu ziehen. In Abbildung 26 ist der berechnete Reifenabrieb zum Start eines beispielhaften Fluges dargestellt. Dabei beschreiben die grünen Datenpunkte den Abrieb des Bugrades, die blauen Datenpunkte den Abrieb des Rades am rechten Hauptfahrwerk und die Roten den Abrieb am Linken. Die Einheit des Abriebes ist in mm/m Fahrtweg angegeben. Grundsätzlich liegt dabei der Abrieb im Bereich zwischen $5 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ und $15 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ pro gefahrenen Meter.

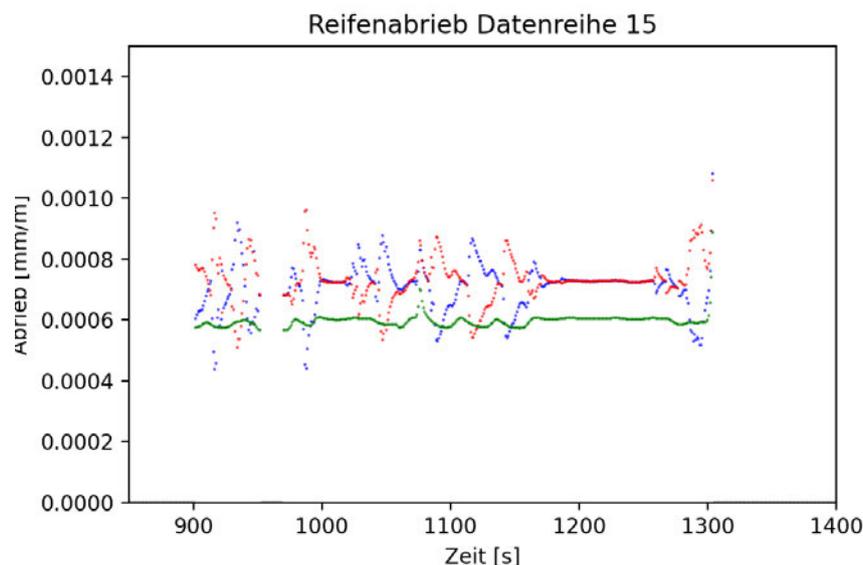


Abbildung 26: Berechneter Reifenabrieb von NLG (grün), MLG_{RH} (blau) & MLG_{LH} (rot) beim Startvorgang - Datenreihe 15

5. Auswertung und Ergebnisse

Um den betrachteten Zeitraum besser einordnen zu können, sind in Abbildung 27 für die gleichen Zeiten die Geschwindigkeit und das Heading des Flugzeuges dargestellt. An der Geschwindigkeit ist erkennen, dass sich das Flugzeug bis etwa Sekunde 900 im Stillstand befindet. Solange das Flugzeug nicht in Bewegung ist, werden auch keine Werte für den Abrieb ermittelt. Etwa bei Sekunde 1300 erfolgt ein starker Anstieg der Geschwindigkeit von etwa 15 m/s bis außerhalb der Skala. In Abschnitt 4.1.4 wurde definiert, dass im Rahmen dieser Arbeit ein Flugzeug ab einer Geschwindigkeit von >50 m/s als fliegend angenommen wird. Aus diesem Grund sind auch in Abbildung 26 ab diesem Zeitpunkt kein Reifenabrieb mehr aufgetragen.

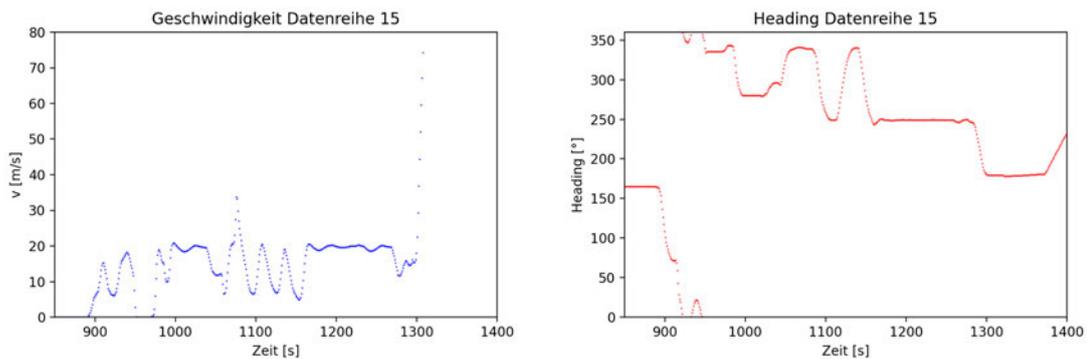


Abbildung 27: Geschwindigkeit und Heading beim Startvorgang - Datenreihe 15

Von Sekunde 900 bis etwa 1200 ist der aufgetragene Reifenabrieb in Abbildung 26 für die beiden Hauptfahrwerke stark schwankend. Dabei fällt auf, dass während der Abrieb für die rechten Reifen steigt, der für die linken Reifen sinkt und umgekehrt. Betrachtet man in Verbindung den dazugehörigen Graph vom Heading, lässt sich ein Zusammenhang zwischen Kurvenfahrten, die eine Änderung des Headings zu Folge haben, und den Schwankungen im Reifenabrieb erkennen.

Neben der Geschwindigkeit hat auch die Last auf das Fahrwerk einen direkten Einfluss auf den Abrieb am reifen. Fährt ein Flugzeug eine Kurve, wird das außen liegende Fahrwerk stärker belastet, während das innen liegende entlastet wird.

5.1.2. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Da auf Grund von unzureichender Qualität der Daten keine Berechnung des Abriebs auf Grundlage eines normalen Linienfluges erfolgen konnte, ist die Bewertung der Ergebnisse nicht trivial. Als Forschungsflugzeug führt der D-ATRA Testflüge durch, die nicht mit dem normalen Betrieb eines Flugzeuges zu vergleichen sind. In den Verwendeten Daten sind einige Flüge vorhanden, in denen die Maschine nach einem kurzen Flug bereits wieder zur Landung ansetzt, um kurz darauf erneut zu starten. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die im Taxibetrieb zurückgelegten Strecken.

In Abbildung 28 ist der Reifenabrieb bei einem durchschnittlichem Startvorgang mit der dazugehörigen Geschwindigkeit dargestellt. Die Schwankungen zu Beginn der Sequenz kommen vom Manövrieren aus der Parkposition, bevor das Flugzeug lange mit einer konstanten Geschwindigkeit in Richtung seiner Startposition rollt. Es ist deutlich der Einfluss der Geschwindigkeit zu

5. Auswertung und Ergebnisse

erkennen, so dass kleine Änderungen bei etwa 420 Sekunden sich beim Reifenabrieb abzeichnen. Allerdings sollte der Einfluss der Geschwindigkeit, wie er in diesen Ergebnissen dargestellt ist, mit Vorsicht betrachtet werden. Dies gilt insbesondere für Mittlere und hohe Geschwindigkeiten. Der Literatur ist zu entnehmen, dass der Rollwiderstandsbeiwert, der einen direkten Einfluss auf den Abrieb hat, bei geringen Geschwindigkeiten unter 80 km/h nahezu konstant ist und nur wenig mit der Geschwindigkeit steigt. Die gefundenen Angaben sind jedoch nicht für Flugzeugreifen ermittelt worden und es ist anzunehmen, dass verschiedene Reifenmodelle unterschiedlich auf die Geschwindigkeit reagieren.

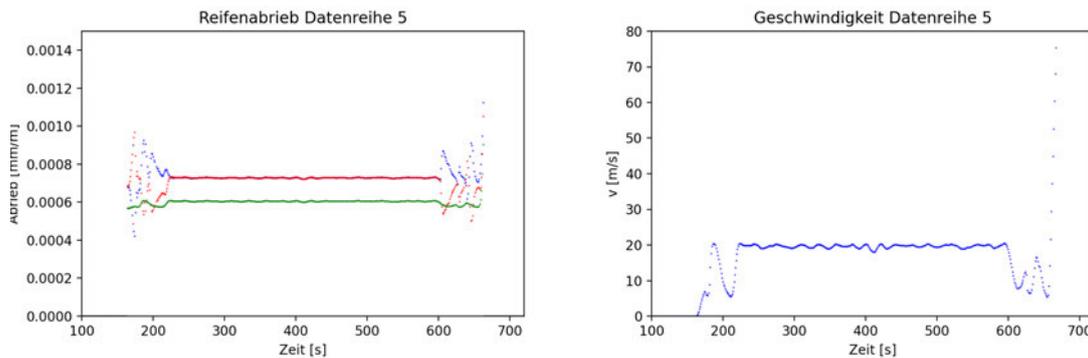


Abbildung 28: Berechneter Reifenabrieb von NLG (grün), MLG_{RH} (blau) & MLG_{LH} (rot) und Geschwindigkeit beim Startvorgang - Datenreihe 5

Bezüglich der Geschwindigkeit ist ein zweiter Punkt zu nennen, der für Fehler bei der Bestimmung des Reifenzustandes sorgen kann. Betrachtet man den Abrieb in Abbildung 28 kurz vor dem Abheben ist deutlich zu sehen, dass etwa der doppelte Abrieb pro gefahrenem Meter gegenüber dem restlichen Taxiweg erfolgt. Wird die Geschwindigkeit noch größer, ist ein Anstieg auf den drei- bis vierfachen Normalwert zu erwarten. Hinzu kommt, dass die Einheit des Abriebs in mm/m angegeben ist. Das bei hohen Geschwindigkeiten auch eine größere Strecke zurückgelegt wird, verstärkt zudem den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Gesamtzustand. Umso wichtiger ist es genau zu ermitteln, wann das Flugzeug noch am Boden ist und wann die Bereifung sich vom Boden löst. Hier können wenige Sekunden Unterschied bereits einen merklichen Einfluss auf den Verschleiß bringen.

Obwohl in den ADS-B Daten übermittelt wird, ob sich das Flugzeug am Boden oder in der Luft befindet, ist dieser Angabe in der Regel nicht zu vertrauen. Der Rückgriff auf die Geschwindigkeit und die Steigrate des Fliegers, eignet sich wegen ihrer schlechten Qualität nur bedingt für eine Aussage über Bodenkontakt. Dies ist zum Einen auf die generell schlechte Abdeckung der OSN Daten in Bodennähe zurückzuführen, zum Anderen lassen sich auch die Daten bei hohen Geschwindigkeiten und einer absoluten Nähe zum Empfangsmast schwerer übertragen.

In den Kurvenfahrten sinkt der berechnete Reifenabrieb der Reifen auf der innen liegenden Seite im gleichen Maße, wie der auf der außen liegenden Seite ansteigt. Dies lässt vermuten, dass im im Durchschnitt keinen wesentlichen Einfluss auf die Abnutzung des Reifens haben. In den in Abbildung 29 dargestellten Reifenabrieb ist deutlich sichtbar, wie sich die rechts- und linksgewundene Kurven subjektiv betrachtet ausgleichen. Wie ist trotzdem zu erklären, dass der Kurvenfahrten einen Anteil von 4 % am Gesamtabrieb haben, wie es in Tabelle 1 dargestellt ist, während Geradeausfahrten trotz der meist höheren Fahrtgeschwindigkeiten und der viel größeren Distanz nur 14 % zum Abrieb beitragen?

5. Auswertung und Ergebnisse

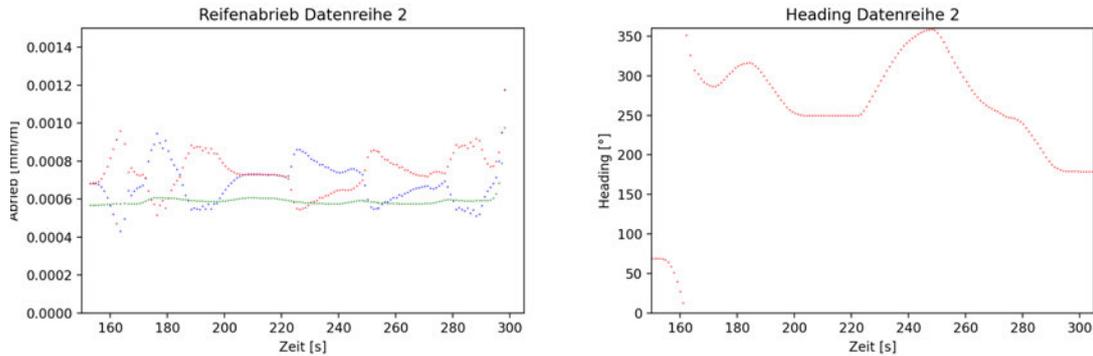


Abbildung 29: Berechneter Reifenabrieb von NLG (grün), MLG_{RH} (blau) & MLG_{LH} (rot) und Heading beim Startvorgang - Datenreihe 2

Ein wichtiger Grund hierfür, ist der Querschlepp von Reifen, der in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurde. Ähnlich dem Längsschlepp, hat dieser einen direkten und bei kleinen Schleppwinkeln linearen Zusammenhang mit dem Reifenabrieb. Um den Längsschlepp zu berechnen, ist der Winkel zwischen der Symmetrieebene des Reifens und der Fahrtrichtung zu bestimmen. Da innerhalb der ADS-B Daten keine Informationen zum Stand des Fahrwerkes übermittelt werden und das Fahrwerk selber eine hohe Flexibilität bezüglich Torsion aufweist, müssten zur Bestimmung einige Vereinfachungen getroffen werden.

5.2. Fehlerrückverfolgung

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen der Simulation zur Fehlerrückverfolgung sowie deren Auswertung.

5.2.1. Ergebnisse des Modells zur Fehlerrückverfolgung

Um einen Durchlauf für die Fehlerrückverfolgung zu erhalten, wurden 100 Simulationen durchgeführt. Für diese wurde dann entsprechend Gleichung 6 der Erfolg ermittelt. Dabei wurden Simulationen mit folgenden Auftretswahrscheinlichkeiten eines FOD bei einem Flug durchgeführt: 1%, 3%, 5% und 8%. Für jede Auftretswahrscheinlichkeit wurden jeweils fünf Durchläufe ausgeführt. Die Ergebnisse daraus sind in Tabelle 5 ausgeführt. „Fehlerfrei“ bedeutet dabei, dass bei keinem Flug eines Simulationsdurchganges ein Fehler induziert wurde. Die Prozentangabe entspricht dem Anteil der fehlerfreien Simulationen eines Durchlaufes.

Nachdem im ersten Teil der Fehlerrückverfolgung ausschließlich an einem Flughafen Fehler induziert werden, wird im zweiten Teil für jeden Flughafen eine Wahrscheinlichkeit von 0,5% für das Auftreten eines FOD eingestellt. Neben diesem Grundwert werden am Flughafen München mit einer zusätzlichen Wahrscheinlichkeit von 1%, 3%, 5% und 8% Fehler induziert. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

5.2.2. Analyse der Ergebnisse

Sofern nur an einem Flughafen Fehler induziert werden, sind die Wahrscheinlichkeiten für eine Rückverfolgung eines FOD sehr hoch. In Abbildung 30 sind die Erfolgchancen in Abhängigkeit

5. Auswertung und Ergebnisse

Wahrscheinlichkeit eines FOD	Erfolg	Misserfolg	Fehlerfrei
1 %	0,822	0	53 %
	0,838	0	54 %
	0,732	0	55 %
	0,790	0	59 %
	0,731	0	53 %
3 %	0,786	0	11 %
	0,835	0	20 %
	0,860	0	17 %
	0,834	0	10 %
	0,860	0	15 %
5 %	0,880	0	4 %
	0,867	0	5 %
	0,888	0	5 %
	0,909	0	6 %
	0,877	0	3 %
8 %	0,916	0	0 %
	0,913	0	1 %
	0,925	0	1 %
	0,931	0	0 %
	0,897	0	0 %

Tabelle 6: Erfolgchancen bei der Rückverfolgung künstlich induzierter FOD am Flughafen München

von der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers dargestellt. Da es im Allgemeinen jedoch nicht um die Rückverfolgung eines einzelnen aufgetretenen Fehlers zu seinem Ursprung geht, sondern um die Identifizierung von Flughäfen mit einem erhöhten Potenzial für FODs, ist auch die Abnahme der Erfolgchance bei geringerer Fehlerwahrscheinlichkeit als vernachlässigbar zu bewerten.

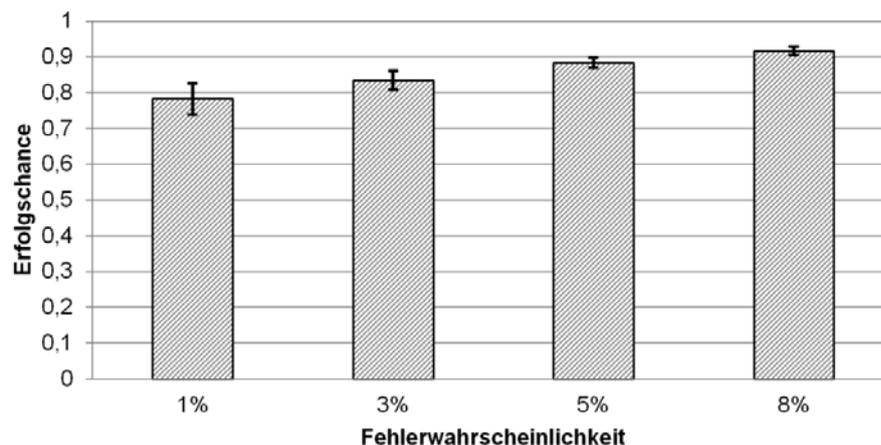


Abbildung 30: Rückverfolgung eines künstlich induzierten FOD am Flughafen München ohne generelle Auftrittswahrscheinlichkeit

Wenn allerdings für jeden Flughafen eine Chance besteht, dass ein Fehler auftritt, sinken die Wahrscheinlichkeiten den Flughafen mit einem erhöhten Aufkommen von FODs eindeutig zu identifizieren drastisch. Für den Fall, dass ein FOD mit einer 0,5 prozentigen Wahrscheinlichkeit an einem beliebigem Flughafen auftritt, sind die Erfolgchancen für eine Rückverfolgung in

5. Auswertung und Ergebnisse

Wahrscheinlichkeit eines FOD	Erfolg	Misserfolg	Fehlerfrei
1 %	0,055	0	0
	0,054	0	0
	0,076	0	0
	0,086	0	0
	0,059	0	0
3 %	0,183	0	0
	0,200	0	0
	0,185	0	0
	0,175	0	0
	0,217	0	0
5 %	0,286	0	0
	0,303	0	0
	0,315	0	0
	0,347	0	0
	0,383	0	0
8 %	0,470	0	0
	0,571	0	0
	0,501	0	0
	0,568	0	0
	0,465	0	0

Tabelle 7: Erfolgchancen bei der Rückverfolgung künstlich induzierter FOD mit erhöhter Wahrscheinlichkeit am Flughafen München

in Abbildung 31 dargestellt. Hierbei fällt der Unterschied zwischen großen und kleinen Fehlerwahrscheinlichkeiten deutlich stärker aus. Doch selbst wenn die Wahrscheinlichkeit für einen FOD an einem bestimmten Flughafen nur einen Prozentpunkt über den Restlichen liegt, kann der Flughafen in fast 7 % der Fälle aus einer Reihe von 55 Flughäfen ermittelt werden. Je größer hierbei die Datenlage ist, umso sicherer lässt sich auch bei geringen erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeiten eine Tendenz für einen Risikoflughafen finden.

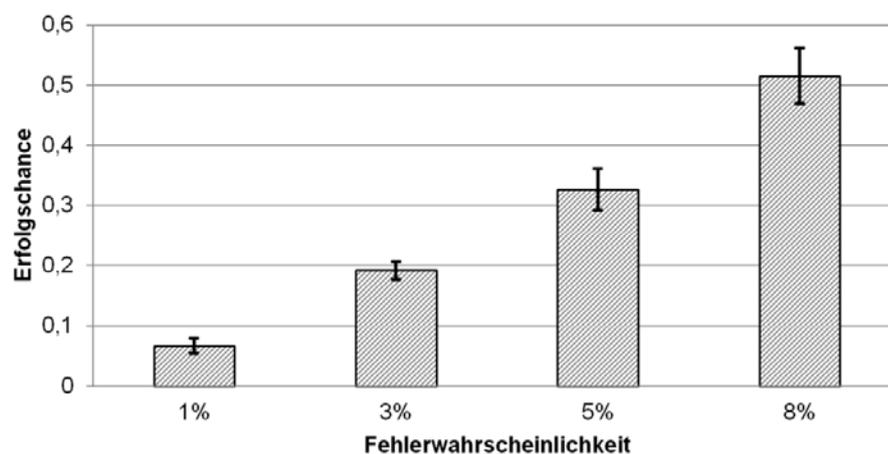


Abbildung 31: Rückverfolgung eines künstlich induzierten FOD am Flughafen München bei einer generellen Auftrittswahrscheinlichkeit von 0,5 %

6. Zusammenfassung und Fazit

Im Verlauf dieser Arbeit wurden zwei Modelle erstellt, die dabei helfen sollen, den Zustand eines Flugzeugreifens zu bewerten. Das erste Modell stützt sich dabei auf die frei verfügbaren Daten des OpenSky Net. Es nutzt die Daten, um mithilfe der Geschwindigkeit und Position des Flugzeuges den Abrieb der Reifen zu berechnen. Dem gegenüber steht das zweite Modell, welches sich nicht mit der kontinuierlichen Abnutzung des Reifens befasst, sondern das Risiko für außerordentlich vorkommende Schäden an Flughäfen, sogenannte Foreign Object Damages, bewertet.

Die Ausarbeitung des Modells zum kontinuierlichen Verschleiß zeigt, dass es generell möglich ist, anhand der über das OpenSkyNet zugänglichen ADS-B Daten Rückschlüsse über die Abnutzung der Reifen zu ziehen. Es ist gelungen, Werte für den Abrieb der Reifen in Abhängigkeit von der Bewegung und der Geschwindigkeit zu ermitteln. Allerdings ist eine ausreichende Abdeckung der Empfangsmasten für die Bodenbereiche von Flughäfen zum jetzigen Zeitpunkt nicht gegeben. Fehlerhafte oder gar nicht übermittelte Daten lassen nur schwer ein Bild über die Bewegung eines Flugzeuges im Bodenbetrieb zu. So ist es zwar möglich, die Abnutzung der Reifen für einzelne wenige Teilstrecken am Flughafen zu bestimmen, sie können jedoch aktuell keine Auskunft über den fortlaufenden Prozess des Verschleißes geben.

Anders sieht es für das Modell der Bewertung von Flughäfen aus. Hier konnte gezeigt werden, dass es in einem guten Umfang möglich ist, entstandene Fehler ihrem Ursprungsflughafen zuzuordnen. Da keine Schadensberichte von Herstellern zur Verfügung standen, konnte lediglich das Konzept für eine mögliche Bewertung von Flughäfen entwickelt werden, die das Risiko eines auftretenden FODs bewertet.

7. Ausblick

Da das Modell zur Fehlerrückverfolgung nur das Konzept hierfür untersucht hat, kann in einem weiteren Schritt versucht werden, die Ergebnisse aus dieser Arbeit mit realen Daten zu verifizieren. Hierfür wäre eine Zusammenarbeit mit einem Reifenhersteller interessant, der die Wartung und Aufbereitung der Flugzeugreifen durchführt. Sollte die Umsetzung der Bewertung von Flughäfen in der Praxis möglich sein, ergäbe sich hieraus eine gute Verhandlungsbasis für Airlines, die Nutzungskosten eines Flughafens zu senken. Für Reifenhersteller ergibt sich zudem, zusammen mit dem Modell zum Abrieb der Reifen, ein Blick von zwei Seiten auf den Zustand des Reifens. Sollte die Abdeckung der Flughäfen mit ADS-B Daten sich in Zukunft verbessern, könnte ohne eine manuelle Prüfung gesehen werden, ob sich die Aufbereitung eines bestimmten Reifens rentiert. Hierfür müsste das OSN Netz allerdings flächendeckend verbessert werden.

Literatur

- [1] Aiaa scitech forum. In *Improved Aircraft Tire Life through Laboratory Tire Wear Testing and Computational Modeling*, 2015.
- [2] <http://www.opensky-network.org>, 2020.
- [3] Atlas Air Service AG. www.aas.ag, 2021.
- [4] Deutsche Lufthansa AG. lufthansa.com.
- [5] Airbus. www.airbus.com/aircraft/market/orders-deliveries.html, 2021.
- [6] Airbus S.A.S. Customer Services. *A320 - Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning*, 2019.
- [7] Flight Aware. <https://de.flightaware.com/adsb/>, 2021.
- [8] Joerg J. Buchholz. Regelungstechnik und flugregler. Technical report, HS Bremen, 2014.
- [9] Peter Horst Cord-Christian Rossow, Klaus Wolf. *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*. Hanser, 2014.
- [10] P.J. Ferber and Mancy. McDonnell douglas aerospace. In *The Improved Tire Life Program*, 1993.
- [11] DLR Deutsches Zentrum fuer Luft-und Raumfahrt. dlr.de, 2021.
- [12] P. Moldauer M. Kroeger, M. Wangenheim. Internationaler kongress reifen-fahrwerk-fahrbahn. In *Temperature Effects on the Local Friction of Elastomers in Sliding and Rolling Contact*, 2005.
- [13] William W. Macy Megan K. Lay. Initial identification of aircraft tire wear. Technical report, SAE, 1995.
- [14] Nathan Meier. <http://www.jet-engine.net/civtfspec.html>, 2021.
- [15] Stefan Gies Metin Ersoy. *Fahrwerkhandbuch - Grundlagen, Fahrdynamik, Fahrverhalten, Komponenten, Elektronische Systeme, Fahrerassistenz, Autonomes Fahren, Perspektiven*. Springer, 2017.
- [16] Michelin. *Michelin Aircraft Tire Care and Servie Manual*, 2011.
- [17] Miller. American control conference. In *Calculating Longitudinal Wheel Slip and Tire Parameters Using GPS Velocity*, 2001.
- [18] Noordermeer Salehi. A new horizon for evaluating tire grip within a laboratory environment. Technical report, 2020.
- [19] AIRBUS S.A.S. Customer Services. A320 - aircraft characteristics, airport and maintenance planning aircraft characteristicsairport and maintenance planning. Technical report, Airbus, 2019.
- [20] Martin Orlita; Roelof Vos. Cruise performance optimization of the airbus a320 through flap morphing. Technical report, TUDelft, 2017.

Anhang

A. Liste der Flughäfen der verwendeten Flugdaten

A. Liste der Flughäfen der verwendeten Flugdaten

Nr.	ICAO	Flüge	tot. Bodenzeit [s]	Ø Bodenzeit [s]	Flughafen
1	EDDF	1891	564808	299	Frankfurt
2	LSZH	31	8111	262	Zuerich
3	EETN	26	6544	252	Tallin
4	EHAM	62	7923	128	Amsterdam
5	EDDM	62	7134	115	Muenchen
6	LFNR	8	704	88	Berre La Fare Airport
7	LIML	20	1253	63	Mailand
8	LFPG	56	3959	71	Paris CDG
9	LIPE	4	325	81	Bologna
10	LOWW	47	2525	54	Wien
11	EGPH	10	821	82	Edingburgh
12	EBBR	25	913	37	Bruessel
13	EKCH	75	3434	46	Kopenhagen
14	EPKK	9	542	60	Krakau
15	LSGG	8	425	53	Genf
16	ENGM	26	1390	53	Oslo
17	EDDT	114	6618	58	Berlin Tegel
18	EPWA	30	1298	43	Warschau
19	LBSF	8	387	48	Sofia
20	EDDL	43	1493	35	Duesseldorf
21	LIPZ	34	1279	38	Venedig
22	EGCC	58	2133	37	Manchester
23	LYBE	9	439	49	Belgrad
24	EGLL	265	9957	38	London Heathrow
25	ESSA	55	1623	30	Stockholm
26	ESGG	51	1941	38	Goeteburg
27	LFLL	24	646	27	Lyon
28	LMML	14	264	19	Malta
29	EDDV	11	289	26	Hannover
30	EDDH	45	1188	26	Hamburg
31	LHBP	49	1153	24	Budapest
32	EDDS	12	248	21	
33	LIRF	28	583	21	
34	LIMC	49	909	19	
35	LROP	16	331	21	
36	EGBB	26	466	18	
37	LDSR	2	5	3	
38	EVRA	18	47	3	
39	LFBO	17	27	2	
40	LEPA	2	3	2	
41	LDSP	2	2	1	
42	LEBL	22	19	1	
43	LKPR	22	15	1	
44	EDDN	4	3	1	
45	EYVI	6	4	1	
46	LEBB	2	1	1	
47	EDDC	25	8	0	
48	LRBS	3	1	0	
49	LFML	13	2	0	
50	EIDW	20	2	0	
51	LKSN	1	0	0	
52	EKBI	2	0	0	
53	EDAM	1	0	0	
54	EIWT	1	0	0	

