



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL

Eco-Drive und Leistungsoptimierung für Kolbenmotorflugzeuge

Theo Rindlisbacher, 5. Februar 2009



Fragestellungen

Thematik Treibstoff Sparen (Umweltbeitrag):

1. Was kann ich tun, um mit einem Kolbenschüttler pro Liter Treibstoff möglichst viele Nautische Meilen zurückzulegen?

Thematik Leistungsoptimierung (Safetybeitrag):

2. Wie kann ich „handgemixte“ Motoren auf „best power“ einstellen?

Hinweis: Die theoretischen Grundlagen und die Dokumentation von Messungen kann im Zusammenfassenden Bericht über Kolbenmotoren des Autors nachgelesen werden. Kopien liegen auf. Link: [Bericht Kolbenmotoren](#)



Inhaltsübersicht

1. Treibstoff Sparen im Reiseflug (Umweltbeitrag)

1.1 Grundsätzliches

1.2 Anwendung bei Thielert PA28 und C172 sowie bei Rotax Katana

1.3 Allgemeine Daumenregeln

Intermediate Stop

2. Starten und Steigen mit „best power“ (Safetybeitrag)

2.1 Mixerstellungen für Lyco, Conti & Co.

2.2 Setze das AFM um

2.3 „Best power“ für Fest- und Verstellpropeller

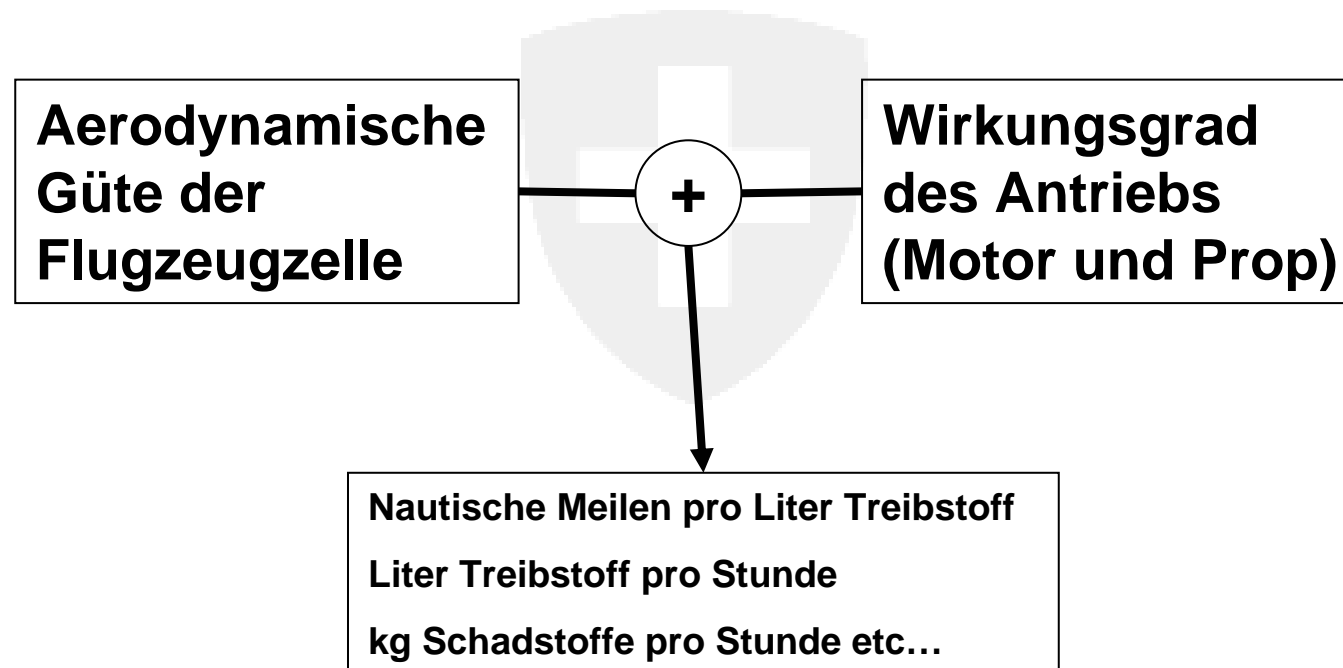
Full Stop

Restliche Fragen und Diskussion



1.1 Grundsätzliches: Treibstoffverbrauch

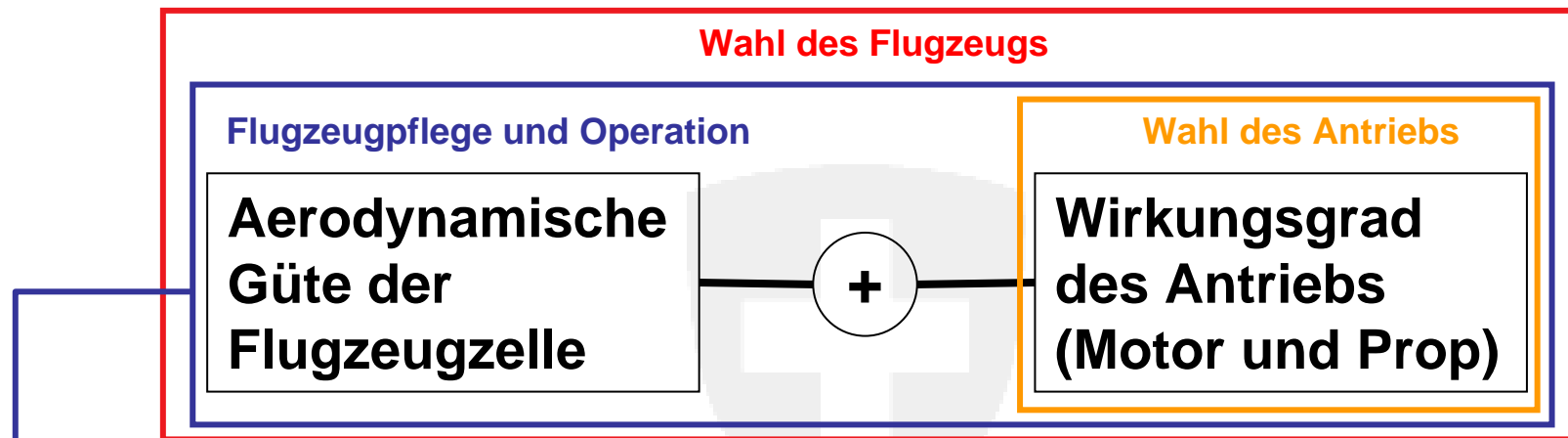
- In einem bestimmten Flugzustand wird der **Treibstoffverbrauch im Prinzip durch zwei Dinge bestimmt:**





1.1 Grundsätzliches: Einflussmöglichkeiten

- **Einflussmöglichkeiten** auf Treibstoffverbrauch



Flugzeugpflege:

- **Wartung, Sauberkeit von Zelle und Propeller, Radverschalung?**

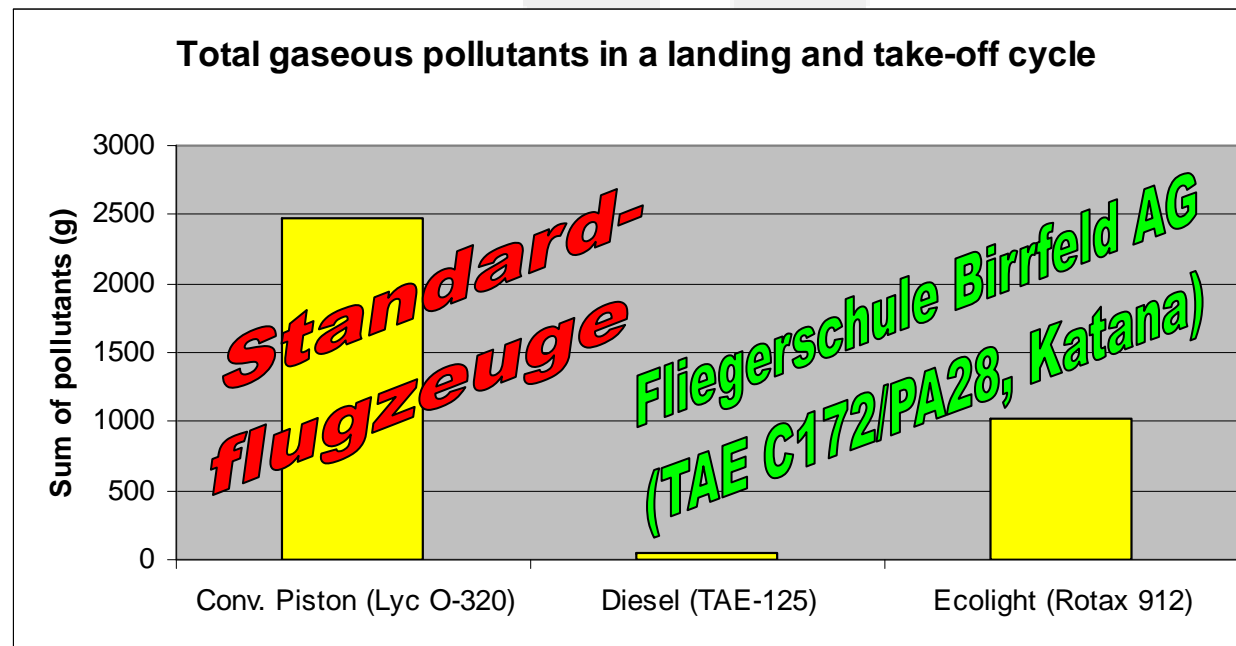
Operation des Flugzeugs:

- **Flugzeugbeladung**
- **Dichtehöhe und Wind**
- **Leistungssetzung (Ladedruck, Drehzahl, Gemisch)**



1.1 Grundsätzliches: Beispiel Wahl des Antriebs

- **Einflussmöglichkeit durch Wahl des Antriebs** am Bsp. der Fliegerschule Birrfeld AG
- Dargestellt ist das Total der gasförmigen Schadstoffe im Flugplatzbereich bis 3000ft über Grund für drei Motorentchnologien (Messungen BAZL)





1.1 Grundsätzliches: Wichtige Begriffe

- **Die angezeigte Geschwindigkeit (IAS = Indicated Airspeed):**
Staudruck angegeben als Geschwindigkeit. Flugtechnisch wichtigste Geschwindigkeitsangabe, jedoch nicht die wahre Geschwindigkeit (ausser auf Standard-Meereshöhe ohne Instrumentenfehler).
- **Die wahre Geschwindigkeit (TAS = True Airspeed):**
Die wirkliche Fluggeschwindigkeit → Flugplanung, Flugleistung
- Bei konstanter IAS nimmt die TAS mit der Flughöhe zu.
- Bei höherer TAS muss der Motor mehr Leistung abgeben.
- Bei höherer TAS nimmt die Flugzeit ab.





1.1 Grundsätzliches: Wichtige Begriffe

- **Die Geschwindigkeit über Grund (GS = Ground Speed):**
Die wirkliche Geschwindigkeit relativ zur Erdoberfläche, also TAS mit Windkorrektur → Flugplanung, Flugleistung, Treibstoffplanung



- **Die spezifische Reichweite (SR):**
Die Strecke pro Treibstoffmenge (z.B. NM / Liter Treibstoff) nennt man spezifische Reichweite. Treibstoffoptimiert fliegen heisst, SR möglichst gross wählen.
- Bsp. $GS = 115 \text{ KTS} = 115 \text{ NM / hour}$, $Fuel \text{ Flow} = 5.4 \text{ US GAL / hour}$
→ $SR = 21.3 \text{ NM / US GAL}$
→ **Der Wert soll möglichst gross sein.**



1.1 Grundsätzliches: Speziell zu beachten

- Es gelten immer die Angaben im AFM und Motorenmanual!
- Vor lauter Treibstoffoptimierung und Motorjustierung vergiss nicht, den Luftraum zu überwachen!





1.2 Bsp. Thielert C172, PA28 Cadet und Warrior

Optimierung spezifischer Reichweiten

(Berechnung aus AFM und “Trüb-Erfahrungswerten”)

Ergebnisse für alle drei Flugzeuge:

- Die spezifische Reichweite nimmt bei Windstille mit der Flughöhe bis etwa 10 000ft PA zu.
- Dank der hohen Effizienz des Motors bei hoher und tiefer Leistung fallen Steigflüge (und Sinkflüge!) bezüglich Treibstoffverbrauch schon bei relativ kurzen Flügen nicht besonders ins Gewicht.
- Die spezifische Reichweite nimmt deutlich zu, wenn die Leistung auf 60% gedrosselt wird, ausser bei starkem Gegenwind.

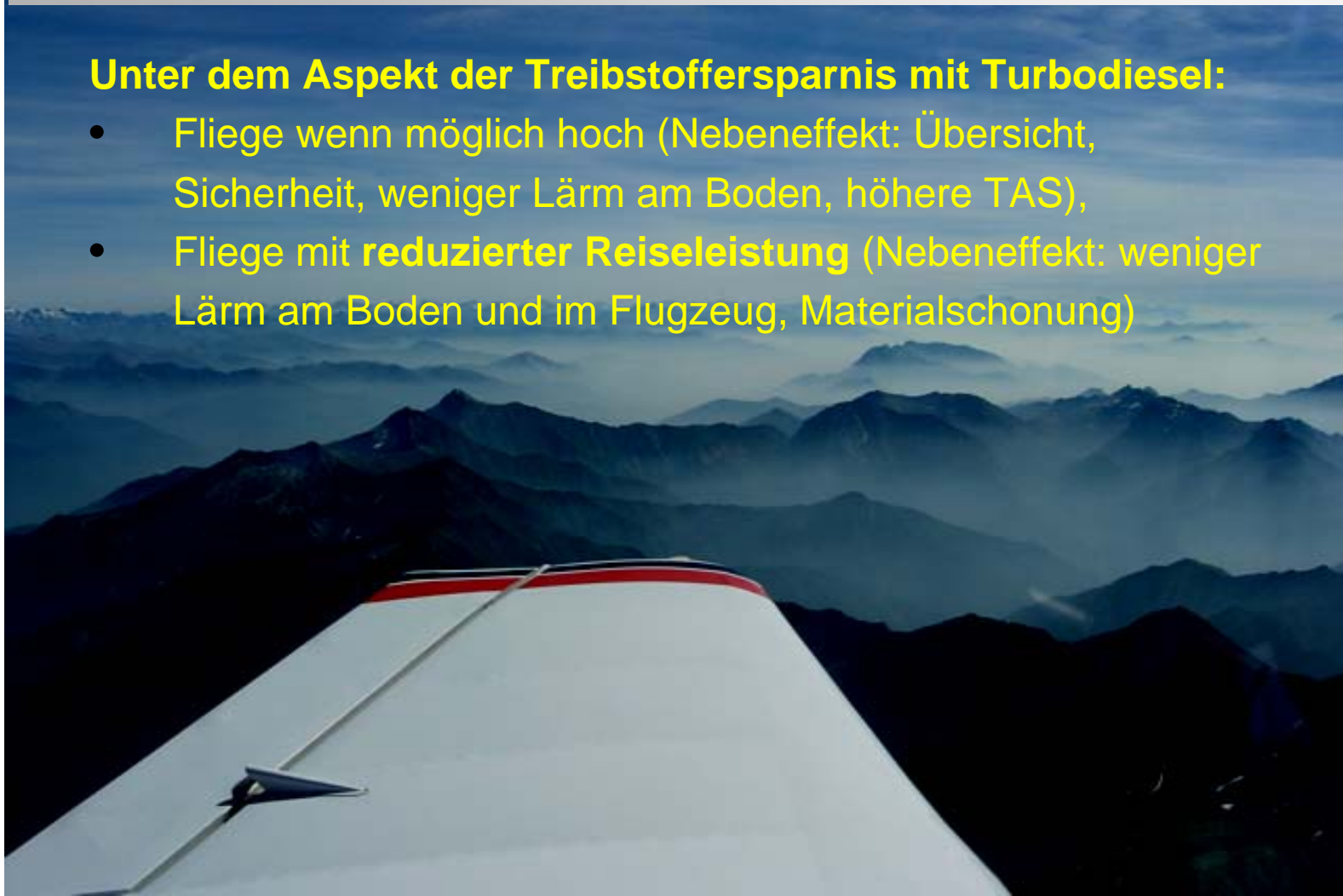




1.2 Bsp. Thielert C172, PA28 Cadet und Warrior

Unter dem Aspekt der Treibstoffersparnis mit Turbodiesel:

- Fliege wenn möglich hoch (Nebeneffekt: Übersicht, Sicherheit, weniger Lärm am Boden, höhere TAS),
- Fliege mit **reduzierter Reiseleistung** (Nebeneffekt: weniger Lärm am Boden und im Flugzeug, Materialschonung)





1.2 Bsp. Thielert C172, PA28 Cadet und Warrior

Für Turbodiesel C172:

- Die C172 kann die beste SR aller drei Flugzeuge erreichen, wenn sie hoch und mit tiefer Reiseleistung (60%) geflogen wird.
- Bei der C172 ist die Verschlechterung der SR beim schneller Fliegen am deutlichsten.

Für Turbodiesel PA28 Cadet:

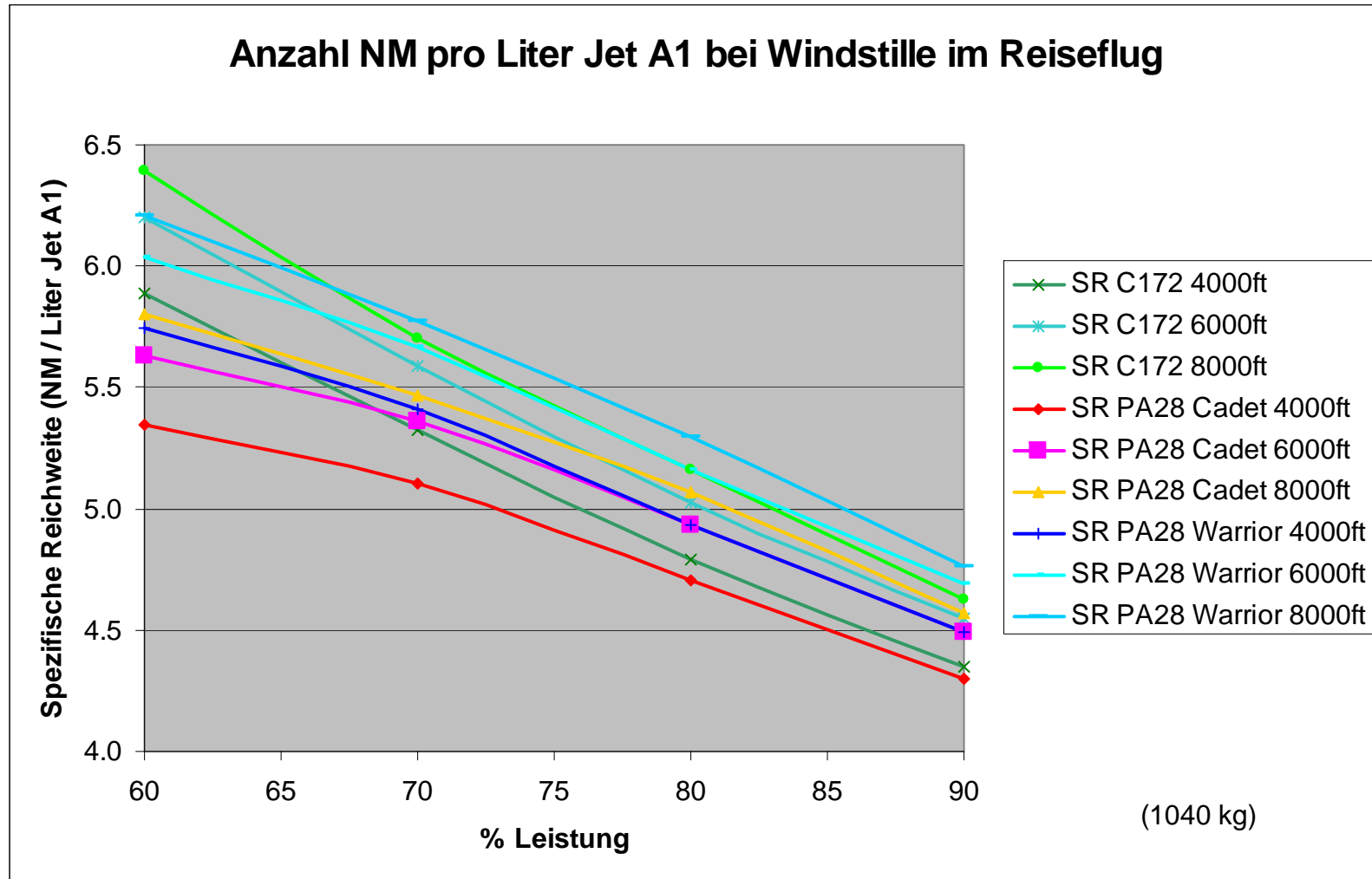
- Beim „Tief Fliegen“ (4000ft und darunter) hat sie die schlechteste SR aller drei Flugzeuge.

Für Turbodiesel PA28 Warrior:

- Die Warrior kann bei mittlerer bis hoher Reiseleistung eine bessere SR erzielen als die C172, d.h. die Warrior hat die höchste Treibstoffeffizienz der drei Flugzeuge, wenn die Reisezeit auch optimiert werden soll.



1.2 Bsp. Thielert C172, PA28 Cadet und Warrior





1.2 Bsp. Rotax Katana

Ergebnisse für die spezifischen Reichweiten

(Berechnung aus AFM)



- Die spezifische Reichweite wird bei Windstille um 4000ft und bei mittlerer Leistungssetzung um 60 bis 65% am grössten. → Typischer Schulbetrieb, Instruktion zur Leistungssetzung der Fliegerschule ist optimal.
- Bei dieser Leistungssetzung und Windstille beträgt die SR ungefähr 7 NM pro Liter MOGAS.
- Die SR nimmt bei der Katana mit zunehmender Flughöhe eher ab!



1.3 Allgemeine Daumenregeln

Geschwindigkeit für grösste SR bei MTOM ist zirka:

- **Geschwindigkeit für beste Steigrate** $v_y(\text{IAS}) + 15\%$
(Genauer wäre v_y als TAS)



Korrekturen:

- + 1/4 der Gegenwindkomponente (für Gegenwind)
- - 1/5 der Rückenwindkomponente (für Rückenwind)
- - 4% pro 100 kg unterhalb MTOM
- Leistungseinstellung nicht unter 45% und selten über 55%
- Verstellpropeller: Erforderliche Leistung bei relativ tiefer Drehzahl und relativ hohem Manifold Pressure einstellen (Limiten beachten!)
- Manuelle Gemischeinstellung: gemäss AFM, auf jeder Flughöhe.



1.3 Bsp. Robin DR40



Flugmasse 980 kg.

- Gegenüber einem Standard-setting 23/23 (2300 RPM/23 InHg) führt die Anwendung der Daumenregeln auf einer Dichtehöhe von 6500ft zu einer
- Zunahme der Reisezeit von A nach B um 7% und zu einer
- Abnahme des Treibstoffverbrauchs von A nach B um 20% (!).



1.3 Eine Bauernweisheit...

Eine Kuh, die wenig frisst, gibt hinterher auch wenig Mist!





Intermediate Stop

1. Welche Geschwindigkeiten sind für die Flugplanung, zur Berechnung von Flugzeit und Treibstoffbedarf von Bedeutung?
2. Durch welche Massnahmen kann der Treibstoffbedarf für einen geplanten Flug von A nach B optimiert werden?
3. Wie könnte man die momentane spezifische Reichweite im Flug möglichst einfach bestimmen? (Annahme: Es gibt im Flugzeug eine Fuel Flow Anzeige und ein GPS.)
4. In welchem Höhen- und Leistungsbereich haben die Turbodieselflugzeuge der Fliegerschule Birrfeld die grösste spezifische Reichweite?



Inhaltsübersicht

1. Treibstoff Sparen im Reiseflug (Umweltbeitrag)

1.1 Grundsätzliches

1.2 Anwendung bei Thielert PA28 und C172 sowie bei Rotax Katana

1.3 Allgemeine Daumenregeln

Intermediate Stop

2. Starten und Steigen mit „best power“ (Safetybeitrag)

2.1 Mixerstellungen für Lyco, Conti & Co.

2.2 Setze das AFM um

2.3 „Best power“ für Fest- und Verstellpropeller

Full Stop

Restliche Fragen und Diskussion



2.1 Mixerstellungen für Lyco, Conti & Co

Turbodiesel-FADEC- und Rotax-Flieger dürfen sich bei den nachfolgenden Folien mit einem kleinen Lächeln auf den Lippen zurücklehnen...



Die Grafik auf der nächsten Folie zeigt, wie sich bei einer fixen Stellung der Throttle die

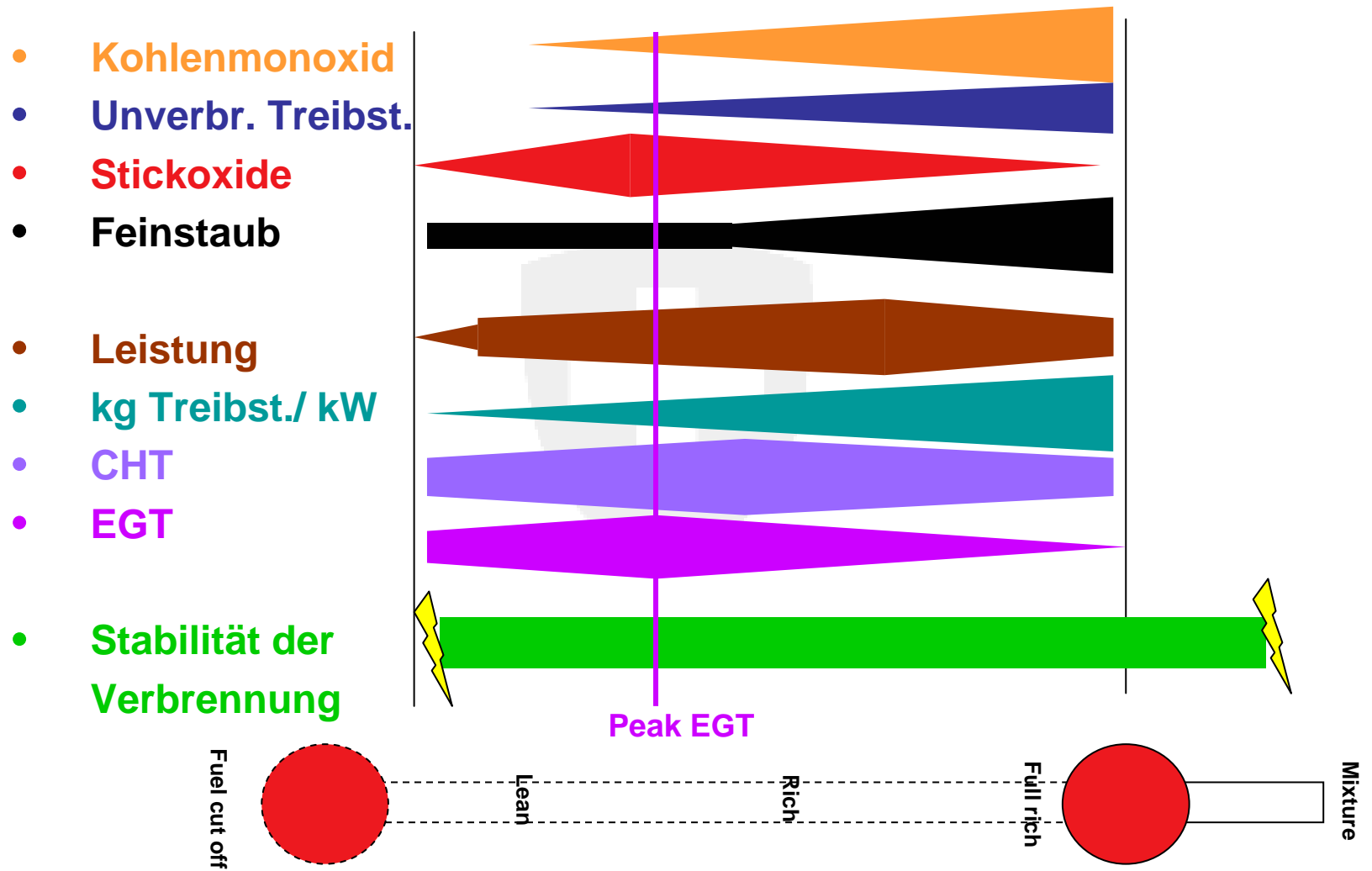
- Schadstoffe und die wichtigsten
- Motorenparameter in **Abhängigkeit von der Mixerstellung** verändern.

Daraus wird u.a. ersichtlich:

- Die Stellung des Mixers beeinflusst auch die Leistung
- **Die beste Leistung ist nicht bei einer Gemischeinstellung, wo der Treibstoff vollständig verbrannt wird (und der Motor sparsamer wird).** Wie man "best power" findet, wird nachher erklärt.



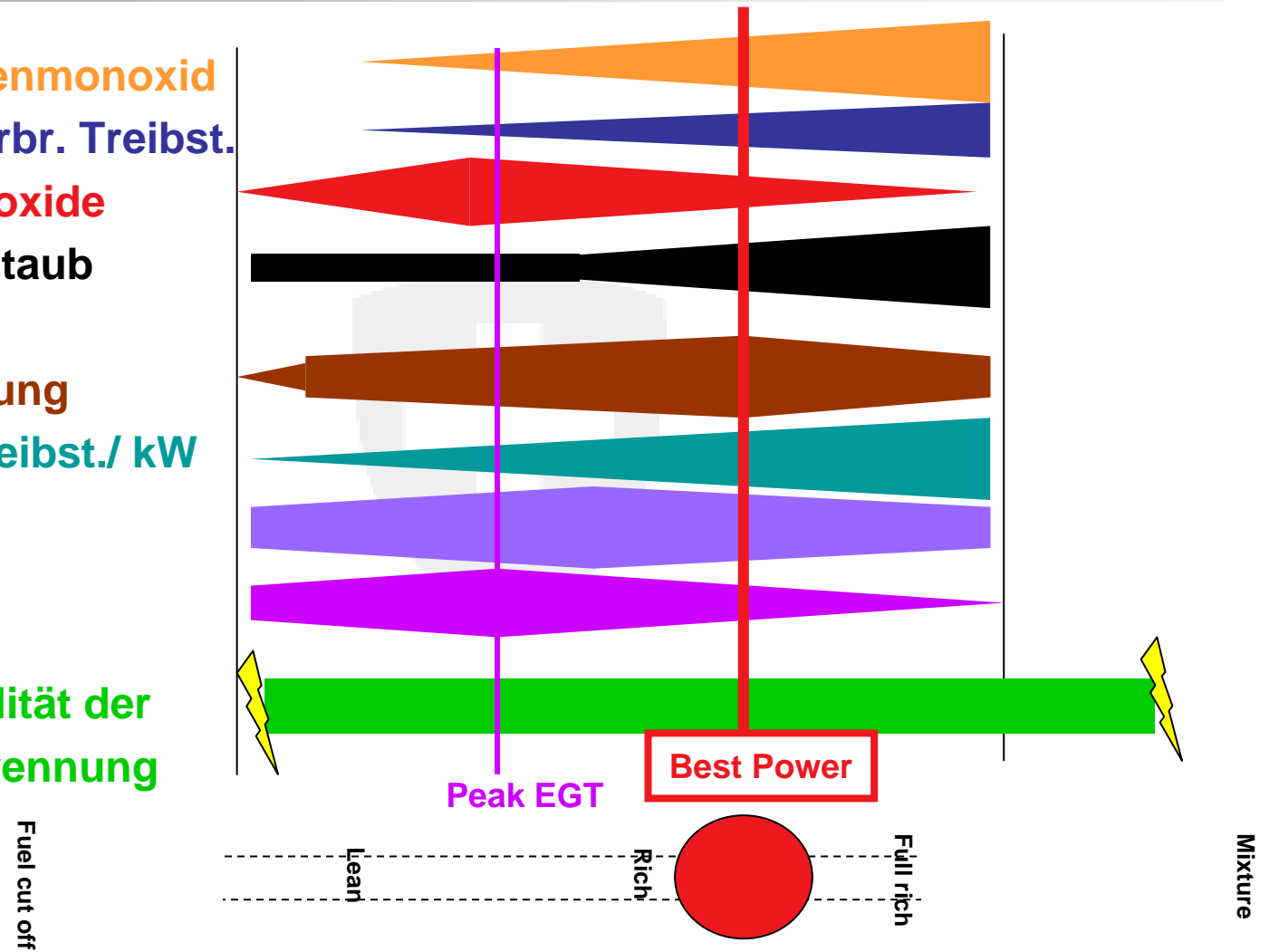
2.1 Mixerstellungen und Motorenparameter





2.1 Mixerstellungen für "best power"

- Kohlenmonoxid
- Unverbr. Treibst.
- Stickoxide
- Feinstaub
- Leistung
- kg Treibst./ kW
- CHT
- EGT
- Stabilität der Verbrennung





2.1 Mixerstellungen für Lyco, Conti & Co

Für Motoren ohne Turbolader ist weiter zu beachten:

- Nimmt die Dichtehöhe zu, d.h.
- **Nimmt die Luftdichte ab**
 - durch Höhersteigen,
 - Start auf grosser Höhe und/oder
 - hohe Lufttemperatur



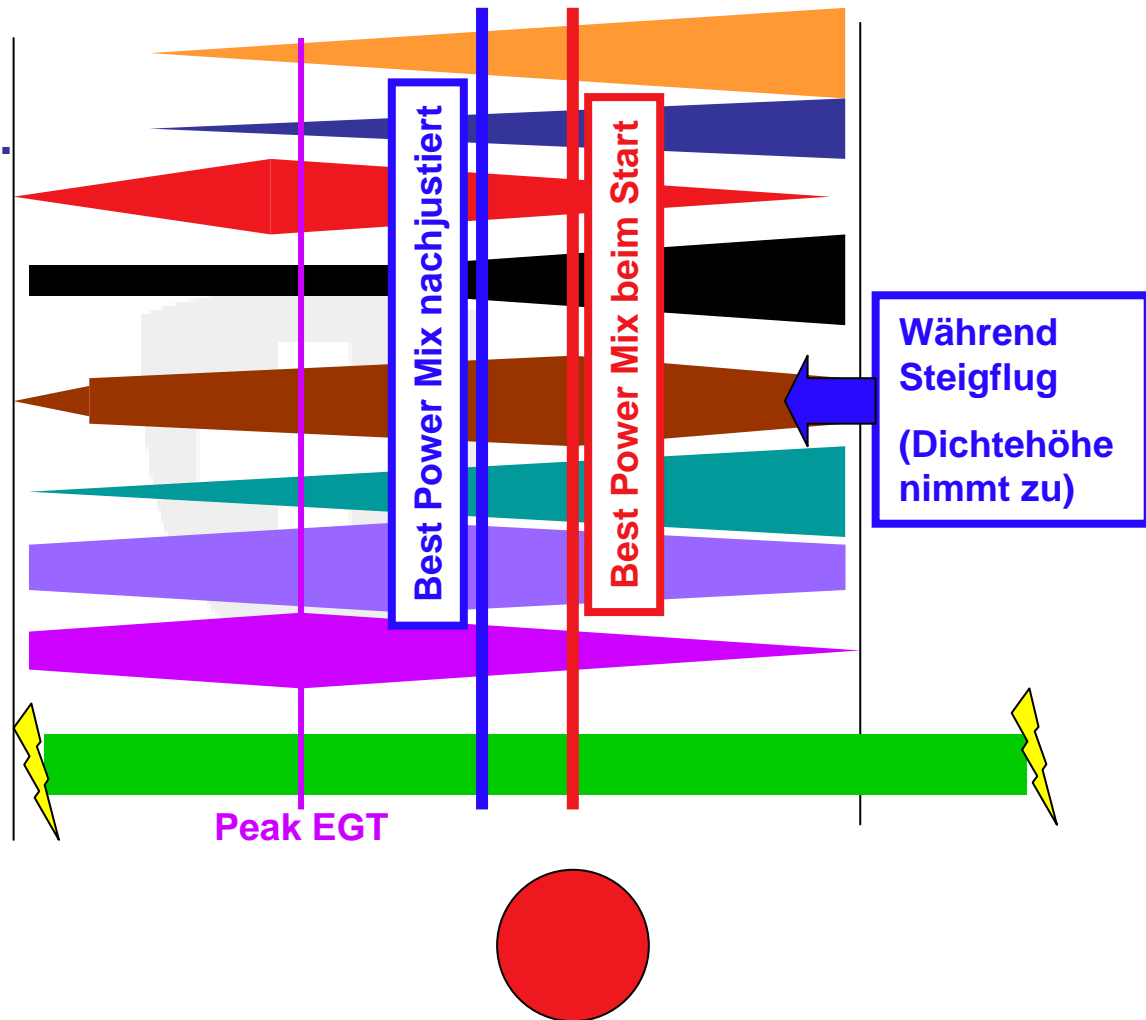
wird das Gemisch treibstoffreicher (noch mehr Luftmangel)
(Verschiebung des Treibstoff/Luft Gemischs, siehe nächste Folie).

→ **Dem muss von Hand durch entsprechendes Ziehen des Mixers entgegengewirkt werden.**



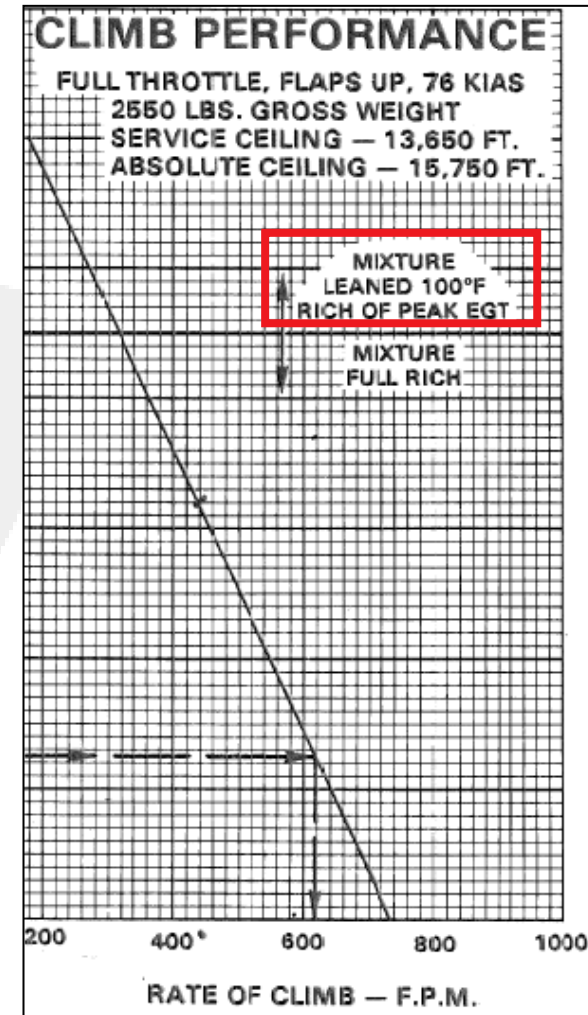
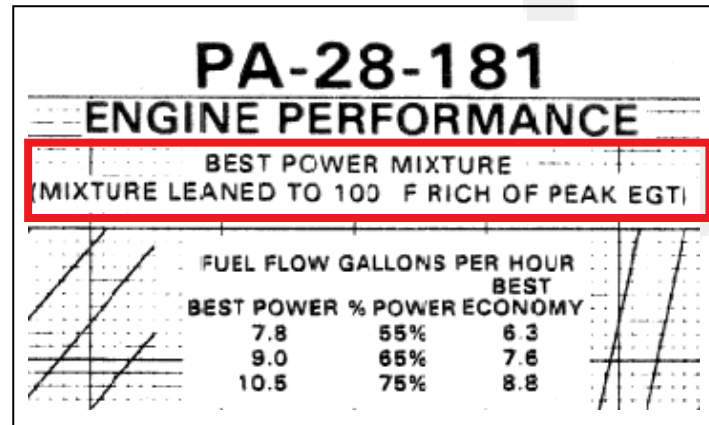
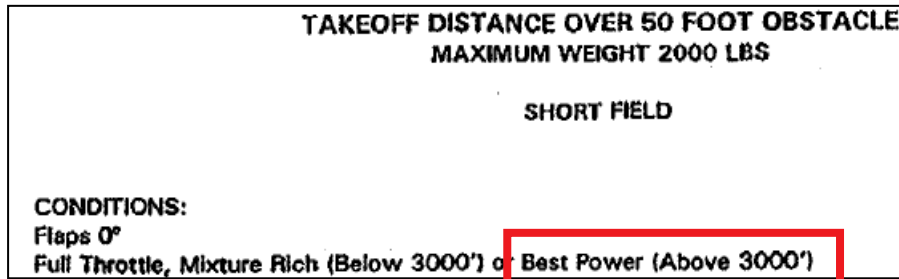
2.1 "Best power" justieren für Lyco, Conti & Co

- Kohlenmonoxid
- Unverbr. Treibst.
- Stickoxide
- Feinstaub
- Leistung
- kg Treibst./ kW
- CHT
- EGT
- Stabilität der Verbrennung





2.2 Setze das AFM um...



(Beispiele aus verschiedenen AFM)



2.3 “Best power” mit Fest- und Constant Speed-Propeller

Im AFM oder Motorenmanual gibt es Angaben darüber, ab welcher Dichtehöhe der Mixer auch beim Start und beim Steigflug von seiner “full rich” Position nachjustiert wird.

Für Flugzeuge mit Kolbenmotor ohne Turbolader und manueller Gemischeinstellung gilt dann vor dem Start:

- Auf Bremse stehen, “mixture full rich”, “full throttle” geben
- Mit **Festpropeller: Mixer langsam zurückziehen, bis die maximale Drehzahl erreicht wird.** Dies ist automatisch “best power”!
- Mit **Constant Speed Propeller:** Mixer langsam bis peak EGT zurückziehen, dann langsam wieder zurückstossen bis **peak EGT minus 100°F.** (100°F rich of peak EGT)

Beobachte in jedem Fall die Zylinderkopftemperatur (CHT) und die Öltemperatur. Steigen sie gegen die Grenzwerte, so muss in Richtung “rich” justiert werden.



Full Stop

- Fragen zum 2. Teil?
- Haben wir die Ausgangsfragen nun zufriedenstellend beantwortet?
(1. Was kann ich tun, um mit einem Kolbenschüttler pro Liter Treibstoff möglichst viele Nautische Meilen zurückzulegen?
2. Wie kann ich „handgemixte“ Motoren auf „best power“ einstellen?)
- Weitere Fragen und Bemerkungen?





Full Stop



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt BAZL: theo.rindlisbacher@bazl.admin.ch
www.bazl.admin.ch → für Fachleute → Umwelt