

Ratsgymnasium Osnabrück
Schuljahr 2014/2015
Seminarfach im C2-Profil

Facharbeit zum Rahmenthema Mathematik

**„Untersuchung von Startbahnlängen am Beispiel eines Airbus
A380 und der Bahn des Flughafens Münster/Osnabrück“**

Verfasserin: Anna-Katharina Langerenken
Fachlehrer: Herr Müller
Abgabetermin: 10.03.2015

Inhaltsverzeichnis

1 Problemstellung	1
2 Basisdaten	2
2.1 Flughafen Münster/Osnabrück	2
2.2 Airbus A380	2
3 Computergestützte Simulation von Bewegungsabläufen	3
3.1 Konstanten des Rechensystems	3
3.2 Festlegung der Startbedingungen	4
3.3 Nächster Zeitabschnitt	6
4 Anwendung der computergestützten Simulation am Startvorgang des A380	7
4.1 Maximal beladener A380 mit konstantem Rollwiderstand	7
4.2 Maximal beladener A380 mit reduzierendem Rollwiderstand	9
4.3 Leergewicht A380 inklusive 125t Treibstoff	10
5 Startabbruch	11
5.1 Berechnung der Abbremsstrecke des A380	12
6 Verlässlichkeit der Berechnungen	13
6.1 Verlässlichkeit der verwendeten Daten	13
6.2 Verlässlichkeit der computergestützten Simulation	14
7 Rückschluss auf die Problemstellung	15
8 Literaturverzeichnis	16
9 Internetquellen	20
10 Anhang	31

11 Eidesstattliche Erklärung

43

1 Problemstellung

Viele kleinere Flughäfen in Deutschland stehen zunehmend unter Druck Interkontinentalflüge anzubieten, um die Anzahl angeflogener Ziele und beförderter Passagiere zu steigern, um so steigende laufende Kosten zu decken und Gewinn zu erzielen. Der Flughafen Münster/Osnabrück leidet momentan jedoch, laut Daten der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Flughäfen, unter sinkenden Passagierzahlen.^[1] Die Betreiber des Flughafens möchten einer Zahlungsunfähigkeit durch eine größere und internationalere Auswahl an Reisezielen entgegenwirken. Zur wirtschaftlichen Gestaltung dieses Angebotes müssen große Passagierflugzeuge die Strecken abfliegen. Daher beschäftigt sich die Flughafengesellschaft seit 1994 mit einer Verlängerung der Start- und Landebahn, um die Möglichkeit zu bekommen, dass das derzeit größte Passagierflugzeug, der Airbus A380, am Flughafen Münster/Osnabrück starten kann.^[2] Ziel war es, die Startbahn auf eine Länge von 3600 m zu erweitern, da für einen A380 die derzeitige Startbahnlänge von 2170 m als zu kurz erachtet wird.^[3] Der vom nordrhein-westfälischen Verkehrsministerium im Jahr 2004 zugelassene Planfeststellungsbeschluss ist allerdings teilweise rechtswidrig, da die Erweiterung eine zu schützende Flora-Fauna-Habitat-Zone verletzt. Der Naturschutzbund Nordrhein-Westfalen (NABU) reichte eine Klage gegen den Beschluss ein, die durch das Oberverwaltungsgericht NRW als gerechtfertigt erklärt wurde, da das Interesse an der Natur das Interesse an einer verlängerten Startbahn überwiegt und keine gesteigerte Nachfrage nach Interkontinentalflügen nachgewiesen werden konnte.^[4] Der Planfeststellungsbeschluss wurde daraufhin 2011 als nichtig erklärt.^[5] Die Gesellschafter des Flughafens Münster/Osnabrück und NABU einigten sich außergerichtlich auf eine Erweiterung

¹ siehe Anhang Abbildung 1 ^[1] Statista 2013

² siehe Anhang Abbildung 2: Planung Startbahnverlängerung ^[2] Alberti, Stefan 2011

³ vgl. ^[3] Airportzentrale 2011

⁴ vgl. ^[4] Neue Osnabrücker Zeitung 2011

⁵ vgl. ^[5] Flugrevue 2011

der Startbahn auf 3000 m.^[6]

Im Folgenden wird die benötigte Startbahnlänge für einen Airbus A380 berechnet, um zu prüfen, ob das Passagierflugzeug auf der auf 3000 m verlängerten Startbahn starten könnte.

5 2 Basisdaten

2.1 Flughafen Münster/Osnabrück

Start- und Landebahnlänge: 2170m x 45m (Stand 2014) ^[7]

Mittlere Temperatur im Dezember 2014: 4,2° Celsius ^[8]

Maximaler Luftdruck im Dezember 2014: 1036,8 hPa ^[9]

10 2.2 Airbus A380

Höhe des Rumpfes: 8,40 m

Breite des Rumpfes: 7,15 m ^[10]

Länge: 73,00 m

Spannweite: 79,80 m

15 Tragflügelfläche: 845,00 m²

Auftriebsfläche beim Start inkl. Landeklappen: $A_t = 1.098,5 \text{ m}^2$

Auftriebsbeiwert: $c_a = 0,65$ ^[11]

Leermasse: $m_l = 276.800,00 \text{ kg}$

Maximale Startmasse: $m_v = 569.000,00 \text{ kg}$ ^[12]

20 Triebwerksleistung eines Triebwerkes:

Engine Alliance GP7200: $F_t = 311.000,00 \text{ N}$ ^[13]

Rolls Royce Trent 900: $F_t = 311.000,00 \text{ N}$ ^[14]

Gesamt Schub der vier vorhandenen Triebwerke: $F_s = 1.244.000 \text{ N}$

⁶ vgl. ^[6] Westfälische Nachrichten 2011

⁷ vgl. ^[7] Deutscher Ultraleichtflugverband e.V. (o.J.)

⁸ vgl. ^[8] WetterKontor (o.J.)

⁹ vgl. ^[9] Niederschlagsradar 2014

¹⁰ siehe Anhang Abbildung 3 ^[11] Wikipedia 2015

¹¹ vgl. ^[18] Naturwissenschaften im Unterricht Physik 1990, S.20ff.

¹² vgl. ^[10] Palt, Karsten 2014

¹³ vgl. ^[13] Engine Alliance 2004

¹⁴ vgl. ^[14] Rolls Royce (o.J.)

Widerstandsbeiwert für Stromlinienkörper: $c_w = 0,2$ [15]

Rollreibungszahl für Luftreifen auf Asphalt: $\mu_r = 0,02$ [16]

Bremsverzögerung der Radbremsen: $a_B = 1,7 \frac{m}{s^2}$ [17]

3 Computergestützte Simulation von 5 Bewegungsabläufen

Das Startverhalten eines Flugzeuges ist auf die drei newtonschen Gesetze zurückzuführen. Diese beinhalten das Trägheitsprinzip, die Bewegungsänderung durch Kraft und das Reaktionsprinzip, die der Bewegung des Flugzeuges beim Start zu Grunde liegen.

10 Zu Beginn werden Startwerte, bezogen auf die zu simulierende Situation, festgelegt, die während der Berechnung nicht geändert werden. Die computergestützte Simulation stützt sich auf den Grundsatz des festgelegten Verhaltens und der Beziehung zwischen Ursache und Wirkung. Dennoch können nur näherungs-
15 weise Werte für die Bewegung eines Flugzeuges bestimmt werden. Laut Newtons Grundgleichung der Mechanik

$$F = m * a$$

wird durch eine Kraft, die auf einen Körper, hier auf das Flugzeug, wirkt, eine Änderung der Bewegung erzeugt. Dadurch ändert sich wiederum die Geschwindigkeit des Flugzeuges und damit die zurückgelegte Startstrecke. Aus dem Zusammenhang zwischen Kraft und Startstrecke ergibt sich die benötigte Startbahnlänge eines A380. [18]

3.1 Konstanten des Rechensystems

25 Zunächst müssen für die Computersimulation des Startverhaltens des Airbus 380 die Bedingungen festgesetzt werden, die wäh-

¹⁵ vgl. [15] Das große Tafelwerk 2010, S.99

¹⁶ vgl. [16] Huppertz, Harald (o.J.)

¹⁷ vgl. [17] Bislin, Walter 2010

¹⁸ vgl. [19] Kuhn Physik. Band 2₁₁ 1992: S,46f.

rend der Berechnung unverändert bleiben. Dazu gehören die musterabhängigen Werte des Flugzeuges, die bereits definiert wurden und die daraus resultierenden Werte, welche für die Berechnungen der Startbahnlänge herangezogen werden müssen. Aus der
 5 Masse des Flugzeuges kann durch das Multiplizieren mit der Erdbeschleunigung von $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ die Gewichtskraft des Flugzeuges berechnet werden.

Maximale Gewichtskraft:

$$F_{Gmax} = m_v * g = 569.000,00kg * 9,81 \frac{m}{s^2} = 5.581.890,00N$$

10 Minimale Gewichtskraft:

$$F_{Gmin} = (m_l + \text{Treibstoff}) * g = (276.800,00kg + 125.000kg) * 9,81 \frac{m}{s^2} = 3.941.658,00N$$

Zur Berechnung des Luftwiderstandes, wird die Querschnittsfläche des Flugzeuges benötigt. Da die Querschnittsfläche der Tragflächen schwer zu kalkulieren ist, wird hier nur die des Rumpfes
 15 mit Hilfe des Flächeninhaltes einer Ellipse herangezogen.

$$A_{Rumpf} = \pi * \text{Halbachse a} * \text{Halbachse b} = \pi * 4,20m * 3,57m = 47,10m^2$$

Die Luftdichte am Flughafen Münster/Osnabrück wird zur Berechnung des Auftriebs und der Widerstände benötigt. Sie wird
 20 aus der vor Ort gegebenen Temperatur T in Kelvin, dem Luftdruck p und der Gaskonstante für Luft $R = 287,058 \frac{J}{kg * K}$ berechnet.

$$\rho = \frac{p}{R * T} = \frac{1036,8hPa}{287,058 \frac{J}{kg * K} * 277,35K} = 1,3 \frac{kg}{m^3} \quad \boxed{\boxed{19,20}}$$

3.2 Festlegung der Startbedingungen

25 Zum Beginn des Startvorgangs besitzt das Flugzeug keine Geschwindigkeit v und hat noch keine Strecke s zurückgelegt. Somit ergeben sich zu Beginn der Berechnung die Parameter $v = 0 \frac{m}{s}$

¹⁹ vgl. [\[20\]](#) Schweizer, Anton 2015

²⁰ Zur Übersicht siehe Anhang Abbildung 4

und $s = 0m$.^[21] Die Beschleunigung a des Flugzeuges durch die Triebwerke besteht ab dem Beginn des Startvorganges.

$$a = \frac{F_{Schub} - F_{Luftwiderstand} - F_{Rollwiderstand}}{Masse}$$

Da nur kleine Zeitabschnitte betrachtet werden, in denen die Bewegung annähernd geradlinig gleichförmig ist, lassen die Formeln

$$v = a * t$$

$$s = v * t$$

von der Beschleunigung auf die benötigte Startbahnlänge eines A380 schließen. Sobald

$$F_{Auftrieb} = \frac{1}{2} * c_a * \rho * A_{Tragflächen} * v^2 > F_G \quad [22]$$

hebt das Flugzeug ab. Innerhalb der Zeit, die das Flugzeug benötigt, um die Geschwindigkeit zu erreichen bei der $F_{Auftrieb} > F_G$ ist, legt es eine Strecke zurück, die als benötigte Startbahnlänge bezeichnet wird. Die Geschwindigkeit, erzeugt durch die Beschleunigung, wird vom Schub F_{Schub} und den Widerständen $F_{Luftwiderstand}$ und $F_{Rollwiderstand}$ beeinflusst. Bei beiden verwendbaren Triebwerken, dem GP7200 von Engine Alliance und dem Trent 900 von Rolls Royce, beträgt der Gesamtschub der vier eingebauten Triebwerke

$$F_{Schub} = 4 * F_{Triebwerk} = 4 * 311.000N = 1.244.000N.$$

Der Luftwiderstand $F_{Luftwiderstand}$ wird durch folgende Formel definiert:

$$F_{Luftwiderstand} = 0,5 * \rho * A_{Rumpf} * c_w * v^2 \quad [23]$$

Der Rollwiderstand $F_{Rollwiderstand}$ ist ermittelbar mit :

$$F_{Rollwiderstand} = Rollreibungszahl * (F_G - F_{Auftrieb}) \quad [24]$$

Bei der computergestützten Berechnung der Startbahnlänge werden die Parameter Beschleunigung, Geschwindigkeit und Strecke in einem Zeitintervall Δt berechnet.

²¹ vgl. [19] Kuhn Physik. Band 2₁₁, S. 46

²² vgl. [18] Naturwissenschaften im Unterricht Physik 1990, S.20ff.

²³ vgl. [18] Naturwissenschaften im Unterricht Physik 1990, S.20ff.

²⁴ vgl. [21] Agerer, Markus (o.J.)

3.3 Nächster Zeitabschnitt

In dem nächsten Zeitabschnitt Δt ändert sich die Beschleunigung a aufgrund des neu eingesetzten Wertes für t und der neu errechneten veränderten wirkenden Auftriebs-, Luftwiderstands- und Rollwiderstandskraft. Da die Aerodynamik von Flugzeugen noch nicht komplett erforscht wurde, ist lediglich anzunehmen, dass beim Flugzeug mit zunehmender Geschwindigkeit der Rollwiderstand kleiner wird, da sich aufgrund der zunehmenden Auftriebskraft die Gewichtskraft auf die Räder verringert. Entgegengesetzt dazu nimmt der Luftwiderstand bei steigender Geschwindigkeit quadratisch zu. Normalerweise sinkt die Beschleunigung mit zunehmender Geschwindigkeit, da die Widerstände größer werden. Betrachtet man allerdings einen Rollwiderstand, der durch den Auftrieb, welcher mit zunehmender Geschwindigkeit steigt, verringert wird, steigt die Beschleunigung bis zum Abheben des Flugzeuges, da der induzierte Gesamtwiderstand sich verkleinert. Aus der Beschleunigung a_{neu} für den folgenden Zeitabschnitt Δt wird die Geschwindigkeit für den nächsten Schritt berechnet.

$$\Delta v = a * \Delta t.$$

Aus der vorangegangenen Geschwindigkeit v_{alt} berechnet der Computer nun die neue Geschwindigkeit v_{neu} . Dafür wird zu v_{alt} die Geschwindigkeitsänderung Δv im Zeitintervall Δt addiert.

$$\begin{aligned} v_{neu} &= v_{\Delta t} \\ &= v_{alt} + \Delta v \quad \text{mit } \Delta v = a * \Delta t \\ &= v_{alt} + a_{neu} * \Delta t \\ &= v_{\Delta t-1} + a_{\Delta t} * \Delta t \end{aligned}$$

Aus v_{neu} lässt sich die Änderung der zurückgelegten Wegstrecke Δs berechnen, indem v_{neu} mit Δt multipliziert wird. Die neue Strecke ist wiederum durch die Addition der alten Strecke und der Streckenänderung Δs zu erhalten.

$$\begin{aligned} s_{neu} &= s_{\Delta t} \\ &= s_{alt} + \Delta s \quad \text{mit } \Delta s = v * \Delta t \\ &= s_{alt} + v_{neu} * \Delta t \end{aligned}$$

$$= s_{\Delta t-1} + v_{\Delta t} * \Delta t \quad [25]$$

Im folgenden Zeitintervall läuft dieses Näherungsverfahren erneut durch und die neu berechneten Werte aus den vorherigen Schritten werden als Ausgangswerte angenommen. Diese schrittweise Approximation entspricht einer Rechenschleife im Computer. Mit Hilfe dieses Verfahrens lassen sich auch komplexe Bewegungsabläufe mit simpler Mathematik berechnen. Zum Berechnen der benötigten Startbahnlänge des A380 läuft die Rechenschleife, bis

$$F_{Auftrieb} > F_G,$$

da dann auf das Flugzeug mehr Auftriebskraft wirkt als Gewichtskraft und somit das Flugzeug abhebt.

4 Anwendung der computergestützten Simulation am Startvorgang des A380

Zur Berechnung der Startstrecke des A380 werden die zuvor festgelegten Werte in das Computersystem eingegeben und entsprechende Näherungswerte bestimmt. In die Berechnung können verschiedene Parameter miteinbezogen oder auch vernachlässigt werden. Zur Bestimmung, ob der A380 am Flughafen Münster/Osnabrück starten kann, werden im Folgenden die Minima und Maxima der Strecke berechnet.

4.1 Maximal beladener A380 mit konstantem Rollwiderstand

Für die Berechnung der Startstrecke eines maximal beladenen A380 mit einer Gewichtskraft von 5.581.890 N wird vorerst zur Übersichtlichkeit ein konstanter Rollwiderstand angenommen.

$$F_{Rollwiderstand} = 0,02 * 5.581.889 N = 111.637,8 N$$

²⁵ vgl. [19] Kuhn Physik. Band 2₁₁ 1992: S.46f.

Da der Luftwiderstand zu Beginn des Startvorganges

$F_{Luftwiderstand_{alt}} = 0N$ beträgt, ergibt sich die Anfangsbeschleunigung

$$a_{alt} = \frac{1.244.000N - 0N - 111.637,8N}{569.000,00kg} = 1,99 \frac{m}{s^2},$$

- 5 woraus folgt, dass sich die Geschwindigkeit im nächsten Zeitintervall $\Delta t = 0,1s$ erhöht.

$$v_{neu} = 0 + 1,99 \frac{m}{s^2} * 0,1s = 0,199 \frac{m}{s}$$

Die gesteigerte Geschwindigkeit erhöht die Wegstrecke.

$$s_{neu} = 0 + 0,199 \frac{m}{s} * 0,1s = 0,0199m$$

- 10 Aus der neuen Geschwindigkeit wird ein neuer Wert für den Luftwiderstand und die Auftriebskraft berechnet.

$$F_{Luftwiderstand_{neu}} = 0,5 * 1,3 \frac{kg}{m^3} * 47,1m^2 * 0,2 * (0,199 \frac{m}{s})^2 = 0,24N$$

$$F_{Auftrieb_{neu}} = 0,5 * 1,3 \frac{kg}{m^3} * 1.098,5m^2 * 0,65 * (0,199 \frac{m}{s})^2 = 16,86N$$

- 15 Der Wert für den Luftwiderstand wird dann wieder in die Formel für die Beschleunigung eingesetzt und die Rechenschleife beginnt erneut bis die Auftriebskraft $F_{Auftrieb}$ die Gewichtskraft F_G von 5.581.889 N übersteigt. Ab diesem Zeitpunkt hebt das Flugzeug ab und der letzte errechnete Wert für s ist die benötigte Startbahnlänge.

- 20 Die Geschwindigkeit bei der $F_{Auftrieb} > F_{Gmax}$ beträgt bei einem maximal beladenen Airbus A380 $v = 109,58 \frac{m}{s}$. Dies entspricht etwa $394 \frac{km}{h}$ und wird bei vollem Schub in 56,3 Sekunden erreicht. Daraus ergibt sich für die definierte Situation eine benötigte Startbahnlänge des A380 von **s= 3125 m.** 26

²⁶ siehe Anhang Abbildung 5

4.2 Maximal beladener A380 mit reduzierendem Rollwiderstand

Um die Berechnung zu verfeinern, ist es möglich den Rollwiderstand anzupassen. Der Rollwiderstand wird während der Startphase mit zunehmender Geschwindigkeit geringer. Dies geschieht durch die zunehmende Auftriebskraft, die die Gewichtskraft des Flugzeuges mehr und mehr kompensiert. Daher wirkt weniger Gewichtskraft auf die Reifen und der Rollwiderstand verringert sich.

$$F_{\text{Rollwiderstand}} = \text{Rollreibungszahl} * (F_G - F_{\text{Auftrieb}})$$
$$F_R = \mu_r * (F_G - F_A)$$

Zu dem zuvor erstellten Rechensystem wird eine Spalte mit dem Rollwiderstand hinzugefügt, sodass die Gewichtskraft bei jedem Durchlauf der Rechenschleife durch den neuen Wert der Auftriebskraft reduziert wird und sich der Rollwiderstand verkleinert. Dadurch wird der zu subtrahierende Wert im Zähler der Berechnung der Beschleunigung geringer.

$$a = \frac{F_{\text{Schub}} - F_{\text{Luftwiderstand}} - F_{\text{Rollwiderstand}}}{m_v}$$

Dadurch wächst die Beschleunigung, die Geschwindigkeit steigt schneller an und die Abhebegeschwindigkeit wird früher erreicht, wodurch sich die Startstrecke verkürzt.

Unter Annahme der zuvor berechneten und festgelegten Werte benötigt ein maximal geladener A380 unter Berücksichtigung eines sich reduzierenden Rollwiderstandes eine Startstrecke von **s= 2988 m**. Diese Strecke legt das Flugzeug in 55 Sekunden zurück.

Durch den Einbezug des sich verringernenden Rollwiderstandes in die Berechnung verkürzt sich die Startzeit um etwa 1 Sekunde. Dies entspricht einer Reduzierung der Startzeit von 3,2%. Statt der zuvor berechneten Startbahnlänge von 3125 m, verkürzt sich die benötigte Startbahnlänge um 137 m, was einer Startbahnlängenverkürzung von 4,4% entspricht. 27

²⁷ siehe Anhang Abbildung 6

4.3 Leergewicht A380 inklusive 125t Treibstoff

Eine geringere Startstrecke benötigt ein unbeladener A380 inklusive eines halb gefüllten Tanks mit 125.000 kg Treibstoff. Durch die geringere Gewichtskraft von 3.941.658 N verkleinert sich der Rollwiderstand, da

$$F_{Gmin} < F_{Gmax},$$

wodurch die Gewichtskraft, die auf die Reifen wirkt geringer ist. Zudem ist die benötigte Auftriebskraft schneller erreicht, da weniger Gewicht angehoben werden muss und die Kraftwirkung

$$F_{Gmin} < F_{Auftrieb}$$

auf das Flugzeug, bei der es abheben kann, eher erreicht wird. Aufgrund des geringeren Rollwiderstandes

$$a = \frac{F_{Schub} - F_{Luftwiderstand} - F_{Rollwiderstand}}{m_i}$$

nimmt die Beschleunigung stärker zu, weil dem Vorschub weniger Widerstand entgegen steht. Außerdem ist die Masse, die durch die Schubkraft bewegt werden muss vermindert, sodass die Beschleunigung bereits zu Beginn höher ist als bei einem maximal beladenen Flugzeug. Daraus folgt, dass die Geschwindigkeit schneller zunimmt und die Auftriebskraft quadratisch mit der Geschwindigkeit steigt.

$$F_{Auftrieb} = \frac{1}{2} * c_a * \rho * A_{Tragflächen} * v^2$$

Daraus wiederum folgt, dass der Rollwiderstand sinkt.

Da $F_{Auftrieb} > F_G$ eher erreicht wird, sinkt die Abhebegeschwindigkeit und somit werden die benötigte Zeit und Startstrecke verkürzt.

Das Flugzeug benötigt bei einer Masse von 401,8 t eine Zeit von 32 Sekunden, um bis zur Abhebegeschwindigkeit von $92,3 \frac{m}{s}$ zu beschleunigen. In dieser Zeit legt es **1458 m** zurück. Somit braucht der nur mit Treibstoff beladene Airbus A380 nur etwa die Hälfte der benötigten Startstrecke eines maximal beladenen

A380 mit sich reduzierendem Rollwiderstand. Die zu erreichende Geschwindigkeit reduziert sich um etwa 16% und die benötigte Zeit bis zum Abheben wird um 42% verkürzt.^{[28] [29] [30] [31]}

5 Startabbruch

5 Unter Startabbruch versteht man das Unterbrechen des Startvorgangs und das effektivste Abbremsen des Flugzeuges, um ein schnelles Anhalten, beispielsweise aufgrund eines technischen Defektes, zu bewirken.

Gründe für einen Startabbruch können technische Fehler am
10 Flugzeug sein, wie zum Beispiel der Ausfall eines Triebwerkes, die Überlastung eines Reifens und das dadurch herbeigeführte Platzen oder Defekte an den Instrumenten, wie des Fahrtmessers. Die verfügbare Startabbruchstrecke besteht aus der restlichen Länge der Startbahn und einer eventuell angeschlossenen
15 Stoppbahn. Für eine möglichst lange verfügbare Startabbruchstrecke ist die Schnelligkeit der Reaktion des Flugzeugführers entscheidend. Denn in der Zeit vom Auftreten des Defektes bis zum Einleiten des Abbruchmanövers verringert sich die verfügbare Strecke aufgrund der bestehenden Vorwärtsbewegung des
20 Flugzeuges. Die Reaktionszeit, die ein Flugzeugführer zum Einleiten des Manövers benötigt, liegt bei etwa einer Sekunde. Aufgrund von Differenzen in der Reaktionsgeschwindigkeit der Piloten und der nicht mathematisch rekonstruierbaren Reaktion eines Menschen, wird die Reaktionszeit durch eine Pufferzeit auf
25 zwei Sekunden erweitert.

Die benötigte Startabbruchstrecke ist stark von der bereits erreichten Geschwindigkeit des Flugzeuges abhängig. Bis zu einer Geschwindigkeit v_1 , die bei jedem Flugzeug unterschiedlich und von der Startbahn abhängig ist, muss die erste Handlung des

²⁸ siehe Anhang Abbildung 7

²⁹ Zum Vergleich der verschiedenen Beschleunigungen siehe Anhang Abbildung 8

³⁰ Zum Vergleich der Geschwindigkeiten siehe Anhang Abbildung 9

³¹ Zum Vergleich der Startstrecken siehe Anhang Abbildung 10

Luftfahrzeugführers erfolgen. Mit

$$v_{Defekt} < v_1$$

kann das Flugzeug nach Auftreten des Defektes noch innerhalb der verfügbaren Strecke abgebremst werden. Bei

5
$$v_{Defekt} > v_1$$

sollte ein Flugzeugführer je nach Schwere des Defektes trotzdem starten, um nicht über das Startbahnende „hinauszuschießen“.^[32]

5.1 Berechnung der Abbremsstrecke des A380

Mit Hilfe der Computersimulation ist es ebenfalls möglich den
10 Bremsweg des A380 zu berechnen. Dazu wird für die Bremsverzögerung a_B der Radbremsen ein Wert von $-1,7 \frac{m}{s^2}$ angenommen. Daraus wird wie bereits beschrieben (siehe 3.3) die Geschwindigkeit berechnet. Aufgrund der negativen Beschleunigung sinkt die Geschwindigkeit. Die benötigte Strecke bis zum Stillstand wird
15 aus der Geschwindigkeit und der Zeit bis $v=0$ errechnet. Bei dem maximal beladenen A380 beträgt die berechnete benötigte Abbremsstrecke, abgebremst bei der Abhebegeschwindigkeit von $109,9 \frac{m}{s}$ in 64,7 s **3544,58 m**.

Um das Flugzeug noch auf der verlängerten Startbahn mit 3000
20 m zum Halten zu bringen, wird in der Berechnung der Abbremsstrecke zurückgegangen bis zu dem Rechenschritt, bei dem noch 3000 m Strecke übrig sind.

$$3544,58 \text{ m} - 3000 \text{ m} = 544,58 \text{ m}$$

An dieser Stelle wird die Geschwindigkeit, welche das Flugzeug
25 zu dem Zeitpunkt noch besitzt, mit $101,19 \frac{m}{s}$ abgelesen. Dieser Wert dient als Ausgangswert für die Berechnung des Bremsweges bei einer Strecke von 3000 m. Ebenso wird für die Strecke von 2170 m ein Wert für die Geschwindigkeit abgelesen, die das Flugzeug maximal haben darf, um innerhalb der Strecke zu halten.

³² vgl. [22] Angewandte Flugleistung. Eine Einführung in die operationelle Flugleistung vom Start bis zur Landung 2008, S.169-179

$$3544,58 - 2170 \text{ m} = 1374,58 \text{ m}$$

Hier beträgt die Geschwindigkeit $86,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Um v_1 zu bestimmen werden die Graphen der Bremsverzögerung
5 in das Diagramm der Geschwindigkeitsentwicklung des Flugzeu-
ges beim Start eingefügt und die Schnittpunkte abgelesen. Bei
einer Startbahnlänge von 2170 m liegt der Schnittpunkt der Gra-
phen bei einer Geschwindigkeit von $46,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und bei 3000 m Start-
bahn bei $54,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Abzüglich der zwei Sekunden Reaktionszeit
10 darf der A380 bis maximal $42,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bzw. $50,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beschleunigen, um
noch innerhalb der verfügbaren Startabbruchstrecke halten zu
können. 3334

6 Verlässlichkeit der Berechnungen

Aufgrund von Ungenauigkeiten oder Fehlern in der Verwendung
15 der Daten oder des Rechensystems gilt es nach ausgewerteten
Berechnungen deren Verlässlichkeit zu hinterfragen.

6.1 Verlässlichkeit der verwendeten Daten

In den zuvor durchgeführten Berechnungen wurde von absolu-
ten Musterwerten ausgegangen, die nur näherungsweise reali-
20 tätsgetreu sind. Das liegt daran, dass beim Start eines Flug-
zeuges viele Faktoren einfließen, die nicht in den Rechnungen
berücksichtigt wurden. Die Faktoren lassen sich in drei Katego-
rien unterteilen: Flugzeugbedingte Einflüsse, startbahnbedingte
Einflüsse und meteorologisch bedingte Einflüsse. Zu den flug-
25 zeugbedingten Einflüssen zählen unter anderem die verringerte
Schubkraft, denn es wird nie die komplette Schubkraft erreicht,
um die Triebwerke zu schonen und weil aus den Triebwerken Luft
entnommen wird für die Klima- und die Enteisungsanlagen, wo-
durch die Startleistung verringert wird. Auch die nur geschätz-
te Vergrößerung der Auftriebsfläche durch die Klappen und die

³³ vgl. Anhang Abbildung 12

³⁴ vgl. Anhang Abbildung 13

Vernachlässigung der Querschnittsfläche der Tragflächen tragen zu einer geringen Startleistung bei und verändern die benötigte Startstrecke. Die startbahnbedingten Einflüsse sind auf jedem Flughafen unterschiedlich und beinhalten die Startbahnneigung und -oberfläche. Die Startbahnneigung ist am Flughafen Münster/Osnabrück verschwindend gering, sodass sie in den Berechnungen außer Acht gelassen wurde. Bei einer größeren Steigung würde sich die benötigte Startbahnlänge jedoch verkürzen oder verlängern. Zu den meteorologischen Einflüssen zählen unter anderem der Luftdruck, die Luftfeuchte, die Temperatur und der Windeinfluss. Diese Werte sind lediglich aus festgehaltenen Messungen des Wetterdienstes zu erhalten oder müssen direkt am Flughafen eingeholt werden. Eine exakte Berechnung ist wegen der Ungenauigkeiten nicht möglich und die Berechnungen nur als Beispiel anzusehen.^[35]

6.2 Verlässlichkeit der computergestützten Simulation

Die computergestützte Simulation von Bewegungsabläufen kann keine exakte Lösung bringen, da mit festen Zeitintervallen gearbeitet wird, wodurch angenommen wird, dass Beschleunigung, Luftwiderstand, Rollwiderstand und Geschwindigkeit innerhalb des Zeitintervalls Δt konstant sind, obwohl die Parameter in einer beschleunigten Bewegung zu keinem Zeitpunkt konstant sind. Je geringer die Spanne der Zeitintervalle ist, desto weniger fällt dieser Fehler ins Gewicht. Ein Fehler in der Berechnung steigert sich jedoch mit abnehmender Intervallspanne, da die Rechengenauigkeit des Computers begrenzt ist. Es entstehen Rundungsfehler, die sich mit der Anzahl der Berechnungsschritte vergrößern. Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen, muss ein Schnittpunkt zwischen der Größe der Zeitintervalle und der Genauigkeit der Werte ausfindig gemacht werden. Mit dieser Berechnung lässt

³⁵ vgl. [22] Angewandte Flugleistung. Eine Einführung in die operationelle Flugleistung vom Start bis zur Landung 2008, S.169-179

sich kein exakter Wert ermitteln, da eine absolute Genauigkeit nicht gegeben ist. ^[36]^[37]

5 Doch auf Grundlage eines Videos, das den Start eines A380 in Los Angeles zeigt, wird deutlich, dass die Berechnungen annähernd realitätsgetreu sind, da der gefilmte Start etwa 56 Sekunden dauert. ^[38]

7 Rückschluss auf die Problemstellung

In Bezug auf die Problemstellung zeigen die Berechnungen, dass
10 der Airbus A380 im maximal beladenen Zustand bei einer verlängerten Startbahn auf 3000 m zwar rechnerisch starten könnte, aber aus Sicherheitsgründen ein Start nicht erlaubt werden wird. Ein leeres Flugzeug mit halb befülltem Tank könnte bereits auf der bisherigen Startbahn mit einer Länge von 2170 m
15 den Flughafen verlassen. Für den Flughafen Münster/Osnabrück bedeutet dies, dass er nur bei einer Startbahnlänge von 3600 m in der Lage ist den A380 in den Linienverkehr am Flughafen zu
415 übernehmen.

³⁶ Zum Vergleich der Berechnungsfehler durch einen geringeren Zeitintervall siehe Anhang Abbildung 6 und 11

³⁷ vgl. ^[19]Kuhn Physik. Band 2₁₁ 1992: S.46f.

³⁸ vgl. ^[23]Egooktamuck 2011

8 Literaturverzeichnis

- [1] [Hrsg.] Statista (2013): Entwicklung des Passagieraufkommens am Flughafen Münster/Osnabrück in den Jahren 1991 bis 2012. Verfügbar unter: <http://www.parken-flughafenduesseldorf.net/2013/04/22/bundesland-in-fluglaune-alle-internationalen-flughaefen-in-nordrhein-westfalen-im-ueberblick/> (Zugriff: 02.02.2015)
- [2] Alberti, Stefan (2011): Startbahnverlängerung am FMO: Woche der Wahrheit?. Verfügbar unter: http://www.noz.de/media/2013/09/16/wird-die-startbahn-am-fmo-verlaengert-oder-nicht_full.jpg (Zugriff: 27.01.2015)
- [3] [Hrsg.] Airportzentrale (2011): „Ostbevern“ fliegt um die Welt: Airbus A380 wird am 1. April am Flughafen FMO (Greven) getauft. Verfügbar unter: <http://www.airportzentrale.de/ladbergen-fliegt-um-die-welt-airbus-a380-wird-am-1-april-am-flughafen-fmo-greven-getauft/5594/> (Zugriff: 12.02.2015)
- [4] [Hrsg.] Neue Osnabrücker Zeitung (2011): FMO: Die Startbahn-Planung muss in die Verlängerung - Aussicht auf viele Interkontinentalflüge „eher gering“. Verfügbar unter: <http://www.noz.de/artikel/393866/fmo-die-startbahn-planung-muss-in-die-verlangerung-aussicht-auf-viele-interkontinentalfluge-eher-gering> (Zugriff: 12.02.2015)
- [5] Steinke, Sebastian (2011): Münster/Osnabrück darf Startbahn nicht verlängern. Verfügbar unter: <http://www.flugrevue.de/zivilluftfahrt/airport/muensterosnabrueck-darf-startbahn-nicht-verlaengern/490728> (Zugriff: 12.02.2015)
- [6] [Hrsg.] Westfälische Nachrichten (2011): Flughafen und NABU: 3000 Meter kommen / Bach wird verlegt. Verfügbar

unter: <http://www.wn.de/Archiv/2011/12/Einigung-ueber-FMO-Ausbau-Flughafen-und-Nabu-3000-Meter-kommen-Bach-wird-verlegt> (Zugriff: 25.01.2015)

- [7] [Hrsg.] dulv.de (o.J.): Detailansicht UL-Flugplatz Verfügbar unter: ww.dulv.de/Flugplatz/details.php?id=1012 (Zugriff: 24.02.2015)
- [8] [Hrsg.] WetterKontor (o.J.): Monats- und Jahreswerte für Münster/Osnabrück. Verfügbar unter: Monats- und Jahreswerte für Münster / Osnabrück (Zugriff: 08.02.2015)
- [9] [Hrsg.] Niederschlagsradar (2014): Luftdruck Münster/Osnabrück. Verfügbar unter: [http://www.niederschlagsradar.de/wettercharts.aspx?station=M%C3%BCnster%2FOsnabrueck&stationcode=6&soort=AirPressure](http://www.niederschlagsradar.de/wettercharts.aspx?station=M%C3%BCnster%2F%2FOsnabrueck&stationcode=6&soort=AirPressure) (Zugriff: 02.02.2015)
- [10] Palt, Karsten (2014): Airbus A380. Verfügbar unter: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_a380_dt.php (Zugriff: 18.01.2015)
- [11] [Hrsg.] Wikipedia (2015): Großraumflugzeug. Verfügbar unter: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/Airbus_A380_versus_Boeing_747.svg/220px-Airbus_A380_versus_Boeing_747.svg.png (Zugriff: 08.02.2015)
- [12] [Hrsg.] Wikipedia (2008): Airbus A380. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380 (Zugriff: 08.02.2015)
- [13] [Hrsg.] Engine Alliance (2004): Engine Alliances GP7200 Engines Exceed Performance Expectations During Initial Testing. Verfügbar unter: http://enginealliance.com/pr/pr_071904b.html (Zugriff: 22.01.2015)

- [14] [Hrsg.] Rolls Royce (o.J.): Leading technology High technology, great benefits. Verfügbar unter: http://www.rolls-royce.com/civil/products/largeaircraft/trent_900/ (Zugriff: 22.01.2015)
- [15] Erbrecht, Prof. Dr. Rüdiger et al. (2010): Das große Tafelwerk. Formelsammlung für die Sekundarstufen I und II. Berlin: Cornelsen Verlag.
- [16] Huppertz, Harald (o.J.): Rollwiderstand. Verfügbar unter: <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Rollwiderstand.htm> (Zugriff: 08.02.15)
- [17] Bislin, Walter (2010): Wie bremst ein Verkehrsflugzeug nach der Landung?. Verfügbar unter: <http://walter.bislins.ch/blog/index.asp?page=Wie+bremst+ein+Verkehrsflugzeug+nach+der+Landung%3F> (Zugriff: 17.01.2015)
- [18] Luchner, Karl (1990): Ein Großflugzeug (Jumbo), physikalisch abgeschätzt. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 1990, Heft 4. Seelze: Erhard Friedrich Verlag GmbH & Co. KG. Seite 20-22
- [19] Euler, Prof. Dr. Manfred et al. (1992): Kuhn Physik. Band 2₁₁. Braunschweig: Westermann Druck GmbH.
- [20] Schweizer, Anton (2015): Lüftungstechnik - Grundformeln. Verfügbar unter: <http://www.schweizer-fn.de/lueftung/grundformel/grundformeln.php> (Zugriff: 13.02.2015)
- [21] Agerer, Markus Sebastian (o.J.): Rollwiderstand / Rollreibung berechnen. Verfügbar unter: <http://maschinenbauwissen.de/skript3/mechanik/kinetik/283-rollreibung> (Zugriff: 20.02.2015)

- [22] Scheiderer, Joachim (2008): Angewandte Flugleistung. Eine Einführung in die operationelle Flugleistung vom Start bis zur Landung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [23] Egooktamuck (2011): A380 Start (Take Off) San Francisco. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=wQ-igqVJSR8> (Zugriff:21.02.2015)

9 Internetquellen

1. [3] Airportzentrale 2011
2. [4] Neue Osnabrücker Zeitung 2011
3. [5] Flugrevue 2011
4. [6] Westfälische Nachrichten 2011
5. [7] Deutscher Ultraleichtflugverband e.V. (o.J.)
6. [8] WetterKontor (o.J.)
7. [9] Niederschlagsradar 2014
8. [10] Palt, Karsten 2014
9. [12] Wikipedia 2008
10. [13] Engine Alliance 2004
11. [14] Rolls Royce (o.J.)
12. [16] Huppertz, Harald (o.J.)
13. [17] Bislin, Walter 2010
14. [20] Schweizer, Anton 2015
15. [21] Agerer, Markus Sebastian (o.J.)

1.

Ostbevern fliegt um die Welt: Airbus A380 wird am 1. April am Flughafen FMO (Greven) getauft

Etwas Sorge bereitet den Verantwortlichen vor Ort noch der Weiterflug des Luftgiganten in Richtung Flughafen Niederrhein-Weeze. Mit nur 2.170 Metern Startbahnlänge könnte es am FMO bei voller Auslastung mit 526 geladenen VIP-Passagieren an Bord doch recht knapp werden. Falls die Bahn sich für den Start doch als zu kurz erweisen sollte, das entscheidet der Kapitän, müsste die A380 bis zur endgültigen Verlängerung der Startbahn auf 3.600 Meter auf einer Parkposition des Flughafens Münster Osnabrück stehen bleiben.

2.

FMO: Die Startbahn-Planung muss in die Verlängerung - Aussicht auf viele Interkontinentalflüge eher gering"

Münster. Die geplante Verlängerung der Startbahn des Flughafens Münster/Osnabrück ist zunächst gescheitert. Das Oberverwaltungsgericht in Münster hat den Planfeststellungsbeschluss aus dem Jahr 2004 in Teilen für rechtswidrig erklärt.

Zur Begründung des Urteils führte das Gericht an, dass durch die Verlängerung der Startbahn für Interkontinentalflüge von derzeit rund 2100 auf 3600 Metern ein Naturschutzgebiet erheblich beeinträchtigt werde. Nur die klare Aussicht auf viele Interkontinentalflüge hätte den Eingriff gerechtfertigt. Dann hätte der Flughafen nach OVG-Einschätzung nämlich zwingende öffentliche Interessen geltend machen können. Diese Wahrscheinlichkeit sei aber als gering anzusehen. Auch seien in Planungen mögliche Belastungen für die Bachlandschaft und die seltene Tierart Bachneunauge im angrenzenden Gebiet nicht hoch genug eingeschätzt worden.

Aussicht auf viele Interkontinentalflüge ist eher gering

Das Vorhaben könne deshalb nur zugelassen werden, wenn ein öffentliches Interesse die Naturschutzinteressen überwögen. Dies konnte der 20. Senat des OVG jedoch nicht feststellen: Nur die klare Aussicht auf viele Interkontinentalflüge hätte den Eingriff gerechtfertigt.

3.

Münster/Osnabrück darf Startbahn nicht verlängern

Das Oberverwaltungsgericht Münster hat wegen Mängeln im Planfeststellungsbeschluss eine von der NRW-Landesregierung genehmigte Startbahnverlängerung in Münster/Osnabrück gestoppt.

Der 20. Senat des Oberverwaltungsgerichts habe mit am 31. Mai 2011 verkündeten Urteil der Klage des Naturschutzbundes Deutschland (NABU) gegen den Planfeststellungsbeschluss des nordrhein-westfälischen Verkehrsministeriums vom 28. Dezember 2004, mit dem die Verlängerung der Start- und Landebahn des internationalen Verkehrsflughafens Münster/Osnabrück (FMO) von 2.170 m auf 3.600 m zugelassen worden sei, weitgehend stattgegeben, teilte das OLG Münster mit.

Der Planfeststellungsbeschluss sei aufgrund von Mängeln rechtswidrig und dürfe nicht vollzogen werden. Eine Verlängerung der Start- und Landebahn komme damit vorerst nicht in Betracht. Allerdings sei die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, die Mängel des Planfeststellungsbeschlusses in einem sogenannten ergänzenden Verfahren auszuräumen.

Das Oberverwaltungsgericht habe die Revision zum Bundesverwaltungsgericht nicht zugelassen. Dagegen sei eine Beschwerde möglich, über die das Bundesverwaltungsgericht entscheide.

4.

Flughafen und NABU: 3000 Meter kommen / Bach wird

verlegt

Der Streit um die Startbahn-Verlängerung am Flughafen Münster/Osnabrück (FMO) ist beigelegt. Die Naturschützer des Nabu und der Flughafen in Greven

haben sich endgültig darauf geeinigt, dass die Piste von 2200 auf 3000 Meter verlängert werden darf 600 Meter weniger als ursprünglich geplant. Mit dieser Entscheidung sei die wichtigste Hürde genommen, teilten FMO und Nabu gestern mit.

Bis Mitte 2012 können wir die noch ausstehenden Fragen klären, sagte Nabu-Landeschef Tumbrinck. Der Konflikt zwischen beiden Parteien dauerte 17 Jahre.

Ausschlaggebend für die Einigung war letztlich, dass der unter Schutz stehende Eltingmühlenbach um die verlängerte Startbahn herum verlegt werden kann. In den nächsten Monaten wollen FMO und Nabu klären, wie das im Detail zu realisieren ist.

5.

Detailansicht UL-Flugplatz

Start- und Landebahn

Länge 2170 x 45 m

Belag Asphalt

Richtung 07 / 25

6.

Rückblick - Monats- und Jahreswerte

Rückblick » Monats- und Jahreswerte Deutschland » Münster / Osnabrück

Monatswerte

Monat	Mitteltemperatur	Abweichung
2014/12	4,2	+1,3
2014/11	7,9	+1,9
2014/10	13	+2,8
2014/09	15,7	+1,5
2014/08	16,2	-1,6
2014/07	20	+1,6
2014/06	16	-0,1
2014/05	13	-0,6
2014/04	12,1	+2,8
2014/03	8,2	+2,5
2014/02	6,2	+3,6
2014/01	4,5	+2,2

7.

Luftdruck Münster/Osnabrück

Zeitraum: 20.12.2014 bis 31.12.2014

Maximaler Luftdruck: 1036,8

Minimaler Luftdruck: 1001,5

8.

Airbus A380

A380 Verkehrsflugzeug

Die Airbus A380 ist ein vierstrahliges Langstrecken Großraum-Verkehrsflugzeug mit zwei durchgängigen Passagierdecks für maximal 853 Passagiere des europäischen Herstellers Airbus.

Besatzung 2

Passagiere 525, max. 853

Antriebsart 4 Turbofan Triebwerke

Triebwerkstyp Rolls-Royce / Engine Alliance Trent 900 / GP7200
Leistung je TW 311 kN; 69916 lbf

Geschwindigkeit 945 km/h; 510 kts; 587 mph
Mmo (max. Mach) Mach 0.89
Dienstgipfelhöhe 13.106 m; 43.000 ft
Reichweite 15.199 km; 8.207 NM; 9.444 mi.

Leergewicht 276.800 kg; 610.239 lbs
max. Startmasse 569.000 kg; 1.254.429 lbs
max. Landegewicht 391.000 kg; 862.006 lbs

Spannweite 79,80 m; 261,8 ft
Tragflügelfläche 845,0 m²; 9096 ft²
Länge 73,00 m; 239,5 ft
Höhe 24,10 m; 79,1 ft

Erstflug 27.04.2005
Produktionsstatus in Produktion

ICAO Code A388
IATA Code 380
FAA TCDS A58NM
EASA TCDS A.110
Daten für (Version) Airbus A380-800

Bemerkungen:

Die A380 das zurzeit (2010) größte Verkehrsflugzeug der Welt.

9.

Airbus A380

Das Fahrwerk besteht aus einem Bugfahrwerk, zwei Rumpffahr-

werken und zwei Tragflächenfahrwerken. Zudem enthält es die Bremsanlage und die Lenkanlage sowie eine Anlage zur Überwachung von Reifendruck, Bremsentemperatur und Druck der Federbeine. Ursprünglich gab es 38 Alternativen in verschiedenen Konfigurationen. Airbus entschloss sich zur jetzigen Anordnung mit sogenannten Longitudinal Bays (Rumpf- und Tragflächenfahrwerk sind in einem Fahrwerkschacht untergebracht). Des Weiteren musste der Betrieb auf einer 45 m breiten Landebahn und 23 m breiten Rollwegen sowie eine 180°-Wende auf einer 60 m breiten Landebahn ermöglicht werden. Die Fahrwerksanlage hat insgesamt 22 Räder. Davon entfallen zwei Räder auf das Bugfahrwerk mit 1,20 m Durchmesser und einer Breite von 0,50 m, zwölf Räder auf das Rumpffahrwerk und acht Räder auf die Tragflächenfahrwerke. Diese haben jeweils einen Durchmesser von 1,40 m und eine Breite von etwa 0,50 m.

10.

Engine Alliances GP7200 Engines Exceed Performance Expectations During Initial Testing

July 19, 2004

FARNBOROUGH July 19, 2004 The Engine Alliances GP7200 engine, the best-selling engine on the Airbus A380, is exceeding performance expectations for specific fuel consumption and exhaust gas temperature margin during initial ground testing.

The first GP7200 engine completed ground testing in April at Pratt & Whitneys test facility in East Hartford, Connecticut. This engine reached 88,000 pounds (391 kN) thrust, exceeding the 70,000 pounds (311 kN) thrust required for entry into service. Altitude testing on this engine is currently underway at the U.S. Air Force Arnold Engineering Development Center in Tullahoma, Tennessee, to evaluate the engines low-pressure compressor performance and operability.

11.

Trent 900

The Trent 900 is the engine of choice for the Airbus A380, with two thirds of operators selecting the engine. It delivers the lowest lifetime fuel burn and has excellent environmental attributes. The Trent 900 will continue to deliver customer benefits as it is part of a living engine family.

The Trent 900 fleet now comprises over 300 engines, with 67 aircraft in service and had accumulated over 3.2 million hours by March 2014.

The Trent 900 demonstrates the result of the environment being the driving force behind its design. It satisfied all its key requirements: fuel burn, noise, emissions, weight and power. The Trent 900 powered A380 is quiet, meeting the QC0.5 level for Arrivals and QC2 for departures.

As the fourth generation of the Trent family of engines, the Trent 900 benefits from our ability to feed back low-risk new technology from future generations. Rolls-Royce has a demonstrated commitment to continuous improvement, having already delivered a fuel burn improvement package for the Trent 900 during 2012. The next enhancement, EP2, is the current build standard, providing fuel burn up to 1.8% better than the EIS engine.

The excellent environmental attributes of the engine are evident as it has the greatest cumulative margin to ICAO emission standards of any engine for the A380. The engine has the lowest NOx emissions for the A380, NOx is currently the only regulated emission subject to specific airport charging.

The Trent 900 is certified at 70k, 72k, 77k and 80k pounds of thrust. It is the only engine certified at both 70k and 72k for the Airbus A380. The higher two ratings demonstrate the growth capability embedded in the engine, should further aircraft development be required.

12.

Rollwiderstand

Pkw Reibung zwischen Rollwiderstandsbeiwert

Wälzlager 0,001

Stahlrad und Schiene $< 0,002$

Luftreifen und Asphalt 0,013-0,015

Luftreifen und Beton 0,013-0,015

Luftreifen und Pflaster 0,015

Luftreifen und Schotter 0,02

Luftreifen und Erde 0,05

13.

Wie bremst ein Verkehrsflugzeug nach der Landung?

Spoiler, Reverser, Bremsen

Sobald die Räder Bodenkontakt haben, werden automatisch die Spoiler ausgefahren. Das sind Klappen an der Flügeloberseite, die aufgestellt werden (siehe Bild oben). Dadurch wird sofort der Auftrieb vernichtet und gleichzeitig der Luftwiderstand erheblich erhöht.

Die Spoiler sind das wichtigste Hilfsmittel beim Bremsen. Wenn die Spoiler nicht ausgefahren, hat das Flugzeug nicht genug Bodenkontakt um die Radbremsen effektiv einsetzen zu können.

Bei der Landung setzt zuerst das Hauptfahrwerk auf und erst danach das Bugfahrwerk. Sobald das Bugfahrwerk aufgesetzt hat, oder kurz davor, werden die Reverser aktiviert.

Reverser sind Vorrichtungen an den Triebwerken, die den Schub nach vorne umleiten. Durch diesen Gegenschub wird das Flugzeug ebenfalls abgebremst. Pistenlänge und Flugzeuge sind so ausgelegt, dass auch ohne Reverser bei jeder Witterung sicher rechtzeitig angehalten werden kann. Die Reverser werden im Normalfall zur Schonung der Radbremsen eingesetzt, denn diese werden bei starkem Bremsen sehr heiss und müssen dann lange

abgekühlt werden, bevor das Flugzeug erneut starten darf.

Alle modernen Verkehrsflugzeuge haben automatische Bremsysteme (Autobrake System). Wie beim Auto haben diese auch ein Antiblockiersystem (ABS), das ein Rutschen der Reifen auf nasser Piste verhindern soll. Bei Verwendung des Autobrake-Systems mit niedrigster Einstellung (LO) werden die Radbremsen erst in der letzten Phase des Abbremsens aktiv, typischerweise bei Geschwindigkeiten unter 100 Knoten. Bei höheren Bremsereinstellungen (MED) aktivieren sich die Bremsen früher, weil die Verzögerung der aerodynamischen Hilfen alleine unter Umständen nicht die gewünschten Werte erreicht. Dies können dann die Passagiere an einem leichten Ruck nach dem Aufsetzen spüren. Die Piloten stellen vor der Landung eine bestimmte Stufe der Bremsverzögerung ein (bei Airbus A320 z.B. LO = $1,7 \text{ m/s}^2 = 0,17 \text{ g}$ oder Medium (MED) = $3 \text{ m/s}^2 = 0,3 \text{ g}$ [1]; 1 g entspricht der Erdbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$). Das System regelt die Bremskraft so, dass die eingestellte Verzögerung eingehalten wird. Die dafür notwendige Bremskraft ist vom Gewicht des Flugzeugs abhängig. Je schwerer das Flugzeug ist, umso mehr Bremskraft muss aufgewendet werden und umso heißer werden die Bremsen.

14.

Luftdichte

Luftdichte in Abhängigkeit der Temperatur und des Luftdrucks

Mit steigender Temperatur nimmt die Dichte der Luft ab.

ρ = Luftdichte (kg/m^3)

p_a = Luftdruck (Pa) - Normzustand 101300 Pa R_i = Gaskonstante - Luft 287 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

T = Temperatur = $273 + t$ (K)

t = Bezugstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

$$\rho = \frac{p_a}{R_i * T}$$

15.

Rollwiderstand / Rollreibung berechnen

Räder werden verwendet, um bei der Fortbewegung geringere Widerstände in Form von Reibung zu haben. Doch auch bei einem Rad existieren Widerstände. Sie werden als Rollwiderstand oder auch Rollreibung bezeichnet.

In diesem Tutorial soll gezeigt wie man den Rollwiderstand bzw. die Rollreibung berechnen kann. Rollwiderstand Rollwiderstandskoeffizient

Als Rollwiderstand oder auch Rollreibung wird die Kraft bezeichnet, die beim Abrollen eines Rades entsteht und entgegen der Bewegung gerichtet ist. Da die Rollreibung näherungsweise proportional zur Normalkraft ist, kann man einen Kennwert definieren, der als Rollwiderstandskoeffizient c_R bezeichnet wird (oft auch Rollwiderstandsbeiwert oder Rollreibungsbeiwert usw.).

Die Berechnung der Rollreibung erfolgt analog zur normalen Reibung mit folgender Formel:

$$F_R = c_r * F_N$$

F_R Rollwiderstand c_R Rollwiderstandskoeffizient F_N Normalkraft (i.d.R. die Gewichtskraft)

Dabei sind die typischen Werte für den Rollwiderstandskoeffizienten deutlich geringer als bei der Gleitreibung. Hier wird der große Vorteil von Rädern, Wälzkörpern (Kugellager) und ähnlichem ersichtlich.

Der Rollwiderstandskoeffizient c_R ist Abhängig von der Materialpaarung, aber auch von der Geometrie des Rollkörpers.

10 Anhang

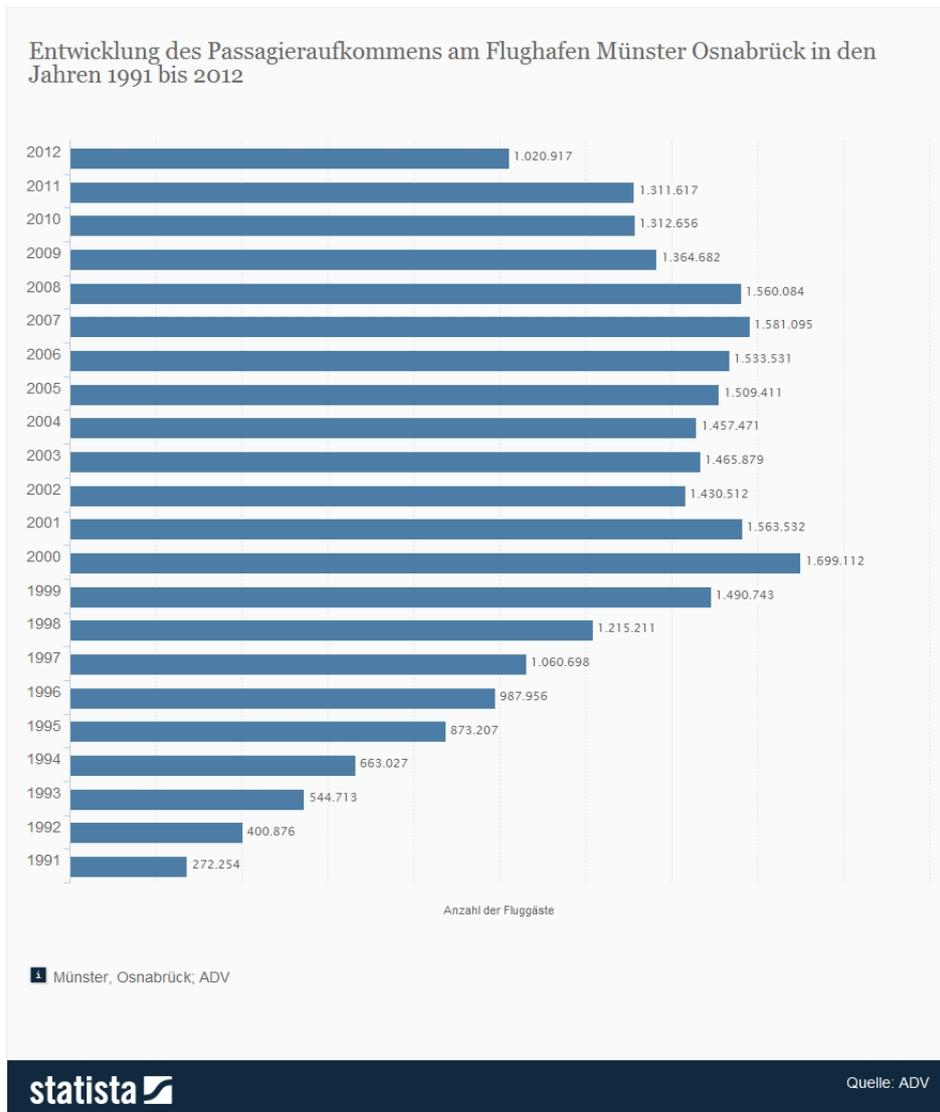


Abbildung 1: Entwicklung des Passagieraufkommens am Flughafen Münster/Osnabrück in den Jahren 1991 bis 2012



Abbildung 2: Planung Startbahnverlängerung

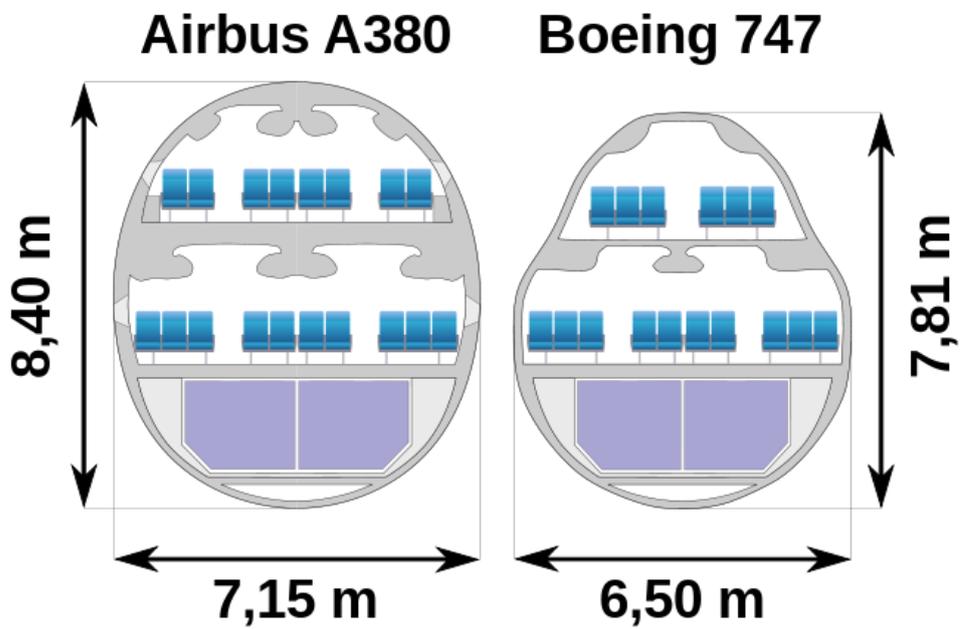


Abbildung 3: Rumpfquerschnitt des Airbus 380 und der Boing 747

Basisdaten A380 :		
Masse	mv	569.000,0 kg
Leermasse inkl. 125t Treibstoff	ml	401.800,0 kg
Gewichtskraft voll	Fg max	5.581.889 N
Gewichtskraft leer+125t	Fg min	3.941.658 N
Zeitintervall	Δt	0,1 s
zurückgelegte Strecke	s	m
Luftdichte	ρ	1,3 kg/m ³
Querschnittsfläche Rumpf	Ar	47,1 m ²
Schubkraft	Fs	1.244.000,0 N
Auftriebskraft	Fa	N
Auftriebsfläche, ausgefahrene Landeklappen	At	1.098,5 m ²
Auftriebsbeiwert	ca	0,65
Luftwiderstand	Fl	N
Widerstandsbeiwert	cw	0,20
Rollwiderstand	Fr	N
Rollreibungszahl	μ_r	0,02
Bremsverzögerung	aB	1,7 m/s ²

Abbildung 4: Übersicht der Basisdaten für die Berechnung der benötigten Startbahnlänge eines A380

Berechnung der Startstrecke: A380 voll beladen mit konstantem Rollwiderstand

mit F_r konstant, F_l steigend, TOW 569t

A380 hebt bei folgender Geschwindigkeit ab: [m/s]	394 km/h	109,6 m/s
A380 hebt ab nach einer Startstrecke von : [m]		3.125 m
A380 hebt ab nach einer Zeit von: [s]		56 s

Zeit t in s	Geschw. v in km/h	Geschwindigkeit v in m/s	Startstrecke s in m	Luftwiderstand Fl in N	Auftriebskraft Fa in N	Beschleunigung a in m/s ²
		$v = t \times a$ $v(\Delta t) = v(\Delta t - 1) + \Delta t \times a(\Delta t)$	$s = t \times v$ $s(\Delta t) = s(\Delta t - 1) + \Delta t \times v(\Delta t)$	$F_{l(\Delta t)} = 0,5 \times \rho \times A_r \times c_w \times v(\Delta t)^2$	$F_{a(\Delta t)} = 0,5 \times p \times A_t \times c_a \times v^2$	$a_{(\Delta t)} = (F_s - F_{l(\Delta t)} - F_{r(\Delta t)}) / m$
0	0	0	0	0	0,00	0,00
0,1	1	0,199009174	0,019900917		0,24	18,38
0,2	1	0,398018305	0,059702748		0,97	73,52
0,3	2	0,597027309	0,119405479		2,18	165,43
0,4	3	0,796036099	0,199009089		3,88	294,10
0,5	4	0,995044591	0,298513548		6,06	459,53
0,6	4	1,1940527	0,417918818		8,73	661,72
0,7	5	1,39306034	0,557224852		11,88	900,67
0,8	6	1,592067425	0,716431594		15,52	1.176,39
0,9	6	1,791073872	0,895538982		19,64	1.488,86
1	7	1,990079594	1,094546941		24,25	1.838,09
1,1	8	2,189084506	1,313455392		29,34	2.224,09
...						
55,6	390	108,276423	3048,222309	76.695,67	5.441.198,56	1,86393229
55,7	390	108,4628162	3059,068591	76.977,10	5.459.948,27	1,86349756
55,8	391	108,649166	3069,933507	77.258,97	5.478.725,84	1,86306218
55,9	392	108,8354722	3080,817054	77.541,30	5.497.531,24	1,86262616
56	392	109,0217348	3091,719228	77.824,06	5.516.364,46	1,86218949
56,1	393	109,2079538	3102,640023	78.107,28	5.535.225,45	1,86175218
56,2	394	109,394129	3113,579436	78.390,94	5.554.114,18	1,86131423
56,3	394	109,5802604	3124,537462	78.675,04	5.573.030,64	1,86087563
56,8	398	110,5887104		80.102,23	5.676.078,10	2,05468638
56,9	399	110,7941791		80.388,99	5.697.189,46	2,05419689
57	400	110,9995988		80.676,20	5.718.334,97	2,05370661
57,1	400	111,2049694		80.963,84	5.739.514,59	2,05321554
57,2	401	111,410291		81.251,93	5.760.728,29	2,05272368

Abbildung 5: Maximal beladener A380 mit konstantem Rollwiderstand

Berechnung der Startstrecke: A380 voll beladen mit reduzierendem Rollwiderstand

mit $F_r \text{ dyn.} = F_g - F_a, F_l$ steigend, TOW 569t

A380 hebt bei folgender Geschwindigkeit ab: [m/s]	396 km/h	109,9 m/s	0,3%
A380 hebt ab nach einer Startstrecke von : [m]		2.988 m	-4,4%
A380 hebt ab nach einer Zeit von: [s]	Δt in s = 0,1	55 s	-3,2%

Zeit t in s	Geschwindigkeit v in m/s	Startstrecke s in m	Luftwiderstand Fl in N	Auftriebskraft Fa in N	Rollwiderstand Fr in N	Beschleunigung a in m/s ²
	$v = t \times a$ $v(\Delta t) = v(\Delta t - 1) + \Delta t \times a(\Delta t)$	$s = t \times v$ $s(\Delta t) = s(\Delta t - 1) + \Delta t \times v(\Delta t)$	$F_{l(a)} = 0,5 \times \rho \times A_r \times c_w \times v(\Delta t)^2$	$F_{a(a)} = 0,5 \times \rho \times A_t \times c_a \times v^2$	$F_{r(a)} = \mu_r \times (F_g - F_a)$	$a_{(a)} = (F_s - F_{l(a)} - F_{r(a)}) / m$
0	0	0,0	0,0	0	111.637,8	1,99009174
0,1	0,199009174	0,0	0,0	0	111.637,4	1,99009196
0,2	0,39801837	0,1	0,1	1	111.636,3	1,99009262
0,3	0,597027632	0,1	0,1	2	111.634,5	1,990093719
0,4	0,796037004	0,2	0,2	4	111.631,9	1,990095258
0,5	0,99504653	0,3	0,3	6	111.628,6	1,990097237
0,6	1,194056253	0,4	0,4	9	111.624,6	1,990099656
0,7	1,393066219	0,6	0,6	12	111.619,8	1,990102515
0,8	1,592076471	0,7	0,7	16	111.614,3	1,990105814
0,9	1,791087052	0,9	0,9	20	111.608,0	1,990109552
1	1,990098007	1,1	1,1	24	111.601,0	1,99011373
1,1	2,18910938	1,3	1,3	29	111.593,3	1,990118348
...						
53,9	108,4253818	2.911,8	71982	5.456.180,1	2.514,2	2,055366301
54	108,6309184	2.922,6	72256	5.476.885,7	2.100,1	2,055614011
54,1	108,8364798	2.933,5	72529	5.497.633,0	1.685,1	2,05586222
54,2	109,0420661	2.944,4	72804	5.518.422,1	1.269,4	2,056110928
54,3	109,2476772	2.955,4	73078	5.539.253,0	852,7	2,056360136
54,4	109,4533132	2.966,3	73354	5.560.125,6	435,3	2,056609844
54,5	109,6589742	2.977,3	73630	5.581.040,0	17,0	2,056860052
54,6	109,8646602	2.988,3	73906	5.601.996,2	0,0	2,05640404
54,7	110,0703006		74183	5.622.987,0	0,0	2,055917347
54,8	110,2758923		74460	5.644.012,1	0,0	2,05542986
54,9	110,4814353		74738	5.665.071,4	0,0	2,054941579
55	110,6869294		75017	5.686.165,0	0,0	2,054452505
55,1	110,8923747		75295	5.707.292,6	0,0	2,053962639

Abbildung 6: Maximal beladener A380 mit reduzierendem Rollwiderstand

Berechnung der Startstrecke: A380 leer mit 125t Treibstoff mit reduzierendem Rollwiderstand

mit $F_r \text{ dyn.} = F_g - F_a$, F_l steigend, TOW 401t

A380 hebt bei folgender Geschwindigkeit ab: [m/s]	331 km/h	92,0 m/s	-16,2%
A380 hebt ab nach einer Startstrecke von : [m]		1.458 m	-51,2%
A380 hebt ab nach einer Zeit von: [s]		32 s	-42,2%

Zeit t in s	Geschwindigkeit v in m/s	Startstrecke s in m	Luftwiderstand F _l in N	Auftriebskraft F _a in N	Rollwiderstand F _r in N	Beschleunigung a in m/s ²
	$v = t \times a$ $v(\Delta t) = v(\Delta t - 1) + \Delta t \times a(\Delta t)$	$s = t \times v$ $s(\Delta t) = s(\Delta t - 1) + \Delta t \times v(\Delta t)$	$F_{l(\Delta t)} = 0,5 \times \rho \times A_r \times c_w \times v(\Delta t)^2$	$F_{a(\Delta t)} = 0,5 \times \rho \times A_t \times c_a \times v^2$	$F_{r(\Delta t)} = \mu_r \times (F_g - F_a)$	$a_{(\Delta t)} = (F_s - F_{l(\Delta t)} - F_{r(\Delta t)}) / m$
0	0	0	0,0	0,0	78.833,2	2,89986770
0,1	0,28998677	0,028998677	0,5	39,0	78.832,4	2,89986836
0,2	0,579973605	0,086996037	2,1	156,1	78.830,0	2,89987034
0,3	0,869960639	0,173992101	4,6	351,3	78.826,1	2,89987365
0,4	1,159948004	0,289986902	8,2	624,5	78.820,7	2,89987827
0,5	1,449935831	0,434980485	12,9	975,7	78.813,6	2,89988423
0,6	1,739924254	0,60897291	18,5	1.405,0	78.805,1	2,89989150
0,7	2,029913404	0,811964251	25,2	1.912,4	78.794,9	2,89990009
0,8	2,319903413	1,043954592	33,0	2.497,9	78.783,2	2,89991001
0,9	2,609894415	1,304944033	41,7	3.161,4	78.769,9	2,89992125
1	2,89988654	1,594932687	51,5	3.902,9	78.755,1	2,89993382
1,1	3,189879922	1,91392068	62,3	4.722,5	78.738,7	2,89994770
...						
30,9	90,2586624	1393,944071	49.881,8	3.780.981,6	3.213,5	2,96392404
31	90,5550548	1402,999577	50.209,9	3.805.854,4	2.716,1	2,96434543
31,1	90,85148935	1412,084726	50.539,2	3.830.812,3	2.216,9	2,96476826
31,2	91,14796617	1421,199522	50.869,6	3.855.855,4	1.716,1	2,96519253
31,3	91,44448542	1430,343971	51.201,1	3.880.983,7	1.213,5	2,96561825
31,4	91,74104725	1439,518076	51.533,7	3.906.197,2	709,2	2,96604541
31,5	92,03765179	1448,721841	51.867,5	3.931.496,0	203,2	2,96647401
31,6	92,33429919	1457,955271	52.202,4	3.956.880,1	0,0	2,96614637
31,7	92,63091383		52.538,3	3.982.343,1	0,0	2,96531031
31,8	92,92744486		52.875,2	4.007.880,5	0,0	2,96447181
31,9	93,22389204		53.213,1	4.033.492,3	0,0	2,96363086
32	93,52025513		53.552,0	4.059.178,4	0,0	2,96278748
32,1	93,81653387		53.891,8	4.084.938,7	0,0	2,96194166

Abbildung 7: Unbeladener A380 inklusive 125t Treibstoff mit reduzierendem Rollwiderstand

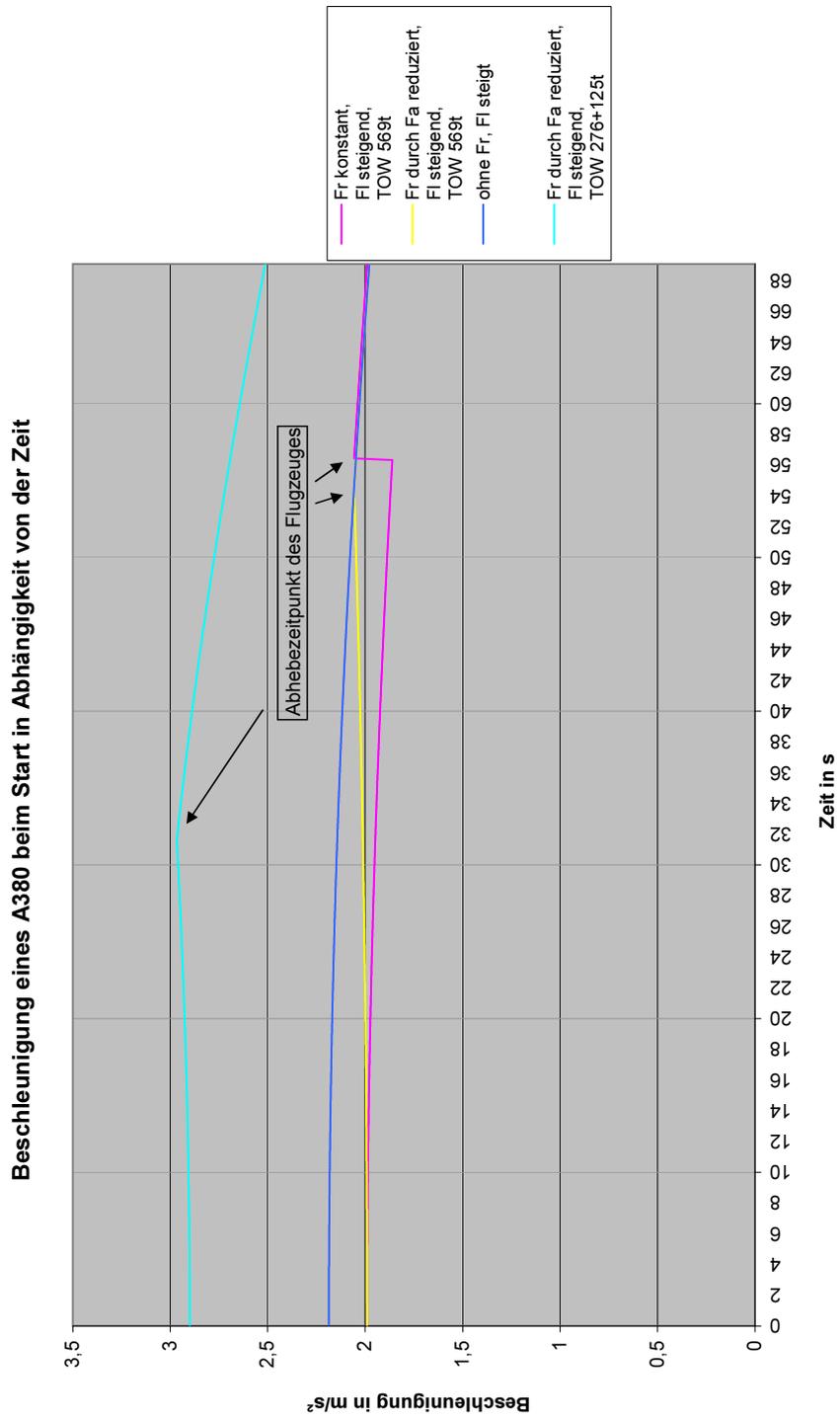


Abbildung 8: Beschleunigung eines A380 beim Start in Abhängigkeit zur Zeit

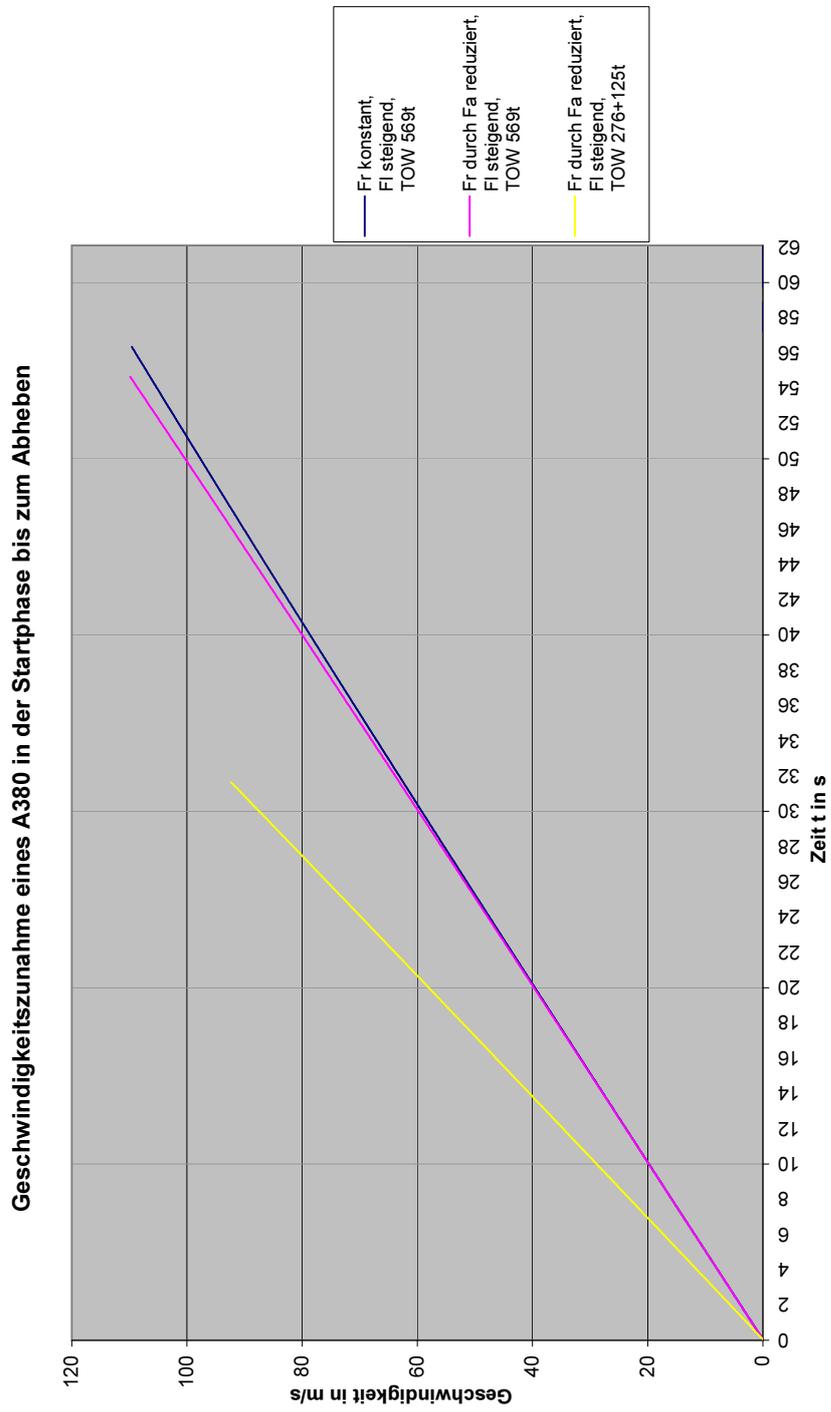


Abbildung 9: Geschwindigkeitszunahme eines A380 in der Startphase bis zum Abheben

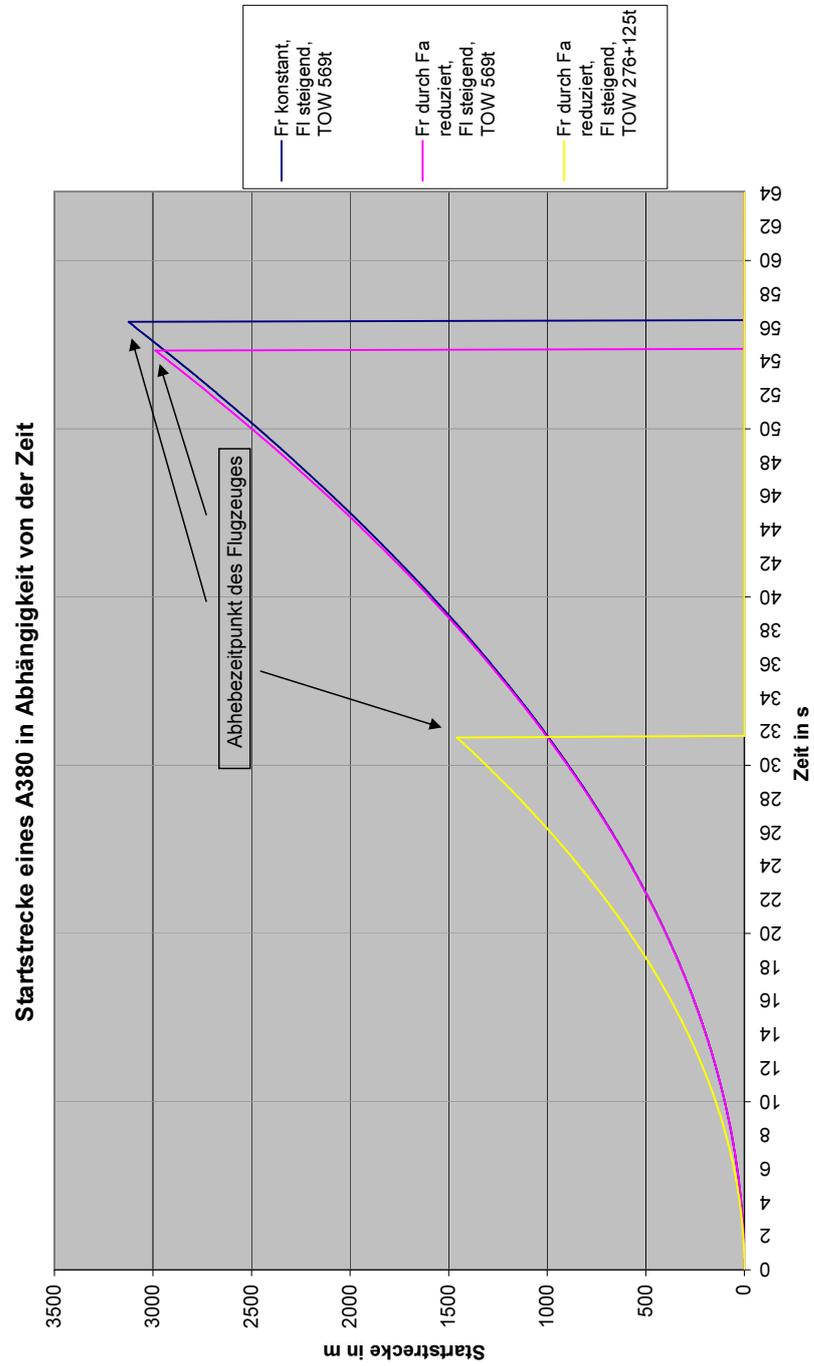


Abbildung 10: Startstrecke eines A380 in Abhängigkeit zur Zeit

Berechnung der Startstrecke: A380 voll beladen mit reduzierendem Rollwiderstand

mit $F_r \text{ dyn.} = F_g - F_a$, F_l steigend, TOW 569t

A380 hebt bei folgender Geschwindigkeit ab: [m/s]		395 km/h		109,7 m/s			
A380 hebt ab nach einer Startstrecke von : [m]				2.973 m			
A380 hebt ab nach einer Zeit von: [s]		$\Delta t \text{ in s} = 0,01$		55 s			
Zeit in s	Geschwindigkeit v in m/s	Startstrecke s in m	Luftwiderstand F_l in N	Auftriebskraft F_a in N	Rollwiderstand F_r in N	Beschleunigung a in m/s^2	
	$v = t \times a$ $v(\Delta t) = v(\Delta t-1) + \Delta t \times a(\Delta t)$	$s = t \times v$ $s(\Delta t) = s(\Delta t-1) + \Delta t \times v(\Delta t)$	$F_{l(\Delta t)} = 0,5 \times \rho \times A_r \times c_w \times v(\Delta t)^2$	$F_{a(\Delta t)} = 0,5 \times \rho \times A_t \times c_a \times v^2$	$F_{r(\Delta t)} = \mu_r \times (F_g - F_a)$	$a_{(\Delta t)} = (F_s - F_{l(\Delta t)} - F_{r(\Delta t)}) / m$	
0	0	0,0	0,0	0	0,0	111.637,8	1,99009174
0,01	0,019900917	0,0	0,0	0	0,2	111.637,8	1,990091742
0,02	0,039801835	0,0	0,0	0	0,7	111.637,8	1,990091749
0,03	0,059702752	0,0	0,0	0	1,7	111.637,8	1,99009176
0,04	0,07960367	0,0	0,0	0	2,9	111.637,7	1,990091775
0,05	0,099504588	0,0	0,0	0	4,6	111.637,7	1,990091795
0,06	0,119405506	0,0	0,0	0	6,6	111.637,7	1,990091819
0,07	0,139306424	0,0	0,0	0	9,0	111.637,6	1,990091848
0,08	0,159207342	0,0	0,0	0	11,8	111.637,6	1,990091881
0,09	0,179108261	0,0	0,0	0	14,9	111.637,5	1,990091918
0,10	0,19900918	0,0	0,0	0	18,4	111.637,4	1,99009196
0,11	0,2189101	0,0	0,0	0	22,2	111.637,4	1,990092006
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:
54,44	109,5386199	2.965,8	73468	5.568.795,9	261,9	2,056713571	
54,45	109,559187	2.966,9	73496	5.570.887,3	220,1	2,056738592	
54,46	109,5797544	2.968,0	73523	5.572.979,2	178,2	2,056763617	
54,47	109,600322	2.969,1	73551	5.575.071,4	136,4	2,056788647	
54,48	109,620899	2.970,2	73578	5.577.164,1	94,5	2,056813683	
54,49	109,6414581	2.971,3	73606	5.579.257,2	52,7	2,056838723	
54,50	109,6620265	2.972,4	73634	5.581.350,7	10,8	2,056863769	
54,51	109,6825951	2.973,5	73661	5.583.444,6	0,0	2,056834177	
54,52	109,7031634		73689	5.585.538,9	0,0	2,056785619	
54,53	109,7237313		73717	5.587.633,5	0,0	2,056737053	
54,54	109,7442987		73744	5.589.728,4	0,0	2,056688479	
54,55	109,7648655		73772	5.591.823,7	0,0	2,056639898	
54,56	109,7854319		73800	5.593.919,4	0,0	2,056591308	

Abbildung 11: Maximal beladener A380 mit sich reduzierendem Rollwiderstand und $\Delta t = 0,01$

Berechnung der Bremswege und der letztmöglichen Zeitpunkte zum Startabbruch (ohne Schubumkehr, ohne Bremsklappen): Bremsweg für voll beladenen A380											
Ausgangsgeschw.:	109,9 m/s	101,19 m/s	86,1 m/s								
Bremsweg:	3.545 m	3.000 m	2.170 m								
aB=	-1,7										
Bremsverzögerte Bewegung:	ab Abkühlbeginn bei take-off speed 395km/h, TOW 569t	Bremsverzögerung ab Abkühlgeschwindigkeit; Stillstand nach 3534 m	Bremsweg 3000 m	Bremsweg 2170 m	Vmax-Startabbruch t-Bremsbeginn	46,5 m/s 23,3 s	Vmax-Startabbruch t-Bremsbeginn	54,6 m/s 27,4 s	Geschwindigkeitszunahme in der Reaktionszeit; ca. 2 sec. (für Bremsweg 2170m)	Geschwindigkeitszunahme in der Reaktionszeit; ca. 2 sec. (für Bremsweg 3000m)	Zeit in s
v _{max} x Δt	109,86	101,2 m/s	86,1 m/s	0,0 m	v _{max} x Δt	21,3 s	v _{max} x Δt	25,4 s			
S _b = v x Δt	0,0 m	101,02	10,102466	0,0 m	S _b = v x Δt	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0
	109,69	100,85	20,187932	85,89	8,58946602	0,2 m/s	0,0 m/s	0,2 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,1
	109,52	100,85	20,187932	85,72	17,161932	0,4 m/s	0,0 m/s	0,4 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,2
	109,35	100,68	30,256398	85,55	25,717398	0,6 m/s	0,0 m/s	0,6 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,3
101,53	517,51	92,86	475,028835	77,73	400,891835	9,8 m/s	0,0 m/s	9,8 m/s	0,0 m/s	4,9	
101,36	527,65	92,69	484,298301	77,56	408,648301	10,0 m/s	0,0 m/s	10,0 m/s	0,0 m/s	5	
101,19	537,77	92,52	493,550767	77,39	416,387767	10,2 m/s	0,0 m/s	10,2 m/s	0,0 m/s	5,1	
101,02	547,87	92,35	502,786233	77,22	424,110233	10,3 m/s	0,0 m/s	10,3 m/s	0,0 m/s	5,2	
100,85	557,96	92,18	512,004699	77,05	431,815699	10,5 m/s	0,0 m/s	10,5 m/s	0,0 m/s	5,3	
86,40	1.353,09	77,73	1233,43931	62,60	1024,64531	27,5 m/s	0,0 m/s	27,5 m/s	0,0 m/s	13,8	
86,23	1.361,71	77,56	1241,19578	62,43	1030,88878	27,7 m/s	0,0 m/s	27,7 m/s	0,0 m/s	13,9	
86,06	1.370,32	77,39	1248,93524	62,26	1037,11524	27,9 m/s	0,0 m/s	27,9 m/s	0,0 m/s	14	
85,89	1.378,90	77,22	1256,65771	62,09	1043,32471	28,1 m/s	0,0 m/s	28,1 m/s	0,0 m/s	14,1	
85,72	1.387,48	77,05	1264,36317	61,92	1049,51717	28,3 m/s	0,0 m/s	28,3 m/s	0,0 m/s	14,2	
73,99	1.937,92	65,32	1754,98533	50,19	1435,74233	42,1 m/s	0,0 m/s	42,1 m/s	0,0 m/s	21,1	
73,82	1.945,30	65,15	1761,5008	50,02	1440,7448	42,3 m/s	0,0 m/s	42,3 m/s	0,0 m/s	21,2	
73,65	1.952,67	64,98	1767,99926	49,85	1445,73026	42,5 m/s	42,5 m/s	42,5 m/s	0,0 m/s	21,3	
73,48	1.960,02	64,81	1774,48073	49,68	1450,69873	42,7 m/s	42,7 m/s	42,7 m/s	0,0 m/s	21,4	
73,31	1.967,35	64,64	1780,94519	49,51	1455,65019	42,9 m/s	42,9 m/s	42,9 m/s	0,0 m/s	21,5	
70,59	2.082,34	61,92	1882,06465	46,79	1532,56165	46,1 m/s	46,1 m/s	46,1 m/s	0,0 m/s	23,1	
70,42	2.089,38	61,75	1888,24012	46,62	1537,22412	46,3 m/s	46,3 m/s	46,3 m/s	0,0 m/s	23,2	
70,25	2.096,41	61,58	1894,39858	46,45	1541,86958	46,5 m/s	46,5 m/s	46,5 m/s	0,0 m/s	23,3	
70,08	2.103,42	61,41	1900,54005	46,28	1546,49805	46,3 m/s	0,0 m/s	46,7 m/s	0,0 m/s	23,4	
69,91	2.110,41	61,24	1906,66451	46,11	1551,10951	46,1 m/s	0,0 m/s	46,9 m/s	0,0 m/s	23,5	
69,74	2.117,38	61,07	1912,77198	45,94	1555,70398	45,9 m/s	0,0 m/s	47,1 m/s	0,0 m/s	23,6	
67,19	2.219,96	58,52	2002,34397	43,39	1622,58097	43,4 m/s	0,0 m/s	50,1 m/s	0,0 m/s	25,1	
67,02	2.226,66	58,35	2008,17944	43,22	1626,90344	43,2 m/s	0,0 m/s	50,3 m/s	0,0 m/s	25,2	
66,85	2.233,35	58,18	2013,9979	43,05	1631,2089	43,1 m/s	0,0 m/s	50,5 m/s	50,5 m/s	25,3	
66,68	2.240,02	58,01	2019,79937	42,88	1635,49737	42,9 m/s	0,0 m/s	50,7 m/s	50,7 m/s	25,4	
66,51	2.246,67	57,84	2025,58383	42,71	1639,76883	42,7 m/s	0,0 m/s	50,9 m/s	50,9 m/s	25,5	
63,62	2.357,14	54,95	2121,31876	39,82	1709,78276	39,8 m/s	0,0 m/s	54,3 m/s	54,3 m/s	27,2	
63,45	2.363,49	54,78	2126,79722	39,65	1713,74822	39,7 m/s	0,0 m/s	54,5 m/s	54,5 m/s	27,3	
63,28	2.369,82	54,61	2132,25869	39,48	1717,69669	39,5 m/s	0,0 m/s	54,6 m/s	54,6 m/s	27,4	
63,11	2.376,13	54,44	2137,70315	39,31	1721,62815	39,3 m/s	0,0 m/s	54,4 m/s	0,0 m/s	27,5	
62,94	2.382,42	54,27	2143,13062	39,14	1725,54262	39,1 m/s	0,0 m/s	54,3 m/s	0,0 m/s	27,6	
62,77	2.388,70	54,10	2148,54109	38,97	1729,44009	39,0 m/s	0,0 m/s	54,1 m/s	0,0 m/s	27,7	
23,84	3.378,54	15,17	2939,8428	0,04	2174,2648	0,0 m/s	0,0 m/s	15,2 m/s	0,0 m/s	50,6	
23,67	3.380,91	15,00	2941,34327	0,00	2174,2648	0,0 m/s	0,0 m/s	15,0 m/s	0,0 m/s	50,7	
23,50	3.383,26	14,83	2942,82674	0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	14,8 m/s	0,0 m/s	50,8	
8,71	3.522,68	0,04	3006,81228	0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	59,5	
8,54	3.523,53	0,00	3006,81228	0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	59,6	
8,37	3.524,37	0,00		0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	59,7	
0,04	3.544,58	0,00		0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	64,6	
0,00	3.544,58	0,00		0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	64,7	
0,00		0,00		0,00		0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	64,8	

Abbildung 12: Berechnung des Bremsweges des maximal beladenen A380

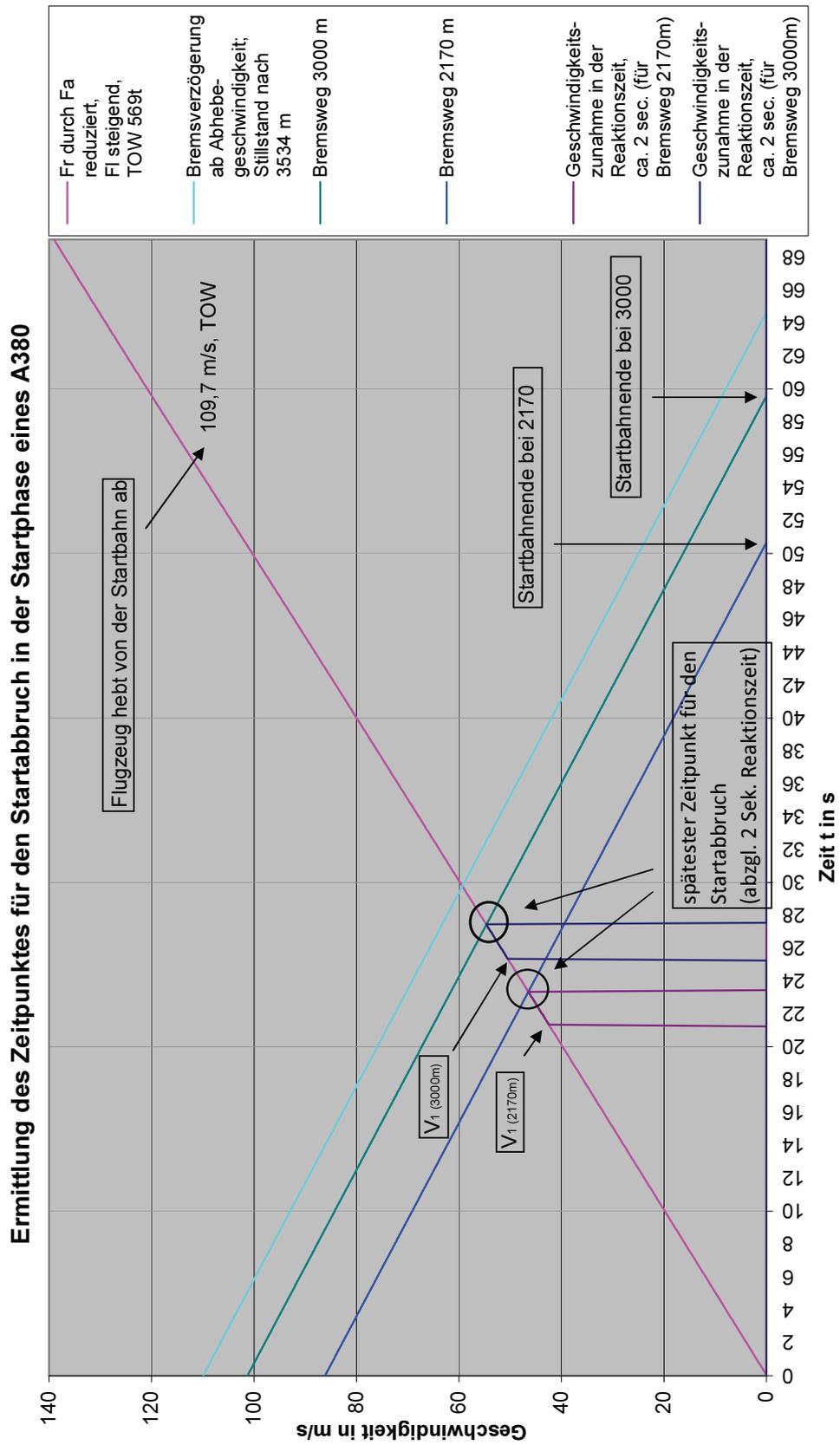


Abbildung 13: Bremswege des maximal beladenen A380

11 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, sowie alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind.

Ort, Datum

Unterschrift

04.05.2015

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'Langenhan'.