

Flugbetrieb auf hochgelegenen und heißen Flugplätzen

unter besonderer Berücksichtigung der Umstände des Frachtflugverkehrs



***Vortrag bei der
DGLR Bezirksgruppe Hamburg***

Claus Cordes

Dipl.-Ing. (Flugzeugbau), Flugkapitän

Vorwort

Der Flugverkehr auf hochgelegenen und heißen Flugplätzen bringt wegen der dort anzutreffenden geringen Luftdichte eine Reihe von operationellen Problemen mit sich, die sich bei hohen Flugzeugmassen, wie sie insbesondere beim Frachtflugverkehr auftreten, deutlich auswirken. Der Vortrag beschreibt diese Probleme, die die Flugleistungen und die anzuwendenden Verfahren betreffen, unter Berücksichtigung typischer Umstände und mit Bezug auf die persönlichen Erfahrungen des Verfassers in kurzer Form.

Das Anliegen des Vortrages ist, Ingenieuren und Studenten einschlägiger Fakultäten einen Einblick in den Alltagsbetrieb zu geben.

Der Autor ist Flugzeugbauingenieur (HAW Hamburg) und Flugkapitän auf MD 11-F mit einer Gesamtflugerfahrung von fast 20.000 Flugstunden, davon etwa 5.000 als Kapitän auf MD 11 und hat viele der erwähnten Flugplätze schon angefliegen.

Für Rückfragen, Anregungen und Kritik ist er unter der Email-Adresse

cordes.claus@t-online.de

zu erreichen.

Der Vortrag wurde am 08.01.2009 an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg gehalten.

Der Vortrag ist im Internet verfügbar:

<http://hamburg.dglr.de>

Inhalt

Einige hohe und heiÙe Flugplätze

Atmosphärische Parameter und Pistenlangen der Flugplätze

Auswirkungen der verminderten Luftdichte im Flugbetrieb

Typische Massen im Frachtflugbetrieb

Anlassen der Triebwerke

Auftriebsbeiwert und Mindestfluggeschwindigkeit

Startschub der Triebwerke

erforderliche Startstrecke

Startabbruchstrecke

Erhöhung des Auftriebsbeiwertes für den Start

Steigwinkel nach dem Abheben

Fortsetzung des Starts nach einem Triebwerksausfall

Einfluss der verminderten Abflugmasse auf das

Nutzlast – Reichweiten – Diagramm

Abflugstrecke und Kurvenradien

Anflugstrecke und Sinkrate

Endanflug und Landung

Landestrecke

Anflug mit technischen Problemen

Wirtschaftlichkeit: Maximale Startmasse als Funktion der Temperatur

Einleitung

Der Flugverkehr auf hochgelegenen und heißen Flugplätzen bringt wegen der dort anzutreffenden geringen Luftdichte eine Reihe von operationellen Problemen mit sich, die sich bei hohen Flugzeugmassen deutlich auswirken. Zunächst werden einige ausgewählte Flugplätze vorgestellt, die die Kriterien „hoch und heiß“ erfüllen, und die im Weltluftverkehr eine gewisse Bedeutung haben. Abseits der Hauptflugrouten gibt es noch einige weitere derartige Flugplätze, die hier aber nicht betrachtet werden sollen. Anschließend werden die relevanten Zusammenhänge von der Start- bis zur Landephase behandelt.

Einige hohe und heiße Flugplätze

Die Karte in Bild 1 zeigt einige hochgelegene und heiße Flugplätze. Heiß ist in diesem Zusammenhang allerdings ein relativer Begriff, der sich auf die durchschnittlichen oder erreichten Höchsttemperaturen in Relation zur Temperatur, die in der jeweiligen Höhe in der Normatmosphäre anzutreffen ist, bezieht. Die Tabellen 2 und 3 machen das ersichtlich. Da der Luftdruck mit zunehmender Höhe schon deutlich abnimmt sind die anzutreffenden Luftdichten auf diesen Flugplätzen erheblich niedriger als in NN (Normal Null) in der Normalatmosphäre, worauf sich Flugleistungen in der Regel beziehen.

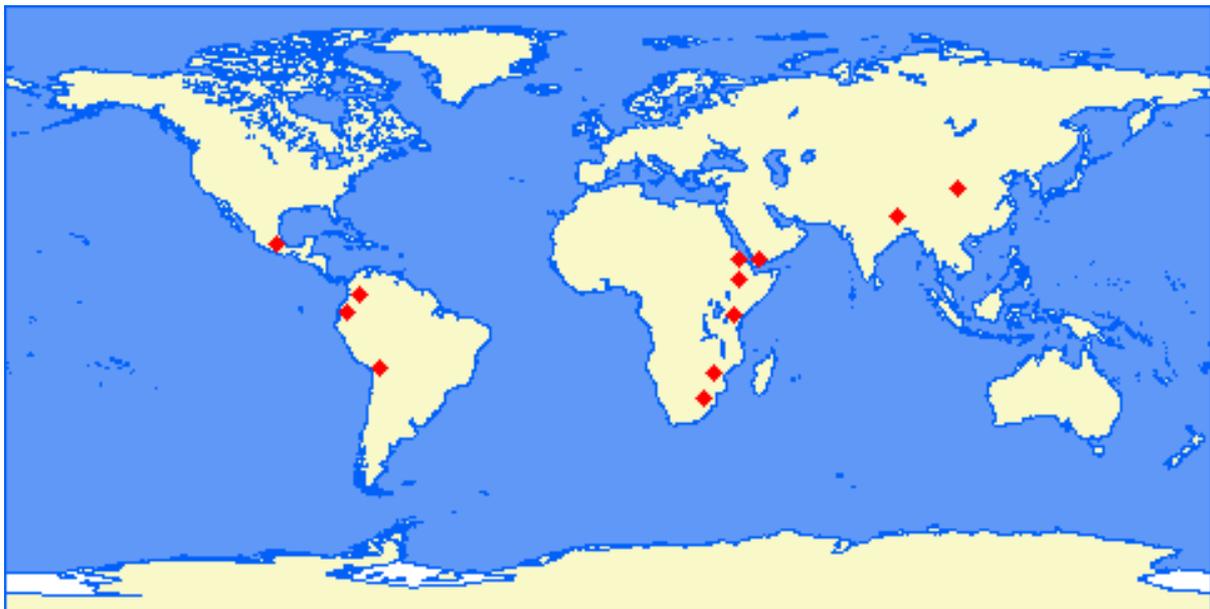


Bild 1: Die wichtigsten hohen und heißen Flugplätze der Welt

Die Gliederung der in Tabelle 1 aufgeführten Flugplätze erfolgt nach der Erhebung über dem Meeresspiegel.

Tabelle 1: Hohe und heiÙe Flugplätze

Flughafen	IATA-Code	ICAO-Code	Land
Kathmandu	KTM	VNKT	Nepal
Harare	HRE	FVHA	Zimbabwe
Nairobi	NBO	HKJK	Kenya
Johannesburg	JNB	FAJS	Südafrika
Lanzhou	LHW	ZLLL	China
Sanaa	SAH	OYSN	Jemen
Mexiko	MEX	MMMX	Mexiko
Addis Abeba	ADD	HAAB	Äthiopien
Asmara	ASM	HHAM	Eritrea
Bogota	BOG	SKBO	Kolumbien
Quito	UIO	SEQU	Ecuador
La Paz	LPB	SLLP	Bolivien

Atmosphärische Parameter und Pistenlangen der Flugplätze**Tabelle 2:** Geographische Bedingungen an den Flugplätzen aus Tabelle 1

Flughafen	Höhe [m]	Höhe [ft]	Bahnlänge [m]	durchschnittl. Tagestemp.[°C]	ISA Temp. [°C]
Kathmandu	1337	4387	3050	15 / 25	6
Harare	1490	4887	4725	13 / 22	5
Nairobi	1625	5330	4117	17 / 23	4
Johannesburg	1694	5558	4418	15 / 25	4
Lanzhou	1947	6388	3615	-5 / 20	2
Sanaa	2199	7216	3252	13 / 15	1
Mexiko	2230	7316	3952	13 / 19	1
Addis Abeba	2334	7656	3800	16 / 20	0
Asmara	2335	7661	3000	13 / 18	0
Bogota	2548	8361	3800	15 / 16	-2
Quito	2813	9228	3120	13	-3
La Paz	4061	13325	4000	13 / 15	-11

Tabelle 3: Atmosphärische Parameter an den Flugplätzen aus Tabelle 1

Flughafen	p_{ISA} [hPa]	ρ_{ISA} [kgm ⁻³]	ρ_{min} [kgm ⁻³]	σ [-]
Kathmandu	862	1,077	1,008	0,82
Harare	847	1,059	1	0,82
Nairobi	833	1,045	0,981	0,80
Johannesburg	826	1,038	0,966	0,79
Lanzhou	800	1,012	0,951	0,78
Sanaa	775	0,986	0,938	0,77
Mexiko	772	0,983	0,921	0,75
Addis Abeba	763	0,973	0,901	0,74
Asmara	762	0,973	0,912	0,74
Bogota	742	0,952	0,895	0,73
Quito	718	0,927	0,875	0,71
La Paz	611	0,814	0,739	0,60

Auswirkungen der verminderten Luftdichte im Flugbetrieb

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich ist, betragen die typischen Dichten, die auf gemittelten Tagestemperaturen beruhen, nur zwischen 60% und 80% der Normdichte.

Die Luftdichte ist aber ein wesentlicher Faktor in den Formeln für Auftrieb, Widerstand und Schub.

Auftrieb:
$$A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} v^2 \cdot S$$

Da bei unveränderter Flugzeugmasse auch unveränderter Auftrieb notwendig ist, muss bei ansonsten unveränderten Bedingungen die Fluggeschwindigkeit erhöht werden.

Widerstand:
$$W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} v^2 \cdot S$$

Der Widerstand nimmt wegen dieser notwendigen Geschwindigkeitserhöhung trotz abfallender Dichte nicht ab.

Schub: $F = \dot{m} \cdot (v_A - v_E)$

Mit dem Luftmassenstrom $\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$ nimmt der Schub eines Triebwerkes ab.

Typische Massen im Frachtflugbetrieb

Die folgenden Probleme treten beim Frachtflugverkehr wegen der üblicherweise höheren Betriebsmassen sehr viel deutlicher auf als beim Passagierflugbetrieb. Der Vergleich von Werten für die MD 11 bei einem typischen Flug über eine Dauer von acht Stunden zeigt diesen Zusammenhang. Wegen der höheren Masse des Frachters ist auch der Kraftstoffbedarf höher!

Tabelle 4: Massen MD 11 Pax / Cargo

	PAX	CARGO
DOM [ton]	122	115
Nutzlast [ton]	40	80
TOF [ton]	65	80
TOM [ton]	227	275
MTOM [ton]	286	286
TOM:MTOM	0,79	0,96

Anlassen der Triebwerke

Die von der Hilfsturbine (APU) zum Anlassen der Triebwerke erzeugte Druckluft erreicht unter Umständen nicht den Mindestwert des Druckes, was Warnungen auslöst und wegen der längeren benötigten Andrehzeit die Starterturbine belastet. In Extremfällen kann die Mindestdrehzahl zum Einschalten der Kraftstoffzufuhr nicht erreicht werden. In jedem Fall werden die Motoren durch die langsamere Beschleunigung auf Leerlaufdrehzahl thermisch höher belastet.



Bild 2: Warnung „START AIR PRESS LO“ (MD 11) am „Engine and Alert Display, EAD“ (aufgenommen in Nairobi)

Auftriebsbeiwert und Mindestfluggeschwindigkeit

Da für einen Start auf einem hochgelegenen und heißen Flugplatz eine höhere Geschwindigkeit erforderlich ist, gleichzeitig für die Beschleunigung des Flugzeuges aber nur ein geringerer Schub zur Verfügung steht, verlängert sich die erforderliche Startstrecke. Reicht die vorhandene Startstrecke jedoch nicht aus, muss die Startmasse reduziert werden, denn dann sinkt die erforderliche Fluggeschwindigkeit und verbessert sich die erzielbare Beschleunigung.

Eine beliebige Verlängerung der Pistenlänge löst die Probleme jedoch nicht, denn die zulässige Höchstgeschwindigkeit für die Reifen und die Fähigkeit der Bremsen, bei einem Startabbruch die kinetische Energie in Form von Wärme aufzunehmen, begrenzen die Abhebegeschwindigkeit. Diese Umstände werden an einem Beispiel der MD 11-F deutlich

Beispiel: Mindestgeschwindigkeit und kinetische Energie

Abflugmasse, $m = 250.000 \text{ kg}$

Auftriebsbeiwert, $c_A = 2,0$

Mindestgeschw. bei Luftdichte $\sigma = 1,225 \text{ kg/m}^3$: $v = 77 \text{ m/s} = 149 \text{ kts}$

Mindestgeschw. bei Luftdichte $\sigma = 0,981 \text{ kg/m}^3$ (NBO) : $v = 86 \text{ m/s} = 167 \text{ kts}$

Kinetische Energie bei 77 m/s : 737.280 Nm

Kinetische Energie bei 86 m/s : 920.205 Nm (um Faktor 1,25 höher)

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 250.000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\sigma \cdot 2,0 \cdot 339 \text{ m}^2}}$$

$$E_{KIN} = \frac{250.000 \text{ kg}}{2} \cdot v^2$$

Startschub der Triebwerke

Der Startschub nimmt unter gleichen Bedingungen von etwa 760 kN auf etwa 610 kN ab. Die höhere erforderliche Mindestgeschwindigkeit und der eine geringere Beschleunigung verursachende geringere Startschub führen zu einer erheblich verlängerten Startstrecke, wie folgende (**stark vereinfachende** !!!) Darstellung zeigt

$$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad \text{mit} \quad a = \frac{F}{m} \quad \text{und} \quad t = \frac{v}{a}$$

$$s = \frac{a}{2} \cdot \frac{v^2}{a^2} = \frac{v^2}{2a} = \frac{v^2 \cdot m}{2 \cdot F}$$

Erforderliche Startstrecke

Die Geschwindigkeit im Zähler und der Schub im Nenner der Gleichung (s.o.) zeigen die Tendenz sehr deutlich auf.

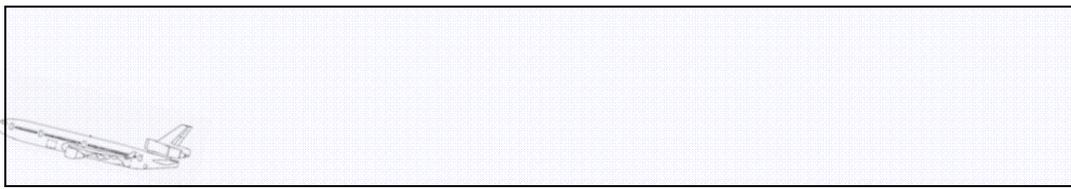
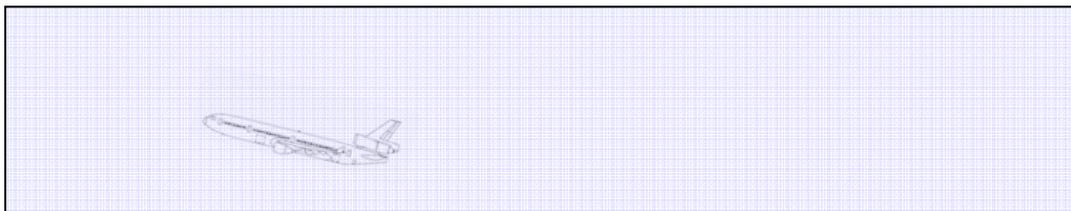


Bild 3: Verlängerung der Startstrecke bei geringer Luftdichte

Startabbruchstrecke

Wegen der höheren zu erreichenden Geschwindigkeit bei schlechterer Beschleunigung vergrößert sich die Startabbruchstrecke ab der Entscheidungsgeschwindigkeit ebenfalls erheblich und kann für einen Start limitierend werden. Bei einer Herabsetzung der Entscheidungsgeschwindigkeit verlängert sich im Fortsetzungsfall nach Triebwerksausfall die Beschleunigungsstrecke mit $n-1$ Motoren bis zum Abheben erheblich.

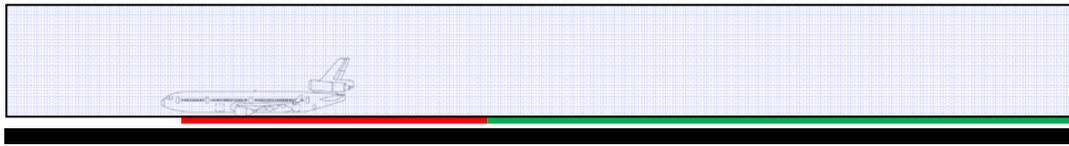


Bild 4: Verlängerung der Startabbruchstrecke bei geringer Luftdichte

Erhöhung des Auftriebsbeiwertes für den Start

Steigwinkel nach dem Abheben

Fortsetzung des Starts nach einem Triebwerksausfall

Eine geringere Mindestgeschwindigkeit kann erreicht werden, wenn der Auftriebsbeiwert durch eine Vergrößerung der Landeklappenstellung erhöht wird. Dabei nimmt allerdings der Widerstandsbeiwert überproportional zu, womit sich das Verhältnis Auftrieb zu Widerstand = Gleitzahl verschlechtert. Damit nimmt der Steigwinkel nach dem Start ab, was nach einem einzukalkulierenden Triebwerksausfall das Überfliegen von Hindernissen nach dem Start oder das Erreichen des geforderten Mindeststeiggradienten im Anfangssteigflug (2.Segment) erschwert.

Steigwinkel:
$$\gamma = \frac{T - D}{m \cdot g}$$

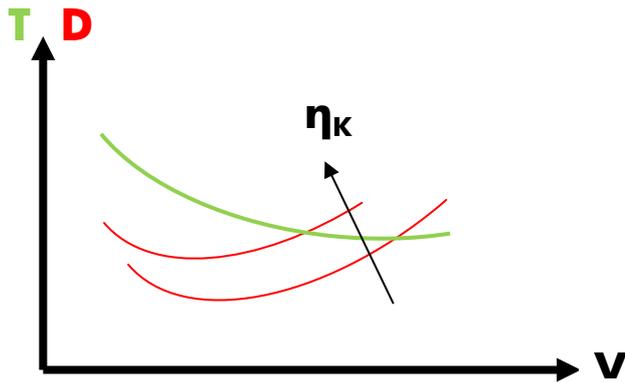


Bild 5: Anstieg des Widerstandes und Abnahme des Steigwinkels bei größerer Landeklappenstellung

Einfluss der verminderten Abflugmasse auf das Nutzlast – Reichweiten – Diagramm

Eine aus Flugleistungsgrößen notwendige Verminderung der höchstzulässigen Abflugmasse M_{ATOM} wirkt sich auf die Nutzlast und / oder Reichweite gravierend aus.

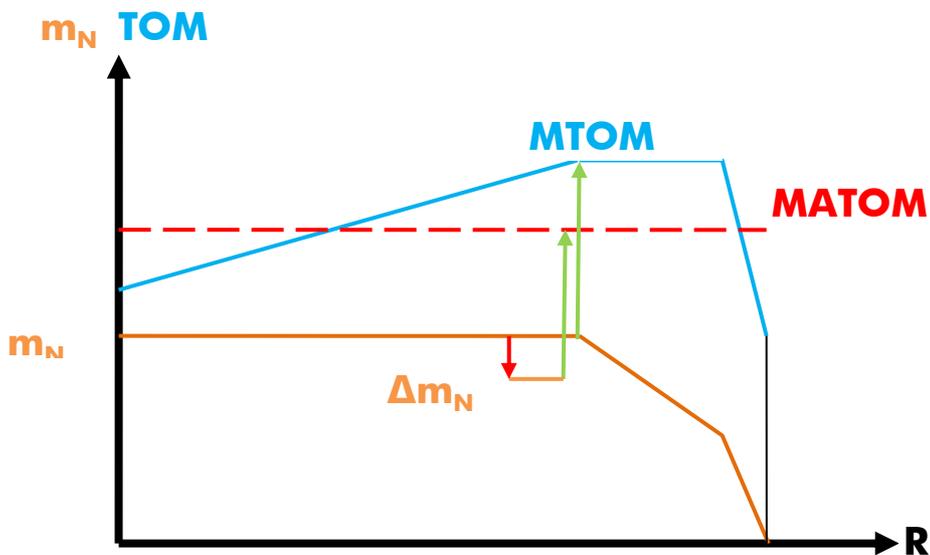


Bild 6: Einfluss auf mögliche Nutzlast

Dabei ist die Minderung der Nutzlast kleiner als die Minderung der zulässigen Abflugmasse, denn wenn die Startmasse geringer ist, wird für den Flug auch weniger Kraftstoff gebraucht. Für einen Flug über acht Stunden mit einer MD 11 sinkt der Verbrauch um etwa 300 kg pro 1000 kg geringerer Abflugmasse. Werden also in einem Beispiel für einen Flug mit 80 Tonnen Nutzlast 80 Tonnen Kraftstoff gebraucht, so reichen für denselben Flug mit 70 Tonnen Nutzlast 77 Tonnen Kraftstoff aus.

Abflugstrecke und Kurvenradien

Da die meisten hochgelegenen Flughäfen auf Plateaus liegen, die von weiteren und zum Teil noch wesentlich höheren Bergen umgeben sind, führen die Abflugrouten meist um die Berge herum aus den Tälern hinaus. Wegen des verminderten Schubes der Motoren sind Steigwinkel und Steigrate dabei kleiner als bei einem Start von einem tiefer gelegenen Flughafen. Insbesondere bei Ausfall eines Motors nach dem Start sind bisweilen recht komplizierte Flugrouten zu folgen. In Kathmandu z.B. muss in einem Kreisbogen solange gestiegen werden, bis eine Mindesthöhe zum Ausflug aus dem Kessel erreicht worden ist. Mit der Erhöhung der wahren Eigengeschwindigkeit in der dünnen Luft steigen auch die Kurvenradien an. Eine weitere Erhöhung der Kurvenradien wird durch die Verminderung des zulässigen Hängewinkels von 25° auf 15° bewirkt. Dieser geringere Hängewinkel dient der Verminderung des Lastvielfachen im Kurvenflug, wodurch der Minderung der Steigleistungen bei Kurvenflug begegnet wird.

Der Radius im Kurvenflug in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Hängewinkel wird nach folgender Formel berechnet

$$r = \frac{v^2}{g} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \rho} - 1}} \quad .$$

Beispiel: Kurvenradius

Typische angezeigte Fluggeschwindigkeit im Steigflug für MD 11 (v_2+10 kts) = 180 kts

In Meereshöhe bei Hängewinkel $\rho = 25^\circ$: TAS = 180 kts, $r = 1.939$ m $\approx 1,1$ NM

In 10000 ft bei Hängewinkel $\rho = 15^\circ$: TAS = 210 kts, $r = 4.740$ m $\approx 2,6$ NM

Durch die steilen Flanken umgebender Berge kann es an den in Rede stehenden Flugplätzen in den Nachmittagsstunden außerdem zur Gewitterbildung kommen, örtlich stark schwankende Winde, thermisch ausgelöste Konvektion sowie Fallwinde im Lee der Berge erschweren die Situation zusätzlich. Die Radarabdeckung des Luftraumes ist durch die Hindernisse zudem oft lückenhaft und die Strahlen bodengebundener Funknavigationsanlagen können durch Reflektionen verfälscht werden. Bei Wetterradaranzeigen ist es schwierig, Gewitter von Bergen („cumulus granitus“) zu unterscheiden.

Anflugstrecke und Sinkrate

Beim Anflug und den Manövern, die das Flugzeug in den Endanflug bringen, sind ähnliche Probleme wie beim Abflug zu bewältigen.

Im Endanflug muss auf dem mit -3° geneigten Gleitpfad des Instrumentenlandesystems wegen der höheren Fluggeschwindigkeit auch mit einer höheren Sinkrate geflogen

werden. Die Vertikalgeschwindigkeit kann nach folgender Faustformel berechnet werden

$$R/D [ft/min] \approx GS [kts] \cdot 5$$

Beispiel: Sinkrate auf dem Gleitpfad

Typische angezeigte Geschwindigkeit v_{TGT} für MD 11 im Endanflug: 160 kts

In Meereshöhe : TAS = 160 kts GS (ohne Wind) = 160 kts, R/D \approx 800 ft/min

In 8000 ft : TAS = 184 kts GS (ohne Wind) = 184 kts, R/D \approx 900 ft/min

Da bei den meisten Betreibern im Flugbetriebshandbuch eine maximale Sinkrate von 1000 ft/min im Endanflug nicht überschritten werden darf, ist es kaum möglich, den Gleitpfad wieder zu erreichen, wenn einmal zu hoch geflogen wurde. Ein solches Überschreiten im kurzen Endanflug würde außerdem einen Alarm im Bodenannäherungswarnsystem (GPWS, Ground Proximity Warning System) auslösen, was zu einem Abbruch des Anfluges führen MUSS!

Endanflug und Landung

Im Abfangbogen muss zudem eine höhere Sinkrate „gebrochen“ werden, was eine vom Normalfall abweichende Landetechnik erfordert. Der Abfangbogen muss früher (in größerer Höhe über der Piste) begonnen werden. Die Einnahme eines höheren Neigungswinkels ist bei vielen Flugzeugen durch die Rumpfgeometrie begrenzt, ein Aufsetzen des Rumpfhecks (tail strike) kann zu erheblichen Strukturschäden führen. Ein zu spätes Reduzieren des Schubes auf Leerlauf verlängert die Landestrecke zusätzlich. Tagsüber kann es durch Aufheizung der Luft über schwarzen Pisten zu einer starken örtlichen Erwärmung der Luft und damit zu einer weiteren Dichteabnahme kommen, was zum Durchsacken im Abfangbogen führen kann.

Landestrecke

Die Auswirkungen hoher und heißer Flugplätze auf die Landung werden an einem Beispiel verdeutlicht.

Beispiel: Erforderliche Landestrecke

MD 11-F bei Landemasse 200 t, Landeklappenstellung $\eta_K = 50^\circ$ und maximaler Verzögerung. Die Landestrecke ist abhängig von der Druckhöhe gegeben. Benötigte Landestrecke MD 11 nach FAR 25.

Druckhöhe	Landestrecke	
	trockene	nasse Piste
0 ft	2140 m	2480 m
4000 ft	2350 m	2700 m
8000 ft	2610 m	3010 m

Pro 1 Knoten Rückenwind bei der Landung verlängert sich die erforderliche Landestrecke um etwa 40 m.

Die durch die Radbremsen aufzunehmende hohe kinetische Energie führt zu einer erheblichen Aufheizung der Bremsen, dadurch kann sich insbesondere bei Windstille an der Parkposition der nachfolgende Start verzögern, da die Bremsen durch Abkühlung erst wieder in die Lage versetzt werden müssen, die Energie bei einem evtl. Startabbruch aufnehmen zu können.

Anflug mit technischen Problemen

Ist es während des Fluges zu technischen Problemen gekommen, ist beim Anflug unter Umständen mit einer erhöhten Geschwindigkeit zu fliegen. Beim Versagen der Vorflügel der MD 11 erhöht sich die angezeigte Anfluggeschwindigkeit bei 200 t von 155 kts auf 195 kts. In 5000 ft Dichtehöhe würden daraus 210 kts wahre Geschwindigkeit. Dieser Wert liegt bereits 6 Knoten über der zulässigen Geschwindigkeit der Reifen. Bei nasser Bahn erhöht sich die erforderliche Landestrecke auf etwa 3300 m bei vollem Einsatz der Schubumkehr, die in die vorgenannten Werte nicht eingerechnet ist.

Es kann unter solchen oder ähnlichen Umständen notwendig werden, zu einem anderen, besser geeigneten Flughafen auszuweichen. Dies kann ein anderer als der im Flugdurchführungsplan vorgesehene sein. In diesem Fall ist eine Reichweitenbetrachtung zwingend erforderlich.

Viele der genannten Probleme können umgangen oder gemindert werden, wenn der Start oder die Landung in die Nacht- oder frühen Morgenstunden verlegt werden, da die Lufttemperaturen dann deutlich tiefer liegen.

Wirtschaftlichkeit: Maximale Startmasse als Funktion der Temperatur

Insbesondere beim Frachter zählt am Ende die Masse, die man unter gegebenen Bedingungen aus einem Flugplatz herausbringen kann. Eine hohe Abflugmasse erlaubt eine hohe Nutzlast und / oder eine hohe Kraftstoffmasse (und damit Reichweite). Beides bringt dem Betreiber Einnahmen. Hohe und heiße Flugplätze reduzieren die Möglichkeit hohe Abflugmassen zu realisieren und können damit im Extremfall einen wirtschaftlichen Flugbetrieb unmöglich machen. Die Beispielrechnung zeigt hierzu konkrete Zahlenwerte. Man vergleiche die Ergebnisse mit der maximalen Abflugmasse (MTOM) aus Tabelle 4, die dort mit 286000 kg angegeben ist.

Beispiel: Maximal zulässige Startmasse (MATOM) als Funktion der Lufttemperatur

MD 11-F, Start in Mexico MMMX , Piste 05R, Windstille, Luftdruck QNH 1013 hPa.

Lufttemperatur	MATOM	
	nasse	trockene Piste
10°C	247900 kg	250500 kg
15°C	246100 kg	248900 kg
20°C	242500 kg	245200 kg
25°C	237300 kg	239900 kg



Bild 7: Erreichen der Reiseflughöhe nach Abflug aus Sao Paolo kurz vor Sonnenaufgang