



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL**  
Abteilung Luftfahrtentwicklung  
Sektion Umwelt

# SCHADSTOFFEMISSIONEN VON FLUGZEUG-KOLBENMOTOREN

## ZUSAMMENFASSENDE BERICHT



**Zweck dieses Berichts:** Dieser Bericht soll interessierte Kreise über die Entwicklung von Emissionsfaktoren für Flugzeug-Kolbenmotoren informieren. Die gemessenen Emissionsfaktoren werden vom BAZL primär für die Anwendung in Schadstoffberechnungen verwendet. Darüber hinaus beschreibt der Bericht Erkenntnisse und Empfehlungen für die Flugpraxis, welche der Schadstoffreduktion dienen können.

BAZL, CH-3003 Bern

Referenz: 0 / 3/33/33-05-003 ECERT

Kontaktperson: Theo Rindlisbacher

Tel. +41 31 325 93 76, Fax +41 31 325 92 12, [theo.rindlisbacher@bazl.admin.ch](mailto:theo.rindlisbacher@bazl.admin.ch)

Die englische Originalausgabe wurde vom Vizedirektor der Abteilung Luftfahrtentwicklung, M. Zuckschwerdt, am 13.06.2007 zur Veröffentlichung frei gegeben.

## KURZDARSTELLUNG

Das Luftfahrtgesetz der Schweiz (SR 748.0, LFG Art. 58) schreibt vor, die Schadstoffemissionen aller Luftfahrzeuge mit motorischem Antrieb zu prüfen. Diese gesetzliche Verpflichtung erstreckt sich auch auf Flugzeugmotoren, welche gemäss ICAO<sup>1</sup> keiner Emissionszertifizierung unterliegen. Dazu gehören Flugzeug-Kolbenmotoren, Helikopter-, Turboprop- sowie kleine Jettriebwerke. Glaubwürdige Daten über die Schadstoffemissionen aller Motoren sind nötig für Emissions- und Immissionsinventare<sup>2</sup>, für Umweltverträglichkeitsprüfungen und weitere Anwendungen, welche direkt dem Umweltschutz dienen.

Bis jetzt waren Emissionsdaten<sup>3</sup> von Flugzeug-Kolbenmotoren nur äusserst spärlich erhältlich und Kenntnisse darüber kaum verfügbar. Der vorliegende Bericht versucht diese Kenntnislücken in einem umfassenden Ansatz zu schliessen. Die folgenden Aspekte werden im Bericht und in seinen Anhängen dokumentiert:

- Das Emissionsverhalten einer breiten Palette von heute existierenden Flugzeug-Kolbenmotoren.
- Eine Methode für standardisierte kostengünstige Emissionsmessungen direkt an den am Boden stehenden Flugzeugen.
- Eine Methode für die Berechnung der Emissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren.
- Allgemeine Verbrennungseigenschaften von Flugzeug-Kolbenmotoren und der Einfluss der Piloten auf die Emissionen.
- Erforschung möglicher Emissionsreduktionen durch operationelle Anpassungen im praktischen Flugbetrieb, neue Kolbenmotor-Konzepte, technologische Verbesserungen und die Verwendung von saubererem AVGAS.

Das präsentierte Material dient dem BAZL zur

- Berechnung kompletter Emissionsinventare der Schweizer Zivilluftfahrt, in Zusammenhang mit nationalen und internationalen gesetzlichen Verpflichtungen im Bereich der Umwelt.
- Beobachtung der Umweltauswirkungen von Kolbenmotor-Flugzeugen.
- Reduktion der Emissionen von Kolbenmotor-Flugzeugen.
- Pilotenaus- und Pilotenweiterbildung.

Das BAZL plant, die Anzahl gemessener Triebwerke in der Zukunft noch zu erhöhen. Dies betrifft insbesondere modernisierte Varianten der Kolbenmotoren und die Verbesserung der Kenntnisse über die Unterschiede zwischen Motoren desselben Typs. Für andere Triebwerksfamilien ohne ICAO-Emissionszertifizierung, wie Helikopterturbinen und kleine Jettriebwerke, gibt es nach wie vor einen Mangel an Emissionsdaten. Das BAZL plant, diese Lücken mit zwei entsprechenden Arbeitspaketen auf der Grundlage des Luftfahrtgesetzes und in internationaler Zusammenarbeit zu schliessen.

Im Juni 2007

Theo Rindlisbacher

---

<sup>1</sup> ICAO = International Civil Aviation Organization = Internationale Zivilluftfahrtorganisation

<sup>2</sup> Emission = Was am Auspuff herauskommt, Immission = Welche Konzentrationen am Boden gemessen werden.

<sup>3</sup> Das Wort "Emission" ist im Bericht gleich bedeutend wie "Schadstoffemission" oder "Ausstoss von Verbrennungsgasen".

# INHALT

<b>1. Allgemeine Information</b>	<b>9</b>
1.1 Hintergrund und Einordnung der Flugzeug-Kolbenmotoren	9
1.2 Hauptzielsetzungen des Projekts	10
<b>2. Zusammenfassung der Resultate</b>	<b>11</b>
<b>2.1 BAZL-Datenblätter und ihre praktische Anwendung</b>	<b>11</b>
2.1.1 Allgemeine Methode für die Emissionsberechnung	11
2.1.2 Vorgeschlagene Phasenzeiten für die Emissionsberechnung	11
2.1.3 Emissionsfaktoren für den Reiseflug	12
2.1.4 Angabe der Emissionen auf einem Datenblatt	13
2.1.5 Datenqualität und Aussagen zur Genauigkeit	13
2.1.6 Datenblätter herunterladen	14
<b>2.2 Allgemeine Erkenntnisse über die Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1 Grundlagen der Verbrennung</b>	<b>16</b>
a) Was geht in den Motor? Zusammensetzung von AVGAS 100LL	16
b) Wie viel Luft braucht es für ein Feuer?	17
c) Was kommt aus dem Auspuff?	18
d) Eigenschaften von Schadstoffen	19
<b>2.2.2 Einstellungen des Treibstoff/Luftgemischs</b>	<b>19</b>
a) Dominierende "Uralt-Technik" erfordert eine Gemischverstellung von Hand	19
b) Die Definition von reichem und magerem Gemisch mit der Luftzahl Lambda	21
c) Die manuelle Gemischverstellung („Mixer“) steuert den Wert von Lambda	21
d) Typische Werte für Lambda	22
e) Einfluss der Gemischhebelstellung auf Motorentemperaturen und Leistung	23
f) Einfluss der Gemischhebelstellung auf die Schadstoffemissionen	24
g) Einfluss der Gemischhebelstellung: Zusammenfassung	26
h) Warum ist bei "Uralt-Technik"-Motoren bei hoher Leistung vollreiches Gemisch nötig?	27
i) Warum muss das Gemisch auch bei sehr tiefer Leistung reich sein?	27
j) Ungleichmässige Verteilung von Gemisch und Temperaturen in "Uralt-Tech"-Motoren	28
k) Untersuchte manuelle Verfahren für die Gemischverstellung	31
l) Gemischverstellung mit Hilfe des Treibstoffverbrauchs	32
<b>2.2.3 Emissionsfaktoren und Grössenordnung der Schadstoffemissionen</b>	<b>34</b>
a) Schadstoffe von "Uralt-Technik"-Motoren im Lande- und Startzyklus („full rich“)	34
b) Schadstoffe im Reiseflug (beim oder nahe beim EGT Maximum)	37
c) Emissionen in Flugplatzrunden ("Ural-Technik" Motoren)	38
d) Emissionen im Lande- und Startzyklus	39

e) Emissionen im Reiseflug	40
f) Emissionen eines modernen Flugdieselmotors – ein Vergleich	41
g) Anteil der Flugzeug-Kolbenmotoren am Total der Luftfahrtmissionen	42
<b>2.3 Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen optimieren</b>	<b>43</b>
<b>2.3.1 “Uralt Technik” Benzinmotoren</b>	<b>43</b>
a) Einsatz von unverbleitem AVGAS	
b) Tiefstmögliche CO <sub>2</sub> Emissionen im Reiseflug (Leistung, Geschwindigkeit, Flughöhe)	43
c) Bedienung der manuellen Gemischverstellung (Steigflug, Reiseflug, Sinkflug/Anflug)	49
<b>2.3.2 Wahl der Motorentechnologie</b>	<b>50</b>
a) FADEC für Benzinmotoren	50
b) Turbodieselmotor	50
<b>3. Ausblick – geplante zukünftige Arbeiten</b>	<b>51</b>
<b>3.1 Anzahl der gemessenen Motoren</b>	<b>51</b>
3.1.1 „Uralt-Technik“-Motoren und neue Motorenkonzepte	51
3.1.2 Mit FADEC modernisierte „Uralt-Technik“-Motoren	51
<b>3.2 Unverbleites AVGAS</b>	<b>51</b>
<b>3.2 Emissionsdaten für Helikopterturbinen und kleine “Turbofans”</b>	<b>52</b>
<b>3.3 Internationale Aktivitäten</b>	<b>52</b>
<b>4. Zusammenstellung von Abkürzungen und Begriffen</b>	<b>53</b>
<b>5. Quellen</b>	<b>55</b>
<b>Anhänge mit Detaildokumentation (auf Englisch)</b>	
<b>Appendix 1: Measurement System</b>	
a) Minimum requirements met by FOCA low cost gas measurement system	3
b) Measurement Method	3
c) Measured Gaseous Emissions	3
d) Ranges	3
e) Illustration of FOCA low cost gas measurement system	4
f) Measurement systems for total HC measurements (certification standard)	5
g) Measurement systems for comparative gas measurements (certification standard)	5
h) Measurement system for nanoparticle measurements (Appendix 4)	6
<b>Appendix 2: Documentation of in-flight Measurements</b>	
<b>1. The first in-flight tests</b>	<b>3</b>

1.a) Preparation of aircraft HBEYS	3
1.b) Calculated emission factors for first test flight with HBEYS	5
1.c) Discussion and general explanations	6
<b>2) Standard Flight Test Programme</b>	<b>7</b>
<b>3) HBEYS (Carburated Engine Lyc O-360 Series)</b>	<b>8</b>
3.a) Results for simulated aerodrome circuits	8
3.b) Discussion	11
3.c) HC emission factors at flight idle	12
3.d) Discussion	13
3.e) Additional high altitude circuit flight testing	14
3.f) Discussion	15
3.g) Inventory: Total emissions in aerodrome circuits at different flight altitudes	15
3.h) Full power and approach power settings	16
3.i) Climb power and approach power settings	18
3.j) Cruise power settings	20
<b>4) HBKEZ (Fuel Injected Engine Lyc IO-360 Series)</b>	<b>22</b>
4.a) Results for simulated aerodrome circuits	25
4.b) Discussion	27
4.c) Full power and approach power settings	27
4.d) Take-off, climb and approach power settings with mixture “full rich”	29
4.e) Discussion	30
4.f) Take-off, climb and approach power settings with mixture adjustment	31
4.g) Discussion	33
4.h) Inventory: Standard flight emission measurement	33
<b>5) HBKIA (Fuel Injected Engine TCM IO-550 B)</b>	<b>36</b>
5.a) Results for aerodrome circuits	39
5.b) Discussion	43
5.c) Inventory: Total emissions of HBKIA in aerodrome circuits	43
5.d) Discussion	44
5.e) Additional high altitude circuit flight testing	44
5.f) Discussion	46
5.g) Inventory: Total emissions of HBKIA in the low and high altitude aerodrome circuit	47
5.h) Discussion	47
5.i) Full power settings	47
5.j) Discussion	50
5.k) Climb power settings	50
5.l) Approach power settings	53
5.m) Standard flight profile emission measurement	55
5.n) Discussion	57
5.o) Inventory: Total emissions of HBKIA in standard flight, defined in 5.m)	59
5.p) Emissions summary for a HBKIA mission, defined in 5.m)	64

<b>6) HBHFX (Carburated Engine Lyc O-320 Series)</b>	<b>64</b>
6.a) HBHFX high accuracy in-flight measurements: Installation of OBS2200	64
6.b) Real time emission mass determination during flight	70
6.c) OBS2200 confirms typical emission factors for Lycoming carbureted engines	75
6.d) OBS2200 time trend chart and confirmation of high HC at flight idle	76

### **Appendix 3: Ground Measurement Power Settings**

<b>1. The problem of piston engine power definitions</b>	<b>3</b>
<b>2. Theoretical power calculation</b>	<b>3</b>
<b>3. Engine manifold pressure (MAP) and RPM for power determination</b>	<b>3</b>
<b>4. Correlation of fuel flow and propeller power</b>	<b>4</b>
<b>5. Adjustment of ground measurement power settings (Fuel Flow Method)</b>	<b>7</b>
5.1 Step 1: Comparison of in-flight and static ground measurements of HBKEZ (example)	7
5.2 Step 2: Power setting methodology for static ground measurements	8
5.2.1 Determination of maximum fuel flow	8
5.2.2 Power settings other than maximum propeller power	9
5.3 Step 3: Application of the power setting methodology (step 2)	9
5.3.1 Comparison of ground and later in-flight measurements	11
5.3.2 Adjustments to the fuel flow method for complex aircraft/engines	14
5.3.3 Temperature corrections for normally aspirated carburetted piston engines	15
<b>6. Recommended ground measurement power setting procedures for emission tests</b>	<b>17</b>
6.1 Selection of methodology	17
6.2 Procedure for determination of maximum fuel flow	17
6.2.1 Fuel flow calibration	17
6.2.2 Preparing the aircraft for a maximum fuel flow (and emission) measurement	18
6.3 Simple fuel flow method	19
6.3.1 Fuel flow for all modes	19
6.3.2 Recommended procedure	20
6.4 Combined MAP & fuel flow method	21
6.4.1 Preparations	21
6.4.2 Recommended procedure	22
<b>7. Example for measurement documentation</b>	<b>23</b>

### **Appendix 4: Nanoparticle Measurements**

<b>1. Background, motivation and project partners</b>	<b>3</b>
1.1 Research programme	3
1.2 Research goals	3
<b>2. General results for nanoparticle emissions of an aircraft gasoline engine, running under rich air/fuel conditions (AVGAS 100 LL)</b>	<b>3</b>
2.1 Preparations	3

2.2 SMPS™ system layout and description for particle measurements	4
2.3 Results	6
2.4 Picture documentation of first non-volatile nanoparticle measurements	9
<b>3. Looking for particle emission improvements: First tests with unleaded AVGAS (AVGAS 91/96 UL)</b>	<b>11</b>
3.1 Introduction and description of AVGAS 91/96 UL	11
3.2 Composition of measured AVGAS 100LL (560 mg Pb / liter)	11
3.3 Used aircraft	12
3.4 Results for HBEYS	12
3.5 Conclusion for HBEYS tests	13
3.6 Results for SEKEI	13
3.7 Air/fuel mixture ratio for HBEYS and SEKEI	14
3.8 Discussion	15
3.9 Conclusions for AVGAS 91/96 UL	15
<b>4. Change from SMPS™ to Engine Exhaust Particle Sizer™ (EEPS 3090™) system for aircraft piston engine nanoparticle measurements</b>	<b>15</b>
4.1 Introduction	15
4.2 EEPS™ system description	15
4.3 Application of EEPS™ for aircraft piston engine measurements	16
4.4 EEPS™ results	18
4.5 First conclusions for EEPS™ measurements	19
<b>5. Research for AVGAS 100LL substitution and emission reduction</b>	<b>19</b>
5.1 Test fuels	20
5.2 Test location	20
5.3 Used aircraft	20
5.4 Measurement systems	20
5.5. Power settings	21
5.6 Results	22
5.7 Discussion	31
5.8 First conclusions	32
 <b>Appendix 5: Calculation of Emission Factors</b>	
a) Introduction	3
b) List of abbreviations	3
c) Calculation of EF (Equations used for FOCA ground measurements and data sheets)	3
d) Equations for "low cost" measurement system described in Appendix 1 for AVGAS (used for FOCA in-flight measurements and comparative ground measurements)	4
e) Equations for "low cost" measurement system described in Appendix 1 for DIESEL	6
f) Correction of ambient air temperature influence on normally aspirated piston engines	7
g) Statistical checks	7
h) Fuel flow	7

# 1. Allgemeine Information

## 1.1 Hintergrund und Einordnung der Flugzeug-Kolbenmotoren

Für den Antrieb von Motorflugzeugen gibt es heute im Wesentlichen drei Konzepte:

- Antrieb mit „Turbofan“ (was umgangssprachlich häufig als Jettriebwerk bezeichnet wird),
- Antrieb mit „Turboprop“ (Jettriebwerk, welches einen Propeller antreibt) und
- Antrieb mit Kolbenmotor (welcher einen Propeller antreibt).

Jettriebwerke und Turboprops verbrennen „Jet fuel“ (Kerosin), Flugzeug-Kolbenmotoren fast ausschliesslich Flugbenzin (AVGAS). Der grösste Teil des Flugtreibstoffs wird von grossen Flugzeugen mit entsprechend grossen Triebwerken (meist Turbofans) umgesetzt. Die grossen Triebwerke unterliegen einer Emissionszertifizierung und müssen strenge Grenzwerte einhalten.

Flugzeug-Kolbenmotoren hingegen finden sich fast ausschliesslich in Kleinflugzeugen und haben global gesehen nur einen verschwindend kleinen Anteil am Treibstoffverbrauch. In der Schweiz entspricht der jährliche Treibstoffverbrauch von Flugzeug-Kolbenmotoren ungefähr dem Treibstoffabsatz von drei durchschnittlichen Autotankstellen<sup>4</sup>. Die Emissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren gehen ganzheitlich betrachtet in den übrigen Emissionen eines Landes wie der Schweiz komplett unter und sind deshalb grundsätzlich nicht als signifikantes Problem zu betrachten. Aber gerade deshalb haben deren Schadstoffemissionen bisher kaum interessiert und es wurde international nie als sinnvoll angesehen, diese Motoren (einer vergleichsweise aufwändigen) Emissionszertifizierung zu unterwerfen. Der Nachteil war, dass kaum Informationen über die Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren erhältlich waren. In der Vergangenheit hat dies manchmal zu Problemen geführt, z.B. wenn ein Emissionsinventar eines Flugplatzes für eine Umweltverträglichkeitsprüfung gerechnet werden musste.

Das BAZL hat den gesetzlichen Auftrag, die Schadstoffemissionen *aller* Luftfahrzeuge mit motorischem Antrieb zu prüfen (SR 748.0, LFG Art. 58). Es hat deshalb in Bezug auf Flugzeug-Kolbenmotoren nach einer effizienten Lösung gesucht, um die „schwarzen Löcher“ in der Emissionsdatenbank schrittweise zu stopfen.

Im Herbst 2002 wurde das Projekt ECERT (Emissions-Zertifizierung) in Angriff genommen. Auch wenn im Projektnamen der Ausdruck „Zertifizierung“ vorkommt, war von Anfang an klar, dass es primär darum ging, auf eine kosteneffiziente Art und Weise zu brauchbaren Emissionsfaktoren für solche Motoren zu kommen. Im Rahmen der Projektplanung wurde zuerst die Grössenordnung des Schadstoffbeitrags von Flugzeug-Kolbenmotoren im Verhältnis zu den übrigen Emissionen aus dem Luftverkehr abgeschätzt. Die ersten Hochrechnungen auf der Grundlage von wenigen vorhandenen Daten brachten ein überraschendes Ergebnis zu Tage: Die Kohlenmonoxid- (CO) und totalen Kohlenwasserstoffemissionen (HC) waren im Lande- und Startzyklus im Vergleich zu Grossflugzeugen nicht unbedingt vernachlässigbar. Dies ist folgendermassen erklärbar: Die Triebwerke heutiger Passagierjets verbrennen den Treibstoff (Kerosin) extrem sauber. Auf der anderen Seite gab es im Bereich der Flugzeug-Kolbenmotoren seit Anfang der sechziger Jahre bis vor wenigen Jahren einen kompletten technologischen Stillstand. Schadstoffoptimierung war nie ein Thema. Die primären Konstruktionskriterien wurden durch die bewährte hohe Zuverlässigkeit einfacher Kolbenmotoren, durch das hohe Leistungsgewicht (viel PS pro kg Motor) und durch die Kosten bei kleinen Stückzahlen bestimmt. Als Nachteil resultierten eben hohe spezifische Emissionen. Zudem ist ungefähr die Hälfte der global vorhandenen Flugzeug-Kolbenmotoren auf verbleites AVGAS angewiesen.

Es wurde ersichtlich, dass es sich lohnen würde, ein genaues Bild der Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren zu gewinnen und dass diese Motorenkategorie innerhalb des Systems Luftfahrt ein hohes Potenzial für Emissionsreduktionen aufweist.

Von Anfang an wurde nach kosteneffizienten Lösungen gesucht. Dies wurde einerseits durch den Einsatz von günstigen Abgastestern aus dem Automobilbau ermöglicht (Anhang 1), andererseits

<sup>4</sup> Bericht der Schweizerischen Erdölvereinigung, Juni 2007.

durch den Einsatz von Bundesflugzeugen, auf welche das BAZL direkt Zugriff hat. Primär wurden folgende Flugzeuge eingesetzt: Robin DR400/180 (HBEYS), Robin DR400/500 (HBKEY, HBKEZ) und Raytheon A36 Bonanza (HBKIA). Die Abgasmessungen auf der Grundlage von günstigen Abgastestern (etwa 1/10 der Kosten einer konventionellen Abgasmessanlage) mussten jedoch für die Berechnung von Emissionsfaktoren weiter entwickelt und angepasst werden (Anhang 5). Dazu gehörte auch die Entwicklung von Standmessverfahren, bei denen ein Flugzeug direkt vermessen wird, ohne dass aufwändige Um- und Ausbauten nötig wären (Anhang 3). Eine spezielle Herausforderung bestand zudem in der Tatsache, dass die meisten Flugzeug-Kolbenmotoren beim Betrieb eine manuelle Anpassung des Treibstoff/Luftgemischs erfordern. Die nötigen Grundlagenkenntnisse für eine Standardisierung der Messungen konnten nur durch Abgasmessungen während des Fluges erworben werden (Anhang 2). Diese Messungen führten dann auch zu Erkenntnissen bezüglich einer schadstoffoptimierten Operation von manuell bedienten Motoren. Durch das gewachsene Interesse an Feinstaubemissionen wurde das Projekt zusätzlich mit Feinstaubmessungen ergänzt. Schliesslich wurde nach Vorliegen der ersten Ergebnisse versucht, mit Grundlagenforschung auf eine Schadstoffreduktion hinzuwirken (Anhang 4).

Seit 2003 und durch das EU Forschungsnetzwerk AERONET haben am Projekt folgende Partner mitgearbeitet: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), HJELMCO Oil Inc., BRP-ROTAX GmbH & Co, HORIBA Europe GmbH, TSI GmbH, ALPAIR, Schweizer Luftwaffe, Prospective Concepts AG und GABUS SA.

## 1.2 Hauptzielsetzungen des Projekts

- Entwicklung einer kosteneffizienten Messtechnik für Standmessungen auf freiem Feld zur Bestimmung von gasförmigen Emissionen und Feinstaub.
- Vergleich von Flug- und Standmessungen.
- Bestimmung absoluter Emissionen von einer ganzen Palette von Flugzeug-Kolbenmotoren für die Berechnung von Emissionsinventaren. (Erfassung von kleinen Helikopter- und kleinen Jettriebwerken zu einem späteren Zeitpunkt.)
- Entwicklung von Empfehlungen zum operationellen Betrieb von Kolbenmotoren mit manueller Gemischverstellung, welche die Triebwerklebensdauer und die Schadstoffemissionen berücksichtigen.
- Falls machbar, Verwendung der Ergebnisse aus der Grundlagenforschung für die Entwicklung einer kostengünstigen Emissionszertifizierung kleiner Motoren.
- Unterstützung der Grundlagenforschung, um den vollwertigen Ersatz von verbleitem durch unverbleites Flugbenzin (AVGAS, nicht Autobenzin) voranzutreiben und die Schadstoffemissionen zu reduzieren.



## 2. Zusammenfassung der Resultate

### 2.1 BAZL-Datenblätter und ihre praktische Anwendung

#### 2.1.1 Allgemeine Methode für die Emissionsberechnung

##### Definition von Leistungsstufen (Englisch „mode“) für Flugzeug-Kolbenmotoren

Typische Leistungseinstellungen wurden durch Flugtests ermittelt (Anhang 2). Statische Messungen am Boden wurden an die Ergebnisse aus den Flugtests angepasst. Die Tabelle 1 zeigt fünf Leistungsstufen (mode): Start (Take-off), Steigflug (Climb out), Reiseflug (Cruise), Anflug (Approach) und Rollen (Taxi). Für jeden dieser „Mode“ zeigt die Tabelle typische Leistungswerte, welche für statische Messungen am Boden verwendet wurden (Details Anhang 3). Alle BAZL-Daten, welche aus statischen Bodenmessungen an den Flugzeugen gewonnen wurden, beziehen sich auf diese vorgeschlagenen Leistungsstufen und -werte.

Tabelle 1: Leistungsstufen

Mode	% of max. Propeller HP
Take-off	100
Climb out	85
Cruise	65
Approach	45
Taxi	Operator's Manual

##### Berechnung der Emissionen eines Flugzeugs im Nahbereich eines Flugplatzes. Lande- und Startzyklus (Englisch: „landing and take-off cycle“ LTO)

Anzahl Triebwerke \*  
(Roll Zeit \* Roll Treibstoffdurchfluss \* Roll Emissionsfaktor +  
Start Zeit \* Start Treibstoffdurchfluss \* Start Emissionsfaktor +  
Steigflug Zeit \* Steigflug Treibstoffdurchfluss \* Steigflug Emissionsfaktor +  
Anflug Zeit \* Anflug Treibstoffdurchfluss \* Anflug Emissionsfaktor)

##### Berechnung der Emissionen eines Flugzeugs im Reiseflug

Anzahl Triebwerke \* Reiseflug Zeit \* Reiseflug Treibstoffdurchfluss \* Reiseflug Emissionsfaktor

#### 2.1.2 Vorgeschlagene Phasenzeiten für die Emissionsberechnung

Für die Anwendung der Gleichungen oben werden in Tabelle 2 folgende Phasenzeiten für Start Zeit, Steigflug Zeit, Anflug Zeit und Roll Zeit vorgeschlagen:

Tabelle 2: Standard-Phasenzeiten für Flugzeug-Kolbenmotoren

Mode	Zeit (Minuten)
Take-off	0.3
Climb out	2.5
Cruise	-
Approach	3
Taxi	12

##### Bemerkungen:

1) Ein Teil der Kolbenmotor-Flugzeuge wird intensiv für Schulungsflüge verwendet, wobei häufig nur in Platzrunden geflogen wird. Für eine Emissionsberechnung müssen dann zwei Bewegungen (= 1 LTO) zu einer Platzrunde zusammengefasst werden. Die angegebenen Phasenzeiten beinhalten eine möglichst repräsentative Mischung aus normalem LTO und Platzrundenflügen, sowie den Unterschieden in den Steigzeiten zwischen verschiedenen Flugzeugmustern. Die Zeiten können sehr landesspezifisch sein.

- 2) Zeit im Reiseflug: Tatsächliche Flugzeit ausserhalb des Lande- und Startzyklus LTO. Kann diese Zeit nicht direkt ermittelt werden, schlägt das BAZL eine mittlere Zeit für den Reiseflug von 20 Minuten vor, gültig für Kleinflugzeuge in Zentraleuropa. Die totale Flugzeit (inklusive LTO) bewegt sich dann auf einem Durchschnittswert von 30 bis 40 Minuten.
- 3) Die Zeitdauer für den Taxi Mode scheint auf den ersten Blick kurz zu sein. Die mittlere Roll- und Standzeit bei laufendem Motor vor dem Abflug und nach der Landung wurde auf kleine Flugplätze abgestimmt, wo der Grossteil der Flugbewegungen von Kolbenmotor-Flugzeugen stattfindet. Auf (Gross-)Flughäfen kann die durchschnittliche Zeit im Taxi Mode höher sein und sollte entsprechend der lokalen Situation angepasst werden.
- 4) Im Steigflug bis auf 3000ft über Grund (Ende des LTO) wird der Grossteil der Motoren bis 200 PS bei "full throttle" betrieben. In diesen Fällen ist es realistischer, das Steigflugsegment des LTO mit den Emissionsfaktoren und dem Triebstoffverbrauch für „take-off“ zu berechnen.

Die Tabelle 3 enthält Phasenzeiten für den Lande- und Startzyklus (LTO), wenn Platzrundenflüge ausgeschlossen werden. Die Verwendung der angegebenen Zeiten wird für die Berechnung eines Emissionsinventars eines Flugplatzes nicht generell empfohlen. Allerdings lassen sich damit die Emissionen im LTO bis 3000ft über Grund mit denjenigen anderer Motorentypen besser vergleichen.

Tabelle 3: Volle LTO Phasenzeiten für Flugzeug-Kolbenmotoren

Mode	Zeit (Minuten)
Take-off	0.3
Climb out	5
Cruise	-
Approach	6
Taxi	16

### 2.1.3 Emissionsfaktoren für den Reiseflug

Die meisten, der heute auf dem Markt erhältlichen Flugzeug-Kolbenmotoren besitzen eine manuelle Verstellung des Treibstoff/Luftgemischs, um eine Anpassung an unterschiedliche Flughöhen (bzw. Dichtehöhen) vornehmen zu können. Die Gemischanpassung muss während des Fluges bei jeder Änderung der Leistungskonfiguration und Flughöhe vorgenommen werden. Die Art und Weise der von Hand getätigten Anpassung führt zu einer größeren Komplexität von Abgasmessungen, insbesondere für die Wahl von repräsentativen Motoreneinstellungen. Die Emissionen können stark variieren, sogar wenn ein und dasselbe Flugzeug mit gleicher Masse, gleicher Dichtehöhe, gleicher Geschwindigkeit, Konfiguration und Fluglage von verschiedenen Piloten geflogen wird. Die Unterschiede stammen von verschiedenen Techniken bei der Gemischeinstellung und sind auch abhängig vom Training der Piloten, der Erfahrung und der vorhandenen Cockpitinstrumentierung (Abschnitte 2.2, 2.3 und Anhang 2). Auf einem BAZL-Datenblatt finden sich die Emissionsfaktoren für den Reiseflug (CRUISE) deshalb in zwei separaten Zeilen, einmal ohne Gemischanpassung und einmal in „standardisierter“ Anpassung:

Tabelle 4: Auszug Datenblatt PF01. CRUISE und CRUISE LEAN Werte. EI = Emissionsfaktoren

MODE	POWER SETTING (%)	TIME (minutes)	FUEL FLOW (kg/s)	EI HC (g/kg)	EI CO (g/kg)	EI NOx (g/kg)	PM (...)
TAKE-OFF	100	0.3	0.0182	12.7	818	6	
CLIMB OUT	85	2.5	0.018	12.3	787	6	
CRUISE	65	60	0.0152	6.9	750	8	
APPROACH	45	3	0.0098	11.5	1055	2	
TAXI	12	12	0.0038	42.6	1123	0	
CRUISE LEAN	65	60	0.0138	5.4	473	23	

**CRUISE:** Messung bei sehr reichem Treibstoff/Luftgemisch mit der Bezeichnung "full rich", d.h. ohne Gemischanpassung. Relativ gut definierter Betriebszustand, aber nur für Vergleich zu gebrauchen.

**CRUISE LEAN:** Zu verwenden für die Berechnung von Reiseflugemissionen. Die Messung erfolgte mit Gemischanpassung auf der Grundlage von Flughandbüchern und Messungen im Flug.

„CRUISE LEAN“-Werte sind das Resultat der am häufigsten praktizierten Gemischeinstellung, bei welcher die Piloten das Treibstoff/Luftgemisch hin zu weniger reichen Verbrennungsbedingungen verschieben. Dies wird oft mit dem Begriff „Leanen“ (Abmagern) bezeichnet, jedoch wird in den meisten Fällen der Motor nicht bei magerem Treibstoff/Luftgemisch betrieben, sondern bei weniger reichem. (Die Details werden in den Abschnitten 2.2, 2.3 und im Anhang 2 erklärt.) Es gibt auch Flugzeug-Kolbenmotoren ohne manuelle Gemischeinstellung. Auf den entsprechenden Datenblättern wird dies sichtbar, indem es keinen Unterschied in den Werten von „CRUISE“ und „CRUISE LEAN“ gibt.

## 2.1.4 Angabe der Emissionen auf einem Datenblatt

Ein BAZL-Datenblatt enthält die berechneten LTO- und die Reiseflugemissionen für eine Stunde Flugzeit in den untersten zwei Zeilen der Datentabelle.

Tabelle 5: Auszug Datenblatt PF01. Treibstoffverbrauch und totale Schadstoffemissionen (HC, CO und NOx) im Lande- und Startzyklus (LTO) sind in hellgelb markiert. Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen für 1 Stunde im Reiseflug (CRUISE) sind grün markiert. Alle Werte für LTO und CRUISE wurden gemäss den Vorschlägen in den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.3 berechnet.

MODE	POWER SETTING (%)	TIME (minutes)	FUEL FLOW (kg/s)	EI HC (g/kg)	EI CO (g/kg)	EI NOx (g/kg)	PM (...)
TAKE-OFF	100	0.3	0.0182	12.7	818	6	
CLIMB OUT	85	2.5	0.018	12.3	787	6	
CRUISE	65	60	0.0152	6.9	750	8	
APPROACH	45	3	0.0098	11.5	1055	2	
TAXI	12	12	0.0038	42.6	1123	0	
CRUISE LEAN	65	60	0.0138	5.4	473	23	
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)			7.53	174	7327	24	
CRUISE 1HOURLY FUEL (kg) or EMISSIONS (g)			49.7	268	23490	1149	

## 2.1.5 Datenqualität und Aussagen zur Genauigkeit

Die BAZL-Datenblätter wurden primär auf Grundlage von Messungen mit dem kostengünstigen STARGAS 898 und dem MEXA 1170 HFID Messsystem erstellt (siehe Anhang 1). Für jeden getesteten Motor wurden in jeder Leistungsstufe minimal drei unabhängige Messungen durchgeführt. Die Varianz der Daten wurde statistisch mit einem T-Test und 90% Vertrauensintervall geprüft (siehe Beispiel am Schluss des Anhangs 3).

Die Partikelmessungen wurden messtechnisch durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Das hauptsächliche Interesse galt den Feinstpartikeln (Nanopartikel) und den Carbonyl-Emissionen. Zur Zeit gibt es keine kostengünstige Variante für solche Messungen. Die ersten Messungen wurden mit HBKEZ durchgeführt und ziemlich genau ein Jahr später wiederholt und reproduziert (siehe Anhang 4 für Details).

Das BAZL sieht den primären Zweck der Datengewinnung in der Anwendung für Emissionsberechnungen. Das Messsystem, welches bisher verwendet wurde (STARGAS 898), repräsentiert ganz klar keinen Zertifizierungsstandard. Jedoch wird die Datenqualität insbesondere auch in Bezug auf die im Anhang 1a/b beschriebenen Anforderungen als ausreichend für die Verwendung in Emissionsinventaren angesehen. Diese Beurteilung gründet auf den folgenden Vergleichen:

Das BAZL hat die eher qualitative Messung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (NDIR HC Messung mit STARGAS 898) durch eine totale HC Messung ergänzt (MEXA 1170 HFID). Ferner wurden Vergleichsmessungen zwischen der elektrochemischen NO-Sonde im STARGAS 898 und einem Chemolumineszenz-Analysator (CLD) für NO<sub>x</sub> durchgeführt. Durch Vergleichsmessungen mit verschiedenen Systemen wurden Korrekturfaktoren für das kostengünstige System bestimmt (siehe Anhang 5 für Details).

Zusätzlich hatte das BAZL die Gelegenheit, ein neu entwickeltes portables System (HORIBA OBS 2200) zu testen. Dieses System erfüllt Ansprüche für qualitativ hoch stehende Emissionsmessungen, welche für Zertifizierungen nötig sind (THC FID, NO/NO<sub>2</sub> CLD, geheizte Messleitung bei 191°C, Abgasvolumenmessung etc, siehe Anhang 1g) Das System ist sehr kompakt, ursprünglich entwickelt und

getestet für Messungen an Bord von Autos und Lastwagen unter realen Betriebsbedingungen. Das System wurde zuerst für Vergleichsmessungen unter statischen Bedingungen am Boden verwendet. Im Projekt ECERT wurde es dann zum ersten Mal in ein Flugzeug eingebaut und in die Luft gebracht. Die während des Fluges emittierten Schadstofffrachten wurden im Sekundentakt zusammen mit Flugzeugposition, Höhe über Meer, Geschwindigkeit über Grund und Flugzeit aufgezeichnet. Daraus konnten vollständige, 4-dimensionale Schadstoffinventare erstellt werden, vom Wegrollen am Flugplatz bis zum Abstellen des Motors am Standplatz. Diese wirklichkeitsnahen Daten wurden mit Ergebnissen der STARGAS Messungen und mit Berechnungsmodellen für den Lande- und Startzyklus verglichen (Details sind im Anhang 2, Kapitel 6 zu finden).

Auf Grund der heutigen Erfahrung schätzt das BAZL die Fehlerbandbreite bei Messungen mit dem kostengünstigen Messsystem (Anhang 1a/b) und bei Verwendung der Berechnungsformeln und Korrekturen von Anhang 5 auf  $\pm 15\%$ . Dieser Wert erscheint für ein kostengünstiges System akzeptabel, insbesondere wenn man bedenkt, dass operationelle (also pilotenbedingte) Aspekte und unterschiedliche Grundeinstellungen der Motoren die Emissionsfaktoren in weit höherem Masse beeinflussen können (Abschnitt 2.2.2 und Anhang 2). In der Beurteilung des BAZL wird das Ergebnis der Emissionen für ein bestimmtes Flugzeug primär durch die Wahl der Betriebspunkte und der realen Operation bestimmt, weniger durch die Genauigkeit des Messsystems. Das BAZL hat versucht, diesem Umstand Rechnung zu tragen, indem Emissionsmessungen im Flug unter realen Bedingungen durchgeführt wurden.

Vier Flugzeuge wurden zur Erarbeitung der Grundlagen eingesetzt (Anhang 2). Die ersten beiden Flugzeuge HBEYS und HBKEZ wurden im Flug getestet. Nachfolgend wurden Emissionsmessungen unter statischen Bedingungen am Boden durchgeführt, bis es gelang, bestimmte typische Flugzustände durch die Wahl der Einstellungen am Boden zu simulieren. Das dritte Flugzeug HBKIA wurde mit Hilfe des vorher mit HBEYS und HBKEZ entwickelten Verfahrens zuerst am Boden vermessen. Die Ergebnisse aus den Bodenmessungen wurden dann mit nachfolgenden Flugmessungen von HBKIA verifiziert (Anhang 3).

Das HORIBA OBS 2200 Messsystem wurde für Quervergleiche mit dem kostengünstigen System verwendet, um die Datenqualität besser abschätzen zu können. Am Boden wurde dazu HBKEZ eingesetzt. In der Luft wurden mit Hilfe von HBHFX real geflogene Emissionsinventare aufgezeichnet.

### 2.1.6 Datenblätter herunterladen

Dieser Bericht, sowie die gesamte Dokumentation (Anhänge) und die verfügbaren Datenblätter können von der BAZL-Webseite heruntergeladen werden.

#### Download link:

<http://www.bazl.admin.ch> ⇒ Für Fachleute ⇒ Umwelt ⇒ Emissionen von Flugzeugtriebwerken

Liste der Abkürzungen, welche in der Motorentabelle verwendet werden:

FOCA UID (Identifikationscode für ein bestimmtes Motorenmuster): Der Code kann als Schlüssel für Berechnungsanwendungen dienen, um Flugzeug- und Motorendaten eindeutig zu verbinden. „P“ steht für Kolbenmotor (piston engine), „F“ steht für BAZL Messung (FOCA).

Rated HP (Nennleistung PS). Herstellerangabe. Die Zahl kann innerhalb von Modellvarianten variieren. Wenn ein bestimmtes Motorenmuster in der Tabelle nicht gefunden werden kann, dienen die Angaben von PS, Verbrennungstechnologie, Kühlsystem und technologischem Alter dazu, das nächstgelegene Muster zu finden.

Piston Engine Model (Typ einer bestimmten Kolbenmotorserie): Um die Anwendung der Tabelle zu erleichtern, ist nur ein Basistyp angegeben. Beispiel: TCM IO-520 A, B, C, D, E, F, J, K & L werden durch den Typ TCM IO-520 repräsentiert. In vielen Fällen sind die Unterschiede in den Emissionsfaktoren zwischen verschiedenen Motorvarianten klein. Die tatsächlich gemessene Variante ist auf dem BAZL-Datenblatt angegeben.

Combustion Technology (Verbrennungstechnologie): Wenn ein bestimmtes Motorenmuster in der Tabelle nicht gefunden werden kann, dient die Angabe der Verbrennungstechnologie dazu, das nächstgelegene Muster zu finden.

Cooling System and Fuel Type (Kühlsystem und Treibstoffart): Wenn ein bestimmtes Motorenmuster in der Tabelle nicht gefunden werden kann, dient die Angabe des Kühlsystems und der Treibstoffart dazu, das nächstgelegene Muster zu finden. Die Feinstaubemissionen sind sehr stark von der Treibstoffart abhängig. Ein Teil der mit AVGAS 100LL gemessenen Motoren dürfen mit unverbleitem Treibstoff betrieben werden. Dies ist in der Datenbank noch nicht ersichtlich.

Technology Age (Technologisches Alter): Wenn ein bestimmtes Motorenmuster in der Tabelle nicht gefunden werden kann, dient die Angabe des technologischen Alters dazu, das nächstgelegene Muster zu finden. Motorentechnologie aus den 60er Jahren ist heute noch am häufigsten vertreten.

Data Source (Datenquelle): Zur Vervollständigung wurden die FAEED-Daten<sup>5</sup>, welche das BAZL bisher verwendet hatte, in die Tabelle aufgenommen. Ein Vergleich mit Messungen im BAZL-Projekt ECERT hat gezeigt, dass die existierenden FAEED-Daten für die Verwendung in LTO-Berechnungen vernünftig erscheinen. Aus diesem Grunde hat sich das BAZL auch darauf konzentriert, die Emissionsdaten vor allem von fehlenden und moderneren Motoren zu bestimmen, um die Daten zu vervollständigen.



Bild 1: Messgeräte im BAZL-Messwagen

<sup>5</sup> FAEED = US Federal Aviation Engine Emissions Databank

## 2.2 Allgemeine Erkenntnisse über die Schadstoffemissionen von Flugzeug-Kolbenmotoren

### 2.2.1 Grundlagen der Verbrennung

#### a) Was geht in den Motor? Zusammensetzung von AVGAS 100LL

AVGAS (AViation GASoline) ist ein komplexes Gemisch von Kohlenwasserstoffen und Zusätzen, welches die Spezifikationen gemäss der US Norm ASTM D-910 einhalten muss. Die Norm ermöglicht einen sicheren Betrieb für den gesamten möglichen Temperatur- und Druckbereich.

Zusätze (Additive):

- Der grösste Teil des erhältlichen AVGAS ist AVGAS 100LL, ein verbleites Benzin. Das „LL“ steht für „wenig Blei“, was eine sehr relative Bezeichnung ist. AVGAS 100LL kann bis zu 0.8 g Bleiverbindungen (tetra ethyl lead) pro kg Benzin enthalten. Der Bleizusatz dient der Erreichung der hohen, flugspezifischen Oktanzahlen von 100/130. Vor vielen Jahrzehnten wurde der Bleizusatz eingeführt, um das Leistungsgewicht der Motoren zu verbessern, indem bei grossvolumigen Zylindern die Kompression erhöht wurde. Das BAZL nimmt an, dass ungefähr 30% der weltweiten Kolbenmotorflugzeugflotte auf ein Benzin mit so hohen Oktanzahlen angewiesen sind. Relativ hohe Verdichtung, suboptimale Treibstoff/Luft-Gemische sowie einschlecht angepasster Zündzeitpunkt führen sonst zu „Klopfen“ (explosionsartige Verbrennung) und Selbstzündung, was einen solchen Motor innert kürzester Zeit zerstören kann.
- Wenn das Benzin verbleit ist, enthält es gleichzeitig eine ähnlich grosse Menge von Etyhlen Dibromid. Diese Substanz wird benötigt, um Bleiablagerungen im Triebwerk möglichst zu verhindern. Ohne diesen sog. „Scavenger“ würden Zündkerzen, Ventile und Ventilstössel viel schneller verbleien. Trotz Scavenger können sich beispielsweise in der Ölwanne während der Lebenszeit eines Motors Bleirückstände von mehr als 1 kg Masse ansammeln. Wie Blei ist das Bromid eine umweltschädigende Substanz, welche als krebserregend gilt und zum Abbau von stratosphärischem Ozon beitragen kann.
- Farbstoffe: Die blaue Farbe in AVGAS 100LL (1,4 – dialkylamino-antraquinone) kann allergische Reaktionen und Hautrötungen hervorrufen.
- Antioxidantien (Verhinderung von Ablagerungen und Sedimentbildung im Tanksystem)
- Vereisungshemmer (optional)
- Zusatz zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit (optional)

Wie Autobenzin enthält AVGAS 100LL geringe Mengen von Benzol, eine giftige Substanz, welche als krebserregend gilt.

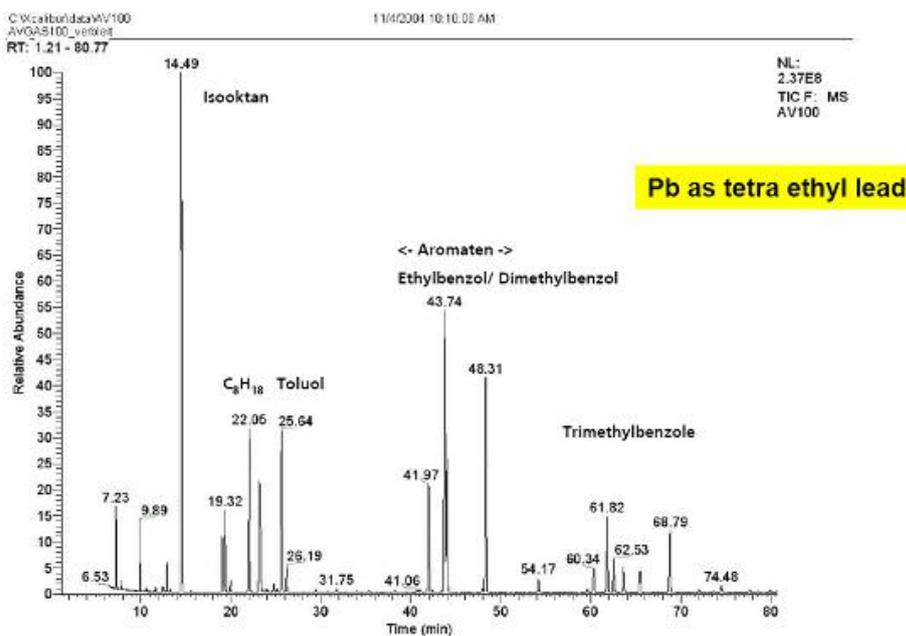


Abbildung 1: Zusammensetzung von AVGAS 100LL, welches für Teile der BAZL-Abgasmessungen verwendet wurde. Die Analyse wurde durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Hilfe von Gaschromatographie und Massenspektrometrie durchgeführt. [C. Wahl / DLR]

Bemerkung: Es gibt im Prinzip sauberere Alternativen zu AVGAS 100LL, sauberer als Autobenzin. Während des Projekts hat das BAZL die Zusammenarbeit mit der schwedischen Firma Hjelmcö Oil aufgenommen, welche ein synthetisch hergestelltes, sehr reines AVGAS produziert. Der Treibstoff erfüllt die ASTM-D910 Normen und könnte ohne Zusatzzertifizierung direkt in einer Vielzahl von Flugzeugen mit Kolbenmotor eingesetzt werden (siehe Anhang 4 für Details).

Es gibt Flugzeug-Motorenkombinationen, welche für die Verwendung von bestimmten Autobenzinsorten (MOGAS) zugelassen sind. In Europa ist MOGAS bleifrei und es kann in entsprechend zugelassenen Flugzeugen zur Emissionsreduktion beitragen. In vielen Fällen wird aber dessen Verwendung in Flugzeugmotoren durch die hohe Bandbreite der möglichen Zusammensetzung und durch einen gewissen möglichen Alkoholgehalt stark eingeschränkt. Nicht nur der Motor (welcher in vielen Fällen nicht das Problem darstellt), sondern die ganze Flugzeugzelle muss für den Einsatz von MOGAS zertifiziert sein. Zusätzliche Anforderungen betreffen vor allem das Treibstoffsystem. MOGAS kann deshalb AVGAS nur in bescheidenem Rahmen ersetzen.

Für theoretische Berechnungen des Verbrennungsprozesses muss aus dem vielfältigen Gemisch von Kohlenwasserstoffmolekülen, welche es im Treibstoff gibt, ein repräsentatives AVGAS- oder MOGAS-Molekül ausgewählt werden. Die Abbildung 2 zeigt eine typische Verteilung der Kohlenstoffzahlen von AVGAS-Molekülen.

Für ein repräsentatives AVGAS-Molekül wird eine Zusammensetzung von **7 Kohlenstoffatomen** und **13 Wasserstoffatomen** angenommen ( $C_7H_{13}$ ). Für alle Standardberechnungen von ausgestossenen Abgasmassen verwendet das BAZL dieses Molekül (siehe auch Anhang 5).

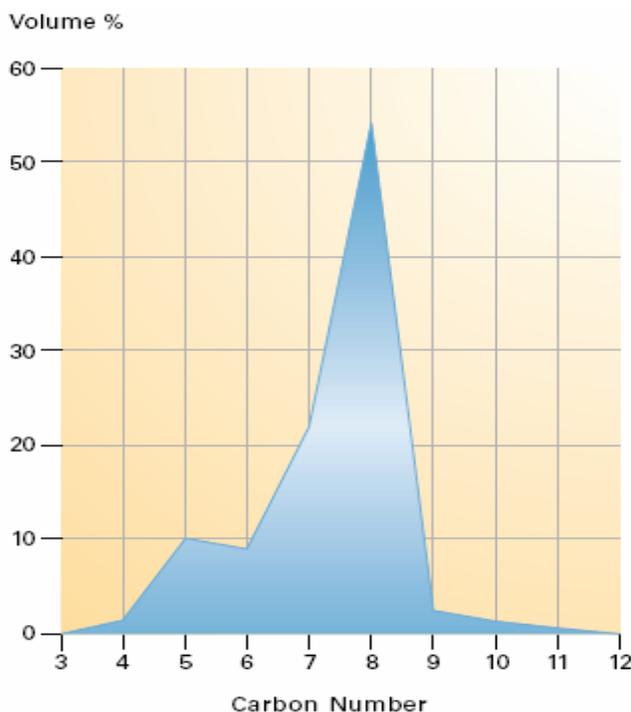


Abbildung 2: Verteilung der Kohlenstoffzahl von Kohlenwasserstoffmolekülen in AVGAS 100LL. [Chevron]

## b) Wie viel Luft braucht es für ein Feuer?

Um ein Feuer zu entfachen, braucht es Treibstoff **und** Luft. Allgemein gilt: Je mehr von beidem genommen wird, desto heisser wird die Flamme. Aber die Verbrennung wird nur im Bereich bestimmter Treibstoff/Luft-Verhältnisse „optimal“ sein.

Das **Verbrennungsgemisch** innerhalb eines Zylinders, bei dem das Treibstoff/Luft-Verhältnis weder einen Überschuss von Treibstoff noch einen Überschuss an Luft aufweist, heisst **stöchiometrisch**. Unter dieser Bedingung sind alle reagierenden Teilchen in der für die chemische Reaktion optimalen Menge vorhanden. Dabei wird die **grösstmögliche Verbrennungswärme für eine bestimmte Menge angesaugter Luft** freigesetzt.

Bei stöchiometrischem Gemisch hat ein Zylinder seine **maximale Abgastemperatur** (peak exhaust gas temperature, peak EGT). „**Peak EGT**“ kann als Punkt der Gemischeinstellung für **maximale Verbrennungswärme** bezeichnet werden.

Um die Menge Luft abzuschätzen, welche nötig ist, um eine bestimmte Menge an Treibstoff stöchiometrisch zu verbrennen, braucht es eine chemische Reaktionsgleichung. Es gilt zu beachten, dass in einem Verbrennungsprozess die Masse aller reagierenden Teilchen erhalten bleibt. Moleküle können verändert werden, aber nichts geht bei einer Verbrennung verloren. Treibstoff- und Luftmoleküle werden unter Freisetzung von Wärmeenergie zum Teil in andere Moleküle umgewandelt. Die gesamte Masse der Teilchen am Auspuff ist jedoch gleich der Masse der Teilchen vor der Verbrennung.

#### **Berechnung mit Hilfe der Reaktionsgleichung für vollständige Verbrennung:**

1 C<sub>7</sub>H<sub>13</sub> (AVGAS) + 10.25 O<sub>2</sub> (Luftsauerstoff) + 39 N<sub>2</sub> (Luftstickstoff) reagieren zu („**verbrennen**“ zu):  
7 CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) + 6.5 H<sub>2</sub>O (Wasserdampf) + 39 N<sub>2</sub>

Die Gleichung mit der Anzahl der Moleküle wird mit Hilfe von Molmassen in eine Massengleichung umgewandelt. Für die Stoffmenge von 1 Mol AVGAS erhalten wir:

**97.18g C<sub>7</sub>H<sub>13</sub> + 328.0g O<sub>2</sub> + 1092g N<sub>2</sub> reagieren zu 308.07g CO<sub>2</sub> + 117.13g H<sub>2</sub>O + 1092g N<sub>2</sub>** (1)

Daraus können wir ablesen, dass 97.18 g Treibstoff (AVGAS) mit total 1420 g Luft (O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>) reagiert. Dies entspricht einem Massenverhältnis von 1 : 14.6

Die Folgerung ist, dass für die vollständige Verbrennung von 1 kg Treibstoff rund 15 kg Luft nötig sind!

**Verhältnis Treibstoff/Luft 1kg / 15 kg = 0.067** (für stöchiometrische Verbrennung)

#### **c) Was kommt aus dem Auspuff?**

Aus der chemischen Massengleichung (1) können wir auch sehen, dass bei vollständiger Verbrennung gilt:

1 kg Treibstoff (AVGAS) produziert

- 3.17 kg CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid)
- 1.21 kg H<sub>2</sub>O (Wasserdampf)

CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O sind keine Schadstoffe, aber beide atmosphärische Treibhausgase, weil sie die Eigenschaft haben, Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) zu absorbieren. Der grösste Teil des N<sub>2</sub> (78Vol% Anteil in der Umgebungsluft) geht ohne Veränderung durch den Verbrennungsprozess.

**Die Abgase bestehen hauptsächlich aus heisser Luft (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O).**

Neben heisser Luft werden Schadstoffe gebildet.

#### **Ursachen für die Produktion von Schadstoffen können sein:**

##### **Sauerstoffmangel:**

Wenn es zu wenig Sauerstoff gibt, um das C im Treibstoff zu CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid) zu verbrennen, hört die Reaktion bei der Bildung von **CO (Kohlenmonoxid)** auf.

Der Treibstoff kann nicht vollständig zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O (Wasserdampf) reagieren und ein komplexes Gemisch von Kohlenwasserstoffmolekülen (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) wird ausgestossen. Die Kurzschreibweise für diese Moleküle lautet **HC**.

### Hohe Verbrennungstemperaturen und –drücke mit kurzen chemischen Reaktionszeiten:

Der Stickstoff ( $N_2$ ), welcher in der Umgebungsluft vorhanden ist (78Vol%) und der Sauerstoff ( $O_2$ ) aus der Umgebungsluft (21Vol%) beginnen bei der Verbrennung (im Zylinder) miteinander zu reagieren und bilden Stickoxide ( $NO$  and  $NO_2$ ), welche oft als  $NO_x$  bezeichnet werden.

### Schadstoffe: CO, HC, $NO_x$ , Russ, Blei- und Bromidverbindungen (AVGAS 100LL)

Das BAZL konzentrierte sich auf die Messung der CO-, totalen HC- und  $NO_x$ -Emissionen. Sie werden in den BAZL-Datenblättern für die einzelnen Motoren ausgewiesen. Russ- und andere Partikelmessungen wurden durch das Institut für Verbrennungstechnik des DLR in Stuttgart in gemeinsamen Projekten durchgeführt (Anhang 4).

#### d) Eigenschaften von Schadstoffen

##### Kohlenmonoxid (CO):

- Giftiges Gas, verhindert die Aufnahme von Sauerstoff ins Blut, da es sich besser an die roten Blutkörperchen bindet als Sauerstoff. Bei hoher CO-Konzentration kann beim Menschen deshalb der Erstickungstod eintreten, auch wenn sonst genügend Sauerstoff vorhanden wäre.
- Chemisch instabil, wird in der freien Atmosphäre normalerweise innerhalb Tagen zu  $CO_2$  umgewandelt.

##### Kohlenwasserstoffe (HC):

- Hunderte möglicher H-C-Moleküle (z.B. Formaldehyd) mit unterschiedlichen gesundheitlichen Auswirkungen, einige Moleküle gelten als krebserregend.
- Einige werden mit Hilfe von Sonnenlicht (UV) in sog. Radikale (sehr reaktionsfreudige Moleküle) umgewandelt, welche zur Bildung von Bodenozone beitragen können. In der Troposphäre kann Ozon sehr stark mit verschiedenen Substanzen reagieren. Bodenozone ist deshalb in kleinsten Konzentrationen ein „Putzmittel“ (+), allerdings ist es bei erhöhten Konzentrationen selber für Pflanzen, Tiere und Menschen giftig (-).

##### Stickoxide ( $NO_x$ ):

- $NO$  wandelt sich in der freien Atmosphäre innerhalb Minuten bis Stunden in  $NO_2$  um.
- $NO_2$  (gelbliche Farbe) ist giftig für das Atmungssystem.
- Mit Sonnenlicht (UV) tragen  $NO$  und  $NO_2$  stark zu den Bildungsprozessen von Bodenozone bei.

## 2.2.2 Einstellungen des Treibstoff/Luftgemischs

### a) Dominierende “Uralt-Technik” erfordert eine Gemischverstellung von Hand

Rund 70% der im globalen Markt vorhandenen Flugzeug-Kolbenmotoren weisen folgende allgemeine Konstruktionsmerkmale auf:

- Gegenüberliegende Zylinder in Boxeranordnung.
- Grosses Zylindervolumen, relativ geringe Drehzahl, kein Untersetzungsgetriebe zum Propeller (Direktantrieb).
- Luftgekühlt (direkt durch Luftkühlung der Zylinder, indirekt durch Luftkühlung des Ölkühlers)
- Vergaser, welche auf Veränderungen in den Umgebungsbedingungen oder im Verbrennungsprozess nicht selbsttätig reagieren.
- Einspritzsysteme, welche auf Veränderungen in den Umgebungsbedingungen oder im Verbrennungsprozess meist nicht selbsttätig reagieren.
- Einspritzsysteme ohne direkte zeitliche Abstimmung mit den Ventilbewegungen der Zylinder.
- Fixer Zündzeitpunkt, ohne Berücksichtigung der Motorendrehzahl (ausser beim Anlassen).
- Alles mechanisch, keine elektronischen Komponenten.

Dieses allgemeine Konzept, welches hier mit “Uralt-Technik” bzw. “konventionell” bezeichnet wird, hat sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert. Dazu beigetragen haben vermutlich das sehr gute Verhältnis von Motorleistung zu Gewicht, die „Einfachheit“ (verglichen mit einem heutigen Automotor) sowie eine sehr gute Zuverlässigkeit und Lebensdauer solcher Motoren. Im Unterschied zu einem Automotor muss ein Flugzeugmotor ein aufwändiges und entsprechend teures Zertifizierungsverfahren durchlaufen, welches der Flugsicherheit dient. Gleichzeitig ist der Markt für Flugzeug-

Kolbenmotoren vergleichsweise klein. Diese Situation ist völlig verschieden von der Situation für Automotoren, welche in Millionenstückzahlen produziert werden. Ein zusätzliches Handicap besteht durch verbleites AVGAS, welches zur Zeit noch nicht vollständig ersetzt werden kann und welches die Installation von automatischen Gemischregelungen sehr schwierig macht.

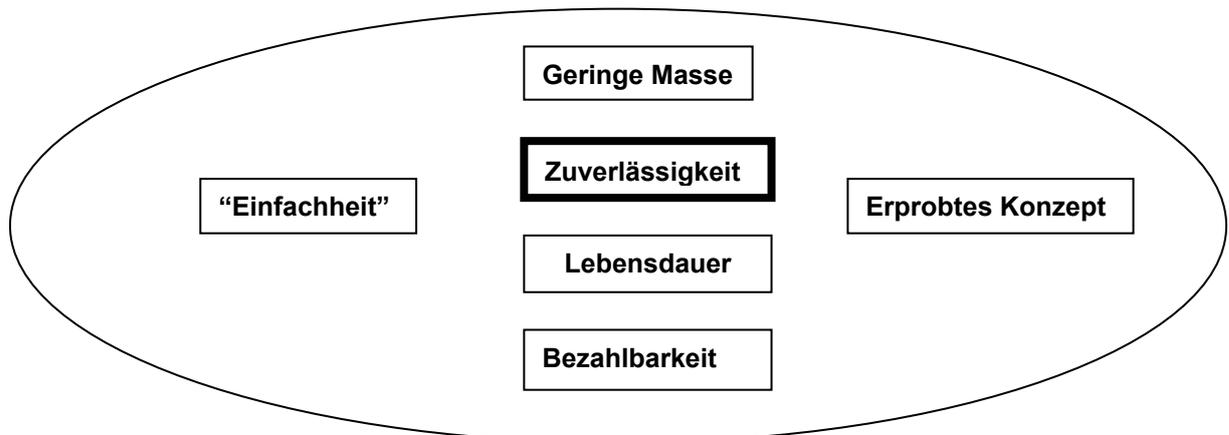


Abbildung 3: Grundlegende Konstruktionskriterien eines Flugzeug-Kolbenmotors mit "Uralt-Technik".

Die Nachteile der "Uralt-Technik" sind:

- **Hoher spezifischer Treibstoffverbrauch** (vor allem bei hoher Leistung)
- **Hohe spezifische Emissionen**

Zunehmende Flughöhe (abnehmende Luftdichte) erhöht das Verhältnis Treibstoff zu Luft (bei einem Motor ohne Turbolader).

Weil Vergaser- und Einspritzsysteme von "Uralt-Technik"-Flugzeug-Kolbenmotoren keine direkten Sensoren für die Luftdichte und das entstehende Treibstoff/Luftgemisch haben, **muss das Treibstoff/Luftgemisch manuell angepasst werden**. Ohne Korrektur läuft der Motor bei abnehmender Luftdichte zunehmend mit treibstoffreichem Gemisch. Sehr hohe Schadstoffemissionen und Treibstoffverschwendung sind die Folge. Schliesslich kann der Motor sogar absterben.



Bild 2: Gashebel (schwarz), Propellerverstellung (Blau) und Gemischhebel (Rot).

**Der Gemischhebel („Mixer“) steuert zusätzlich zum Gashebel („Throttle“):**

- Die Leistung des Motors
- Die Temperatur des Motors
- Die Schadstoffemissionen
- Den spezifischen Treibstoffverbrauch

Die Position des Gemischhebels (Mixer) spielt im Zusammenhang mit Emissionen eine zentrale Rolle. Deshalb erfordert das "Mischen" beispielsweise von Seite der Piloten genaue Kenntnis der Funktionsweise und der Auswirkungen. Derselbe Anspruch muss an Personen gestellt werden, welche Abgasmessungen an Flugzeug-Kolbenmotoren vornehmen.

## b) Die Definition von reichem und magerem Gemisch mit der Luftzahl Lambda ( $\lambda$ )

Es hat sich als praktisch erwiesen, das aktuell in einem Motor vorhandene Luft/Treibstoffgemisch mit dem stöchiometrischen Luft/Treibstoffgemisch in Beziehung zu setzen. Bei Automotoren (Benzinmotoren) mit Katalysator wird manchmal von einer Lambda-Sonde gesprochen, welche zur Regelung des Luft/Treibstoffgemischs verwendet wird. Die Lambda Sonde misst den Sauerstoffanteil im Abgas. Das Signal der Sonde wird gebraucht, um das Luft/Treibstoffgemisch in den Zylindern möglichst nahe am stöchiometrischen Punkt zu halten. Wenn das Luft/Treibstoffgemisch stöchiometrisch ist, so ist Lambda = 1. Wenn in der Verbrennung ein Treibstoffüberschuss herrscht (Sauerstoffmangel), so ist Lambda kleiner als 1. Bei Sauerstoffüberschuss ist Lambda grösser als 1. Das Wort Lambda ist übrigens nichts anderes als das griechische kleine L, in Griechisch geschrieben als  $\lambda$ .

**Definition von  $\lambda$  :**

$$\lambda = \frac{\text{Luftmasse} : \text{Treibstoffmasse} \quad (\text{gemessen})}{\text{Luftmasse} : \text{Treibstoffmasse} \quad (\text{stöchiometrisch})}$$

für AVGAS :

$$\lambda = \frac{\text{Luftmasse} : \text{Treibstoffmasse} \quad (\text{gemessen})}{14.6 \quad (\text{stöchiometrisch})}$$

Bemerkung :

$\lambda > 1$  mageres Gemisch (lean),  $\lambda < 1$  reiches Gemisch (rich)

**“lean” = treibstoffarmes bzw. mageres Gemisch (Sauerstoffüberschuss)**  
**“rich” = treibstoffreiches bzw. reiches Gemisch (Sauerstoffmangel)**

**Beispiel:** Wenn ein Vergaser Luft und Treibstoff im Verhältnis von 10 kg zu 1 kg mischt, dann ist

$$\lambda = (10 : 1) : (14.6 : 1) = 10 : 14.6 = 0.68 \Rightarrow \text{Der Motor läuft reich, mit Sauerstoffmangel.}$$

## c) Die manuelle Gemischverstellung („Mixer“) steuert den Wert von Lambda

Die Abbildung 4 zeigt Werte für Lambda in Abhängigkeit von der prozentualen Dauerleistung eines TCM IO-550B Motors. Der grau schattierte Bereich zeigt die Region, in welcher sich Lambda bei der Gemischeinstellung „full rich“ unter Standardbedingungen (ISA) im gesamten angegebenen Leistungsbereich des Motors bewegt. Im Taxi Mode läuft der Motor bei Lambda = 0.7 und wird dann etwas reicher bis 20% Dauerleistung. Mit zunehmender Leistung – wenn der Gemischhebel auf Stellung „full rich“ belassen wird – läuft der Motor ein wenig weniger reich (Lambda = 0.78). Gegen die maximale Dauerleistung hin läuft der Motor wieder etwas reicher mit einem Lambda um 0.74.

Wenn der Gemischhebel bei einer festen Stellung des Gashebels zurückgezogen wird, so **steigt der Wert von Lambda an. Der Motor läuft weniger und weniger reich.** (Das Ziehen des Gemischhebels bewirkt in vielen Fällen eine Reduktion des Benzindrucks.) Dies wird am Beispiel einer Einstellung von 45% Dauerleistung gezeigt (Abbildung 4, rote Linie). Bei immer noch reichem Gemisch wird beim Zurückziehen des Gemischhebels zuerst der Punkt für beste Leistung erreicht (fixe Gashebelstellung). Danach wird das Gemisch stöchiometrisch, was zum Maximum der Abgastemperatur (peak EGT) führt. Wird dieser Punkt überschritten, läuft der Motor mager und der Punkt für beste Wirtschaftlichkeit (minimaler Verbrauch pro Leistung) wird erreicht. Beim Weiterziehen des Gemischhebels beginnt der Motor rau zu laufen und kann absterben. Am Endanschlag des Gemischhebels wird die Treibstoffzufuhr unterbrochen und der Motor stellt definitiv ab.

Es muss beachtet werden, dass sich die Leistung des Motors während der Verstellung des Gemischhebels ändert, auch wenn der Gashebel nicht angerührt wird. Für die dokumentierte Messung wurde der Gashebel deshalb ebenfalls angepasst, um die Leistung des Motors konstant zu halten. Das BAZL

hat zudem für diese Messung eine tiefe Leistung gewählt, um die Motortemperaturen des am Boden stehenden luftgekühlten Motors innerhalb der Limiten zu halten. Die Veränderungen von Lambda in Abhängigkeit von der Stellung des Gemischhebels sind jedoch grundsätzlich für alle Leistungseinstellungen gültig und auch nicht auf das gemessene Motorenmuster beschränkt.

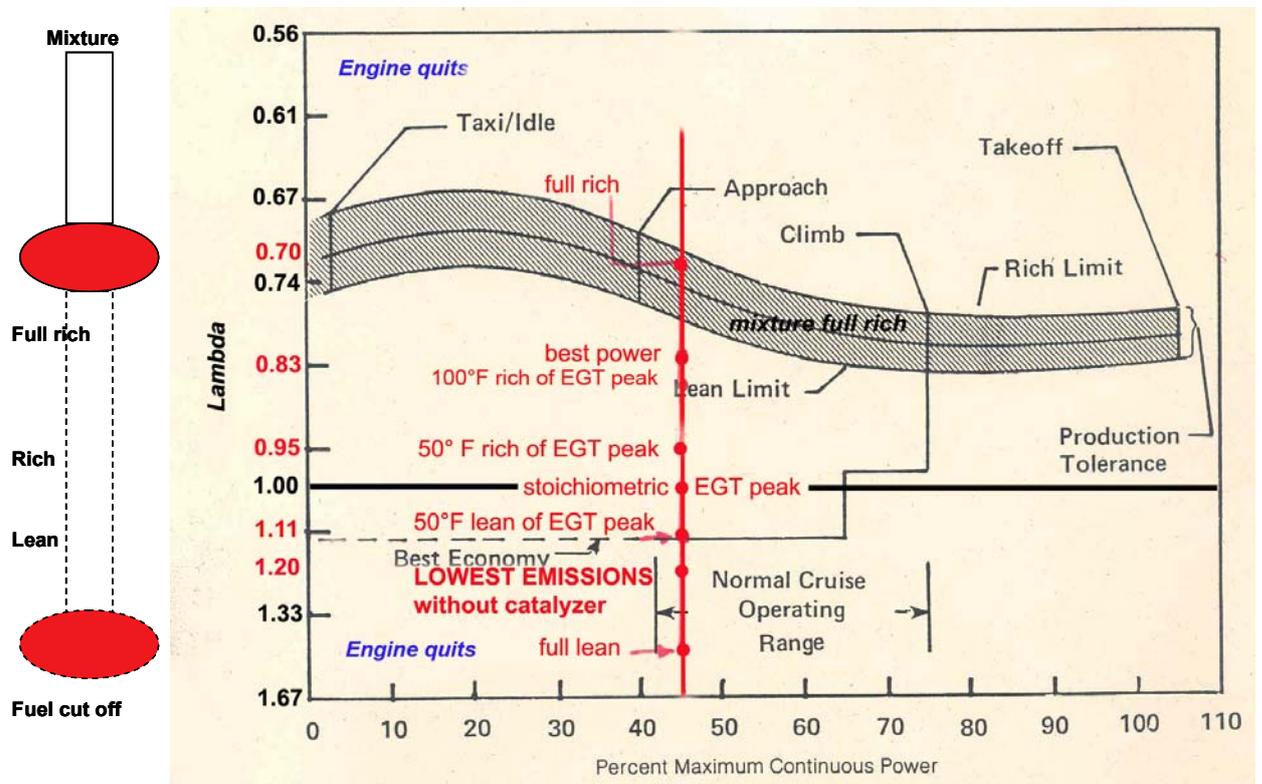


Abbildung 4: Werte für Lambda in Abhängigkeit von der Position des Gemischhebels, von „full rich“ (vollreich) bis „lean“ (mager), gemessen mit einem TCM IO-550B Motor bei 45% Dauerleistung. Das Berechnungsverfahren für Lambda ist im Anhang 5 beschrieben. EGT = Abgastemperatur.

#### d) Typische Werte für Lambda

$\lambda = 1$	„Peak EGT“ (maximale Abgastemperatur, Gemischeinstellung für maximale Verbrennungswärme)
$\lambda = 0.85$	zirka 100°F „rich of peak EGT“ (Gemischeinstellung für maximalen Verbrennungsdruck, grösste Leistung bei fixer Gashebelstellung)
$\lambda = 0.95$	zirka 25 - 50°F „rich of peak EGT“ (immer noch ein reiches Gemisch, oft im Reiseflug verwendet)
$\lambda = 1.15$	zirka 50°F „lean of peak EGT“ (mageres Gemisch, tiefster spezifischer Treibstoffverbrauch)

### e) Einfluss der Gemischhebelstellung auf Motorentemperaturen und Leistung

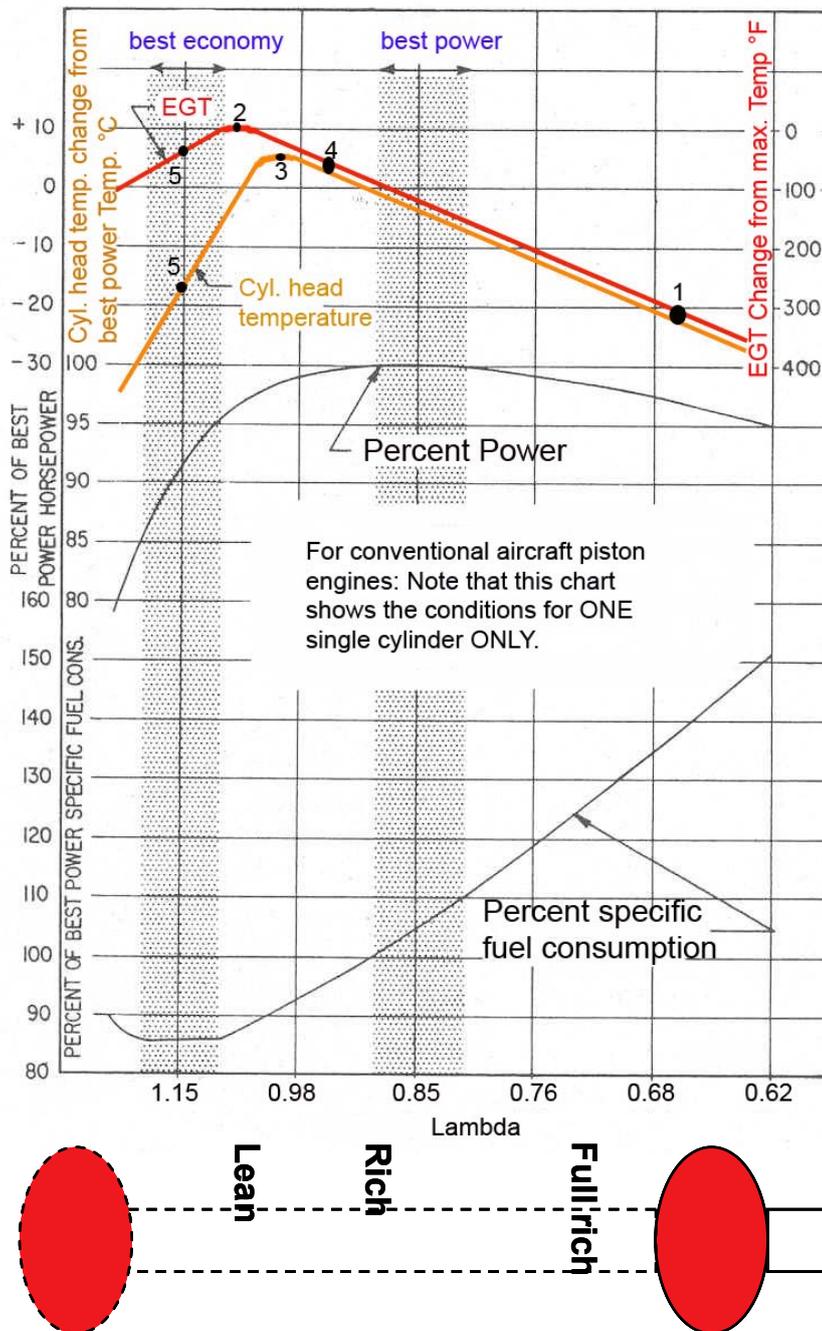


Abbildung 5: Einfluss der Gemischhebelstellung (Lambda) auf Temperatur, Leistung und spezifischen Treibstoffverbrauch bei einer fixen Gashebelstellung. Bemerkung: Die Grafik bezieht sich auf die Zustände in einem einzigen Zylinder des Motors, nicht auf den Betriebszustand des Motors als Ganzes. 1 = „full rich“, 2 = „peak EGT“, 3 = maximum CHT, 4 = Standard Einstellung im Reiseflug, 5 = mageres Gemisch. CHT = Zylinderkopftemperatur, „best power“ = beste Leistung, „best economy“ = geringster spezifischer Treibstoffverbrauch.

[Mit Anpassungen entnommen aus Textron™ Lycoming™]

#### Diskussion:

Wird bei einer fixen Gashebelstellung der Gemischhebel aus der Stellung „full rich“ (Position 1) langsam zurückgezogen, so steigen die Zylinderkopftemperatur (CHT), die Abgastemperatur (EGT) und die Leistung an und der spezifische Treibstoffverbrauch<sup>6</sup> (*SFC*) wird besser.

Bei einer Abgastemperatur (EGT) von rund 100°F „rich of peak EGT“ wird die Einstellung für beste Leistung erreicht.

<sup>6</sup> Der spezifische Treibstoffverbrauch *SFC* misst die benötigte Treibstoffmenge zur Erzeugung einer bestimmten Leistung.

Beim Weiterziehen des Gemischhebels bleibt das Luft/Treibstoffgemisch zunächst immer noch reich und sowohl CHT als auch EGT nehmen weiter zu. **Bei 50° bis 25°F „rich of peak EGT“ (Position 4) liegt die CHT im Bereich des Maximums (für eine bestimmte fixe Gashebelstellung).** Interessanterweise ist dies die am meisten gewählte Gemischeinstellung für den Reiseflug bei „Uralt-Technik“-Flugzeug-Kolbenmotoren. Diese Einstellung wird in etwa auch erreicht, wenn bei Flugzeugen mit Festpropeller und ohne EGT Anzeige die Regel „Fühl beim Mixen den Drehzahlabfall und stosse den Gemischhebel wieder 1 cm nach vorne“ angewendet wird (Abschnitt k).

Wird der Gemischhebel aus der vorgängig beschriebenen Position weiter zurückgezogen, so wird das Luft/Treibstoffgemisch stöchiometrisch und die Abgastemperatur wird maximal (peak EGT, Position 2). Die CHT ist schon ein wenig gefallen. Die Leistung ist ebenfalls leicht zurückgegangen und der *SFC* hat sich weiter verbessert.

**Beim Weiterziehen des Gemischhebels über „peak EGT“ hinaus,** wird das Luft/Treibstoffgemisch mager ( $\lambda > 1$ ). Die Abgastemperatur nimmt ab, **die Zylinderkopftemperatur (CHT) nimmt deutlich ab.** Die Leistung geht ebenfalls deutlich zurück und der spezifische Treibstoffverbrauch (*SFC*) erreicht seinen besten bzw. tiefsten Wert. Der Rückgang der Zylinderkopftemperatur bei magerem Gemisch scheint auf den ersten Blick der praktischen Erfahrung von Piloten und Mechanikern zu widersprechen, wonach Motoren (bzw. einzelne Zylinder) bei mageren Gemischeinstellungen thermisch überlastet werden können. Die Analyse des Autors zu dieser Problematik wird im Abschnitt j) diskutiert.

#### **Beste Leistung (best power):**

- Die beste Leistung wird bei einem Luft/Treibstoff-Gemisch erreicht, welches leichten Sauerstoffmangel aufweist (**zirka 100°F unterhalb und auf der reichen Seite von „peak EGT,“**).
- Unter dieser Bedingung wird als Folge von unvollständiger Verbrennung ein leichter Überschuss an Verbrennungsgasen produziert (vor allem CO).
- Der produzierte Gasüberschuss erhöht den Druck im Zylinder beim Arbeitstakt. Dadurch wird die Kolbenbewegung verstärkt.
- **“Best power“-Gemischeinstellung** kann als Gemischeinstellung für **maximalen Verbrennungsdruck** angesehen werden.
- Die Kolbenbewegung, nicht Hitze *per se* erzeugt Leistung.
- “Best power” ist normalerweise rund 5 bis 7% höher als die Leistung bei der Gemischeinstellung “full rich”, bezogen auf Meereshöhe.
- Bei “best power” liefert das Gemisch am meisten Leistung pro angesaugte Luftmasse, nicht am meisten Leistung pro verbrannte Treibstoffmasse. Mit anderen Worten: Bei „best power“ läuft der Motor nicht am effizientesten.

#### **Geringster spezifischer Treibstoffverbrauch (best economy):**

- **Wenn die Gemischeinstellung über die „peak EGT“ hinaus in den mageren Bereich verschoben wird, fällt der Treibstoffverbrauch bis zu einem gewissen Punkt stärker ab als die Leistung.**
- Dieser Punkt wird als Gemischeinstellung für **“best economy”** oder **“best SFC”** bezeichnet und liegt um die **50°F unterhalb und auf der mageren Seite von “peak EGT” (50°F lean of peak EGT).**
- Bei einer Gemischeinstellung für **“best economy”** kann der **Treibstoffverbrauch** bei fast gleicher Leistung im Reiseflug **bis zu 40% tiefer sein als bei der Einstellung für „best power“!**

#### **f) Einfluss der Gemischhebelstellung auf die Emissionen**

Das BAZL-Instrumentarium für die Messung und Berechnung von Emissionsfaktoren ist in den Anhängen 1 und 5 beschrieben. Mit Hilfe dieses Instrumentariums wurden Abgasmessungen im Flug bei unterschiedlichen Einstellungen des Gemischhebels durchgeführt und ausgewertet (Anhang 2). Um Emissionswerte (in Masseneinheiten) zu erhalten, müssen gemessene Abgaskonzentrationen (bzw. Emissionsfaktoren) mit dem Treibstoffverbrauch multipliziert werden, so wie es im Abschnitt 2.2.1 dieses Berichts dargestellt wurde. Die Abbildung 6 (nächste Seite) zeigt nun die Abgaskonzent-

rationen von CO<sub>2</sub> und Schadstoffen in Abhängigkeit von der Gemischhebelstellung und bei fixer Gashebelstellung. Als Beispiel für die Angabe der Abgaskonzentrationen wurde der Motor TCM IO-550B der HBKIA ausgewählt.

- 1) Der Verlauf der Kurven in der Abbildung 6 ist für **alle** Verbrennungsmotoren (ob Kolbenmotoren, Gasturbinen etc.) repräsentativ.
- 2) Einerseits gilt: Wenn die Konzentration eines bestimmten Schadstoffs im Abgas **und** der Treibstoffverbrauch beide hoch sind, gibt es hohe Emissionen. Andererseits: Eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs kann die Emissionen reduzieren, auch dann, wenn die Konzentration eines Schadstoffs im Abgas nicht reduziert wird.

Die folgende Beschreibung der Abbildung 6 berücksichtigt den dargestellten Verlauf der Abgaskonzentrationen und einen von rechts nach links abnehmenden Treibstoffverbrauch:

- Bei der Gemischeinstellung "full rich" sind die CO-Emissionen extrem hoch, HC hoch, NO<sub>x</sub> tief. Das direkt im Abgas gemessene CO<sub>2</sub> ist ziemlich tief, weil ein grosser Teil davon als CO vorliegt, aber es muss die später stattfindende Umwandlung von CO in CO<sub>2</sub> berücksichtigt werden, so dass die totalen CO<sub>2</sub>-Emissionen schliesslich sehr hoch sein werden (entsprechend dem sehr hohen Treibstoffverbrauch).
- Bei der Gemischeinstellung "best power", nehmen CO und HC ab, NO<sub>x</sub> nimmt in Folge der gestiegenen Effizienz des Motors zu. Die totalen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind immer noch hoch.
- Bei einer Standard-Gemischeinstellung für Reiseflug ("rich of peak EGT"), nehmen CO und HC weiter ab, **NO<sub>x</sub> hingegen steigt stark an** und das totale CO<sub>2</sub> ist immer noch relativ hoch.
- Bei "peak EGT" ist CO sehr tief, HC tief und NO<sub>x</sub> nahe am Maximum (vollständige Verbrennung des Treibstoffs mit NO<sub>x</sub> "trade-off"). Das totale CO<sub>2</sub> beginnt abzunehmen.
- Bei einer mageren Gemischeinstellung ("mixture lean",  $\lambda = 1.15$ ) sind CO und HC sehr tief, NO<sub>x</sub> relativ tief und CO<sub>2</sub> tiefer. Der Motor ist bei seinem besten spezifischen Treibstoffverbrauch. Tiefe Abgaskonzentrationen und tiefer Treibstoffverbrauch führen zu den tiefstmöglichen Emissionen. Wenn nicht Höchstleistung gefordert ist, wäre dies die bevorzugte Einstellung des Gemischhebels.

#### **Folgerung: Die bevorzugte Einstellung des Gemischhebels**

- **Für tiefstmögliche Emissionen**
- **Für tiefstmöglichen Treibstoffverbrauch pro Flugstrecke (in vielen Fällen)**
- **Für vernünftige Zylinderkopftemperaturen (siehe auch Abbildung 7)**

wäre bei 50°F "Lean of peak EGT", mit einem  $\lambda$  von etwa 1.2

Aus Flughandbüchern (AFM) und Motorenhandbüchern ist bekannt, dass diese Gemischeinstellung

- **Bei den meisten "Uralt-Technik"-Motoren nicht angewendet werden darf.**
- **Bei den meisten "Uralt-Technik"-Motoren in der Praxis nicht funktioniert.**

Gründe dafür und mögliche Lösungen werden im Abschnitt j) diskutiert.

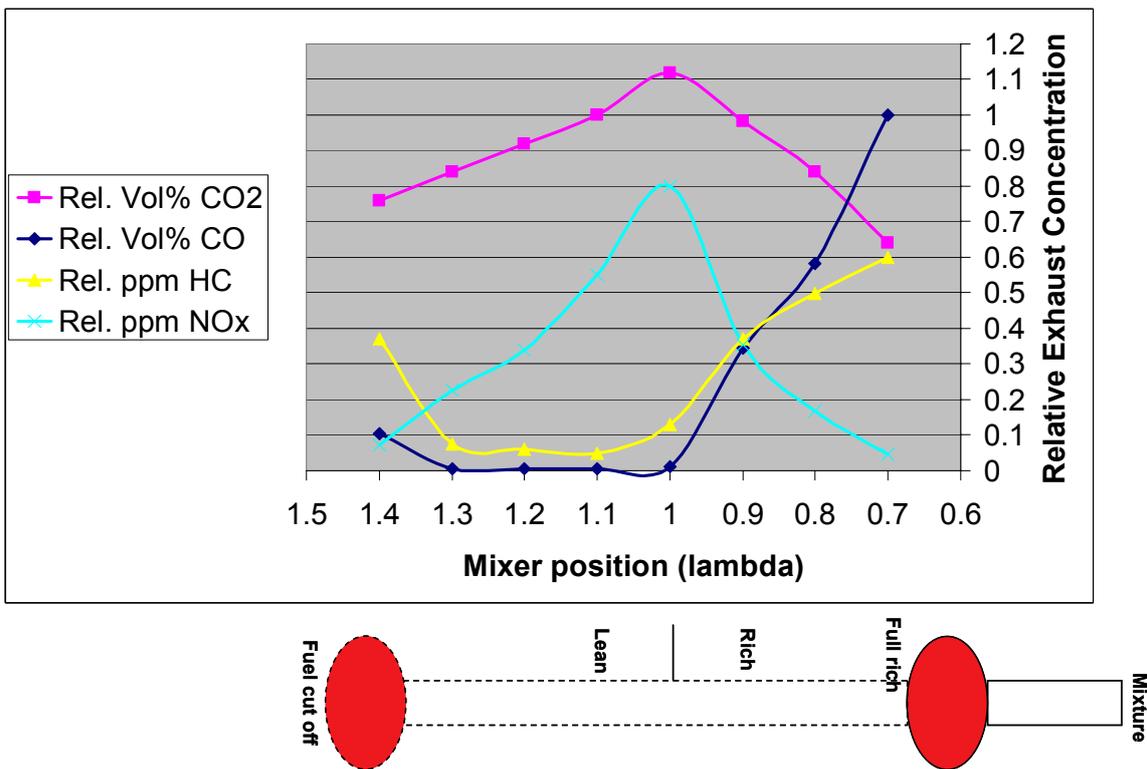


Abbildung 6: Die Darstellung zeigt die Veränderung der Konzentration von CO<sub>2</sub> und Schadstoffen im Abgas in Abhängigkeit von der Gemischhebelstellung (Lambda). Die Konzentrationen sind in einer relativen Skala dargestellt, um sie alle im selben Bild zeigen zu können.

**g) Einfluss der Gemischhebelstellung: Zusammenfassung**

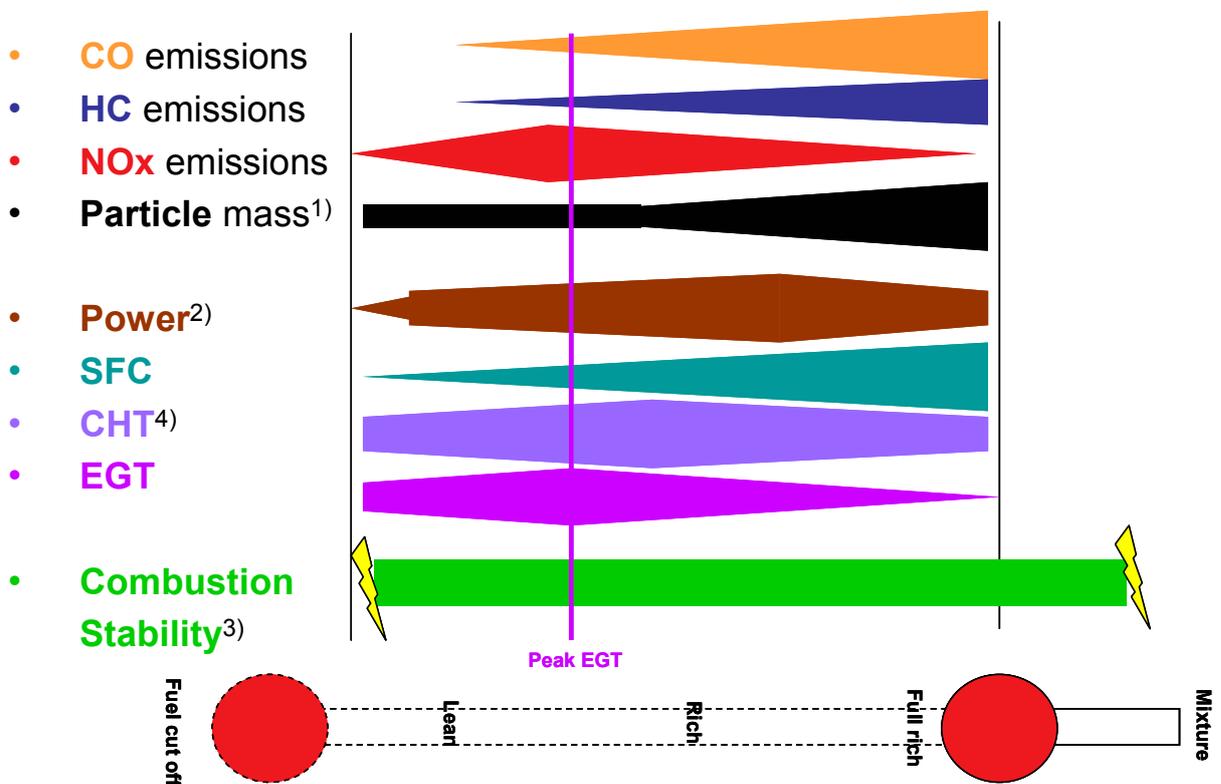


Abbildung 7: Einfluss der Gemischhebelstellung auf Emissionen, Leistung, spez. Treibstoffverbrauch, Motortemperaturen und Stabilität der Verbrennung bei fixer Gashebelstellung für einen Zylinder.

Bemerkung<sup>1)</sup>: Partikelemissionen (bezüglich Masse und Anzahl) sind für AVGAS 100LL Motoren generell hoch. Die Emissionen liegen in derselben Grössenordnung wie bei einem Autodieselmotor ohne Partikelfilter. Dies hat vor allem zwei Gründe: Extrem treibstoffreiche Gemische, welche viele Russpartikel produzieren und verbleiter Treibstoff, welcher zur Bildung von Bleibromidpartikeln führt. Mit unverbleitem AVGAS und magerem Gemisch wären die Partikelemissionen sehr tief (siehe Anhang 4).

Bemerkung<sup>2)</sup>: Bei der Einstellung eines treibstoffarmen (mageren) Gemischs nimmt die Leistung stark ab, wenn mit dem Gashebel nicht nachkorrigiert wird. In der Ära der grossen Kolbenmotor-Airliner wurde nach der Einstellung eines treibstoffarmen Gemischs im Reiseflug eine Korrektur der Leistung vorgenommen. Die Leistungsanpassung mittels Gashebel führt nach der Gemischeinstellung allgemein zu einer nochmaligen Änderung der Gemisch- und Temperaturverteilung. Deshalb wurden die Gemisch- und Gashebel in einem iterativen Prozess nachjustiert. Damit wurde eine Leistungseinstellung erzielt, welche bei treibstoffarmem Gemisch auf demselben Leistungsniveau war wie bei treibstoffreichem Gemisch, aber bei weniger Treibstoffverbrauch und etwa gleich heissen Zylindern. Diese Technik kann heutzutage immer noch angewendet werden, vorausgesetzt, der verwendete Motor und die Instrumentierung lassen es zu.

Bemerkung<sup>3)</sup>: Die Stabilität der Verbrennung geht verloren, wenn das Gemisch zu reich an Treibstoff ist. Der Motor kann buchstäblich „ersaufen“. Bei zu treibstoffarmem Gemisch stirbt der Motor ebenfalls ab, evtl. noch kombiniert mit mechanischen Schäden: Die chemische Reaktionszeit ist zu lang und die Verbrennungstemperatur zu niedrig. Es kann dabei zu einem Flammenwurf bis in den Auspuff kommen. Der Bereich von möglichen Luft/Treibstoffgemischen für eine stabile Verbrennung ist für treibstoffreiches Gemisch gross, für treibstoffarmes Gemisch klein.

Bemerkung<sup>4)</sup>: Treibstoffarmes Gemisch in den Zylindern ist nicht nur ein Vorteil für tiefstmögliche Emissionen, sondern es kann auch zu tieferen CHT führen. Im Übrigen laufen beispielsweise Dieselmotoren im stationären Lastzustand über den ganzen Betriebsbereich mager, d.h. mit treibstoffarmem Gemisch.

#### h) Warum ist bei „Uralt-Technik“-Motoren bei hoher Leistung vollreiches Gemisch nötig?

- Die meisten „Uralt-Technik“-Flugzeug-Kolbenmotoren sind luftgekühlt.
- **Bei voller Leistung reicht die Kühlleistung der Luftkühlung oft nicht aus.** Normalerweise ist der Durchsatz von Kühlluft im Steigflug kleiner als im Reiseflug oder Sinkflug. Im Steigflug fliegt das Flugzeug langsamer. Auch die Fluglage kann einen negativen Einfluss auf die Kühlung haben. Gleichzeitig arbeitet der Motor unter höchster Last. Daher ist in dieser Situation wegen einer mangelnden Luftkühlung oft eine Reduktion der Verbrennungstemperatur in den Zylindern erforderlich, ohne die Leistung wesentlich reduzieren zu müssen. Dies geschieht durch die Wahl einer unvollständigen Verbrennung mit **sehr** treibstoffreichem Gemisch (Lambda 0.7). Trotz hoher Leistung werden die Zylinderköpfe nicht mehr ganz so heiss. Kurz: **Vollreiches Gemisch bewirkt innere Verbrennungskühlung mit Hilfe von überschüssigem Treibstoff.**  
Bemerkung: Treibstoffarme Gemische können Verbrennungstemperaturen auch reduzieren, aber mit viel mehr Leistungsverlust.
- **Bei hoher Leistung kann ein Treibstoffüberschuss helfen, ein mögliches „Klopfen“<sup>7)</sup> zu verhindern.** Auf Grund eines drehzahlunabhängigen festen Zündzeitpunkts können „Uralt-Motoren“ bei weniger reichem Gemisch und hoher Leistung eher zum „Klopfen“ neigen.

#### i) Warum muss das Gemisch auch bei sehr tiefer Leistung reich sein?

- Ein treibstoffreiches Gemisch ermöglicht einen **sicheren Betrieb des Motors bei Lastwechseln**. Wenn die Drosselklappe (Throttle) geöffnet wird, erfährt der Motor im ersten Moment einen Luftüberschuss im Verbrennungsraum, was kurzzeitig zu einem mageren Gemisch führt. Das Gemisch muss deshalb vorher genügend reich sein, so dass beim plötzlichen Öffnen der Drosselklappe der Motor sofort Leistung entwickeln kann.

<sup>7</sup> Unkontrolliertes Verbrennen der Gase, bei dem in den Zylindern hohe Druckspitzen entstehen, welche den Motor mechanisch beschädigen können. Der Begriff kommt vom klopfenden Geräusch, welches diesen Vorgang akustisch begleitet.

- Treibstoffreiches Gemisch ( $\lambda$  um 0.7) ist nötig für den Kaltstart.
- Luftgekühlte Motoren benötigen oft einen Gemisch-Sicherheitsfaktor, um unter schlechtesten Betriebsbedingungen zu verhindern, dass einzelne Zylinder zu mager werden.

Bemerkung: Treibstoffreiches Gemisch kann jegliches Gemisch mit  $\lambda < 1$  sein (ein Gemisch „rich of peak EGT“). Es ist nicht notwendigerweise die vollreiche Gemischeinstellung „full rich“.

### j) Ungleichmässige Verteilung von Gemisch und Temperaturen in „Uralt-Technik“-Motoren

Werden 20 „Experten“ gefragt, warum es problematisch sein kann, „Uralt-Technik“-Motoren mit treibstoffarmem (magerem) Gemisch („lean of peak EGT“) zu betreiben, ist die Wahrscheinlichkeit gross, 20 verschiedene Antworten zu bekommen. Der Autor dieses Berichts beschränkt sich auf die Erkenntnisse, welche durch reale Flugmessungen gewonnen wurden. Es ist eine Tatsache, dass bei einer gegebenen Einstellung des Gemischhebels extreme Unterschiede in der Gemisch- und Temperaturverteilung **zwischen verschiedenen Zylindern** eines „Uralt-Technik“-Motors auftreten können. Nach Ansicht des Autors liegt hier der Hauptgrund für Probleme mit „lean of peak EGT“-Einstellungen solcher Motoren. Abbildung 8 zeigt an einem Beispiel, wie die Temperatur- und Gemischverteilung aussehen **müsste**, um einen Motor als Ganzes (d.h. alle Zylinder gleichzeitig) mit treibstoffarmem Gemisch betreiben zu können. Alle Zylinder hätten ihre Temperaturspitzen bei exakt derselben Position des Gemischhebels. In diesem Fall wäre „50°F lean of peak EGT“ ein klar definierter Betriebspunkt, mit durchwegs tieferen Zylinderkopftemperaturen (CHT) als bei der „rich of peak EGT“-Einstellung. Wären alle Zylinder im „50°F lean of peak EGT“ Betriebspunkt, könnte der Motor bei relativ tiefen Zylinderkopftemperaturen, tiefstem SFC (spezifischer Treibstoffverbrauch) und tiefsten Emissionen betrieben werden!

Bemerkung: Die effektiven Werte der Temperaturen können von Zylinder zu Zylinder variieren, wie in Abbildung 8 gezeigt. Gründe für die verschiedenen hohen Temperaturmaxima sind z.B. Unterschiede in der Zylinderfüllung und in der Kompression in den einzelnen Zylindern.

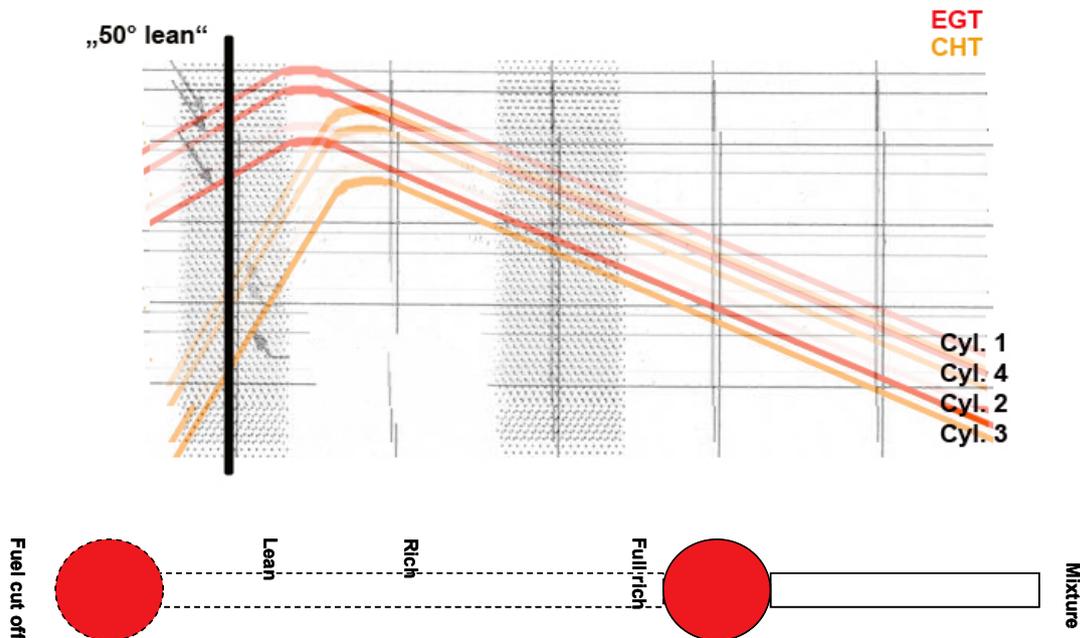
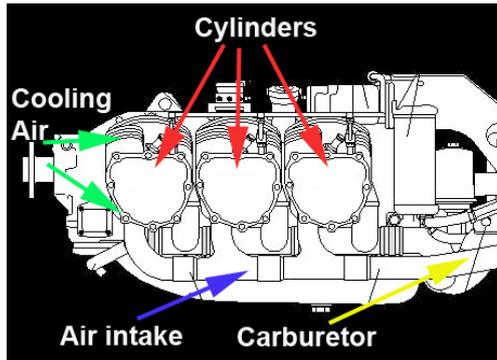


Abbildung 8: Erforderliche Gemischverteilung in vier Zylindern in Abhängigkeit von der Stellung des Gemischhebels. Alle vier Zylinder erreichen ihre höchsten Arbeitstemperaturen bei derselben Stellung des Gemischhebels.

In Wirklichkeit erreichen alle Zylinder von „Uralt-Technik“-Flugzeug-Kolbenmotoren ihre individuellen Maximaltemperaturen bei verschiedenen Stellungen des Gemischhebels (Abbildung 9 nächste Seite). Zudem können die Werte der Maximaltemperaturen von Zylinder zu Zylinder erheblich variieren.

Gründe (nicht als vollständig zu betrachten):



- Unterschiedliche Distanzen zwischen Vergaser und den einzelnen Zylindern;
- Die Verteilung der Kühlluft bewirkt ungleiche Zylinderkühlung;
- Je nach Konstruktion müssen Treibstofftröpfchen im Ansaugrohr entgegen der Gravitation; nach oben wandern. Dabei erreichen sie näher gelegene Zylinder leichter;
- Bei Einspritzsystemen: Schlechte Abstimmung der Einspritzdüsen;
- Nicht erwartete Effekte in der Luftführung.

Manche Ansaug- bzw. Einspritzsysteme sind so schlecht auf die einzelnen Zylinder abgestimmt, dass der magerste Zylinder den Treibstoff bereits nicht mehr richtig verbrennen kann (lean misfire), noch bevor der reichste Zylinder die maximale Abgastemperatur (seine „peak EGT“) erreicht.

- Es braucht Treibstoff **und** Luft, um ein Feuer zu machen. Normalerweise gilt: **Je mehr Treibstoff und Luft, umso heißer die Flamme.** Dies kann mit dem Begriff „Zylinderfüllung“ ausgedrückt werden. Die Zylinder eines „Uralt-Technik“-Motors können sehr **unterschiedlich gefüllt** sein.
- **Je grösser die Kompression** in einem Zylinder während der Verbrennung ist, **desto höher ist die Endtemperatur.**
- Wenn der Gemischhebel zurückgezogen wird, so erreicht der treibstoffreichste Zylinder seine „peak EGT“ als letzter (Abbildung 9). Es ist aber gut möglich, dass dieser Zylinder die höchste „peak EGT“ von allen Zylindern erreicht.

Es ist möglich, dass der reichste Zylinder die höchste Abgastemperatur von allen Zylindern aufweist.

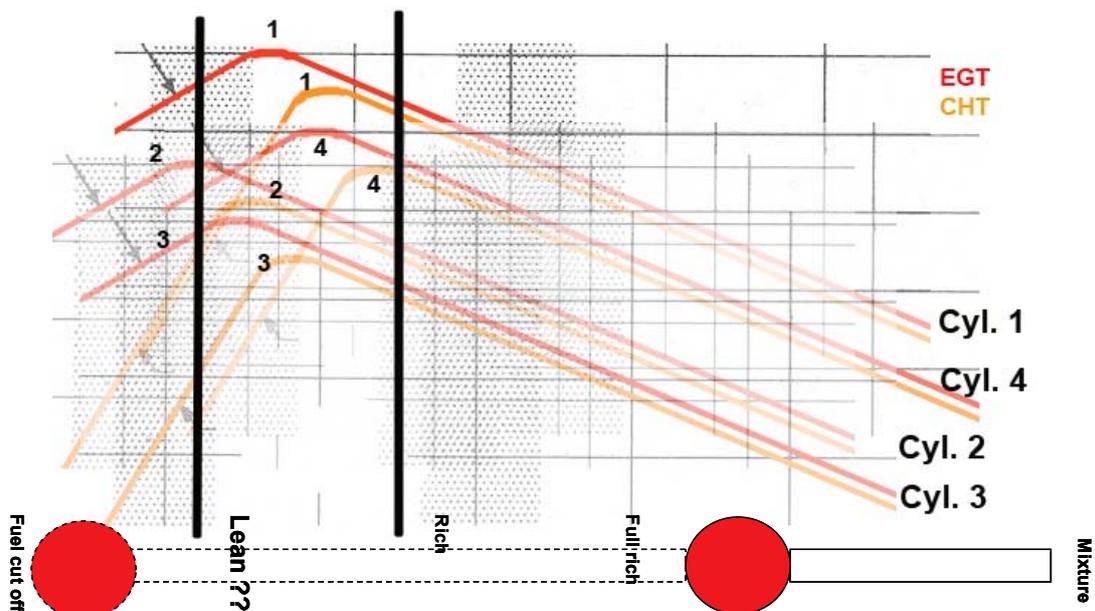


Abbildung 9: Ungleiche Gemisch- und Temperaturverteilung in einem „Uralt-Technik“-Motor. Bei einer bestimmten Stellung des Gemischhebels haben alle Zylinder ein voneinander verschiedenes Lambda und verschiedene Temperaturen.

Im **Beispiel** der Abbildung 9 wird angenommen, dass das Gemisch für den Motor bei „50°F lean of peak EGT“ liegt (linke schwarze Linie). In Wahrheit trifft dies **nur für den Zylinder 1** zu.

Der **magerste Zylinder** ist derjenige, welcher beim Zurückziehen des Gemischhebels als erster die „peak EGT“ erreicht. Im Beispiel ist dies **Zylinder No. 4**. Bei der gewählten Gemischeinstellung (bezogen auf Zylinder 1) kann Zylinder 4 schon so mager sein, dass er **nicht mehr richtig verbrennt** (lean misfire). In der Praxis beginnt ein Motor in diesem Zustand rau und mit mehr Vibrationen zu laufen. Dieser Betriebszustand wirkt sich verständlicherweise negativ auf die Lebensdauer eines Motors aus und muss deshalb vermieden werden.

Der **reichste Zylinder ist No. 2**. Alle anderen Zylinder haben ihre „peak EGT“ überschritten und Zylinder No. 2 hat ihn gerade erst erreicht.

Der **kühlste Zylinder** von allen ist in diesem Beispiel der **Zylinder No. 3**, trotz dem Umstand, dass er nahe seiner „peak EGT“ läuft.

Der **heisseste Zylinder** von allen ist **Zylinder No. 1**. Diese Zylinder hat eventuell die beste Zylinderfüllung, die höchste Kompression und/oder wird am schlechtesten gekühlt.

#### **“Magerster” und “heissester” Zylinder dürfen nicht verwechselt oder gleichgesetzt werden!**

- **Der magerste Zylinder ist derjenige, welcher als erster seine “peak EGT” erreicht**, wenn der Gemischhebel zurückgezogen wird.
- **Der reichste Zylinder ist derjenige, welcher als letzter seine “peak EGT” erreicht**, wenn der Gemischhebel zurückgezogen wird.
- **Der heisseste Zylinder** kann der reichste sein, z.B. wenn er die höchste Kompression, die beste Zylinderfüllung oder die schlechteste Kühlung von allen Zylindern aufweist.

#### **Folgerungen**

- **Wenn alle Zylinder gleichzeitig mager** laufen, können die Zylinderköpfe **kühler** werden als mit “rich of peak EGT” oder “best power”-Gemischeinstellung.
- Mit magerem Gemisch wird der Verbrennungsprozess verlangsamt und der Druckverlauf auf den Kolben wird auf eine grössere Zeit verteilt. Dies **reduziert die Materialbeanspruchung**.
- Mit magerem Gemisch erreicht der Motor seinen **tiefsten spezifischen Treibstoffverbrauch** und **tiefstmögliche Emissionen**.
- Treibstoffreiche Gemische haben bei stabilen Verbrennungsbedingungen eine viel grössere Bandbreite für Lambda als magere Gemische (Abbildung 7). Magere Gemische erfordern eine bessere Gemischkontrolle.
- Änderungen der Flughöhe (z.B. Sinkflug) sind manchmal für den Betrieb des Motors weniger kritisch, wenn mit treibstoffreichen Gemischen geflogen wird.
- Für Lastwechsel braucht der Motor treibstoffreiches Gemisch.
- Bei den meisten **“Uralt-Technik”**-Motoren besteht ein hohes Risiko, dass einer oder mehrere Zylinder (inklusive Kolben) unter hoher thermischer Belastung laufen, ohne dass dies direkt bemerkt wird. Aus diesem Grunde **dürfen** solche Motoren **nicht** mager betrieben werden.



Bild 3: Tausende Stunden im Magerbetrieb: Der Wright R-3350 Motor (DC7 etc.) wurde im Reiseflug mager betrieben. Die bessere Gemischkontrolle wurde z.B. erreicht durch symmetrischen Motoraufbau (gleichmässige Gemischzufuhr und Kühlung), Gemischeinstellung auf der Grundlage von Treibstoffverbrauch und Leistung, sowie einem Flugingenieur, welcher die Bedienung und kontinuierliche Überwachung des Motors übernahm.

**In einem modernisierten Flugzeug-Kolbenmotor mit Benzineinspritzung ist Magerbetrieb möglich, z.B. durch Verwendung sorgfältig abgestimmter Einspritzdüsen und/oder FADEC, welches jeden Zylinder einzeln regelt.**

## k) Untersuchte manuelle Verfahren für die Gemischverstellung

**Das Luft/Treibstoffgemisch ohne EGT einstellen:** Viele "Uralt-Technik"-Kolbenmotor-Flugzeuge mit Festpropeller haben keine Instrumentierung zur Messung der Abgastemperaturen (EGT). Folglich hat der Pilot keine Information über die inneren Verbrennungstemperaturen des Motors. In Flugschulen wird oft die folgende Daumenregel gelehrt: Bei einer fixen Gashebelstellung (Throttle) wird der Gemischhebel langsam zurückgezogen, bis ein leichter Drehzahlabfall des Festpropellers auftritt. Bei dieser Einstellung laufen zumindest einige Zylinder mit magerem Gemisch. Der Gemischhebel wird wieder etwas nach vorne gestossen (ungefähr 1 cm, je nach Gestänge). Die Zylinder des Motors laufen dann mit grosser Wahrscheinlichkeit bei etwas treibstoffreichem Gemisch („rich of peak EGT“). Nach einer Weile werden die Zylinderkopf- und die Öltemperatur überprüft.

**Daumenregel für Festpropeller-Motoren ohne EGT im Reiseflug unterhalb 75% Propellerleistung:** „Fühl beim Mixen den Drehzahlabfall und stosse den Gemischhebel wieder 1 cm nach vorne.“ Die Gemischanpassung im Reiseflug hin zu weniger treibstoffreichem Gemisch sollte auf jeder Flughöhe bei Propellerleistungen bis 75% vorgenommen werden (siehe AFM).

Das BAZL hat den Effekt der Daumenregel auf die erzielte Gemischanpassung in Flugtests mit der Robin HBEYS untersucht (Abgasmessungen im Flug sind im Anhang 2, Abschnitte 1 und 3 dokumentiert.) Die mit einer bestimmten Einstellung des Gemischhebels gemessene Abgaskonzentrationen und das Lambda konnten im Flug direkt auf einem kleinen TV-Monitor abgelesen werden.

**Gemischeinstellung für "best power" bei einem Festpropeller-Motor ohne EGT im Steigflug bei konstantem Steigwinkel:** Gemischhebel von „full rich“ bis in die Position für höchste Motordrehzahl zurückziehen. Normalerweise wird der Gemischhebel aus der gefundenen Position wieder etwas gestossen, in Richtung „rich“. Für einen Saugmotor sollte diese Gemischanpassung oberhalb 5000ft Dichtehöhe normalerweise immer durchgeführt werden (siehe AFM). Siehe auch Abbildung 10 und das Beispiel im Anhang 2, Abschnitt 4f.

Allgemeine Erkenntnisse bezüglich Daumenregel:

- Wenn Piloten die Daumenregel langsam anwenden und überdies versuchen, mit auf den Flugzeugboden gestellten Füßen Veränderungen im Vibrationsverhalten des Motors zu spüren<sup>8</sup>, so kann ein Lambda zwischen 0.93 und 0.95 erreicht werden. Dies entspricht recht genau einer 50°F „rich of peak EGT“ Einstellung.
- Mit zunehmender Dichtehöhe führt die Daumenregel zu tendenziell immer treibstoffreicheren Gemischen.
- Gemischanpassung bei stehendem Flugzeug, z.B. wichtig vor dem Start bei grosser Dichtehöhe: Gemisch für höchste Standdrehzahl ermitteln und etwas reicher stellen. Dies führt zu treibstoffreichem Gemisch als wenn die Daumenregel im Flug angewendet wird.
- Streng genommen kann die Daumenregel nur für Reiseflug und in etwas geringerem Masse für den Steigflug angewendet werden. Im Sinkflug läuft der Motor bei fester Einstellung des Gemischhebels zunehmend mit weniger reichem Gemisch, bis schliesslich die Verbrennung zum Erliegen kommt. Aus diesem Grund wird in vielen AFM verlangt, beim Sinkflug den Gemischhebel auf „full rich“ zu stellen. Für den Motor ist eine solche Einstellung im Sinkflug in jeder Beziehung sehr weit vom Optimum entfernt (siehe 2.3.1.c).

**Gemischeinstellung mit EGT:**  
**Die Standardeinstellung im Reiseflug ist oft 25 to 50°F „rich of peak EGT“.**

Einige Motoren können – gemäss AFM – mit magerem Gemisch betrieben werden. Beispielsweise scheint beim Motor der HBKIA die Gemischverteilung zwischen den 6 Zylindern nicht allzu schlecht zu sein und es erstaunt nicht, dass im AFM Möglichkeiten zum „lean of peak EGT“-Betrieb genannt werden. Aber trotzdem: Während eines Messfluges mit magerem Gemisch ist mindestens ein Zylinder mit hohen Verbrennungstemperaturen gelaufen (was an entsprechend hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen sichtbar

<sup>8</sup> Zusätzliche Motorvibrationen können durch die ungleiche Gemischverteilung und demzufolge verschiedene Verbrennungsabläufe in den einzelnen Zylindern hervorgerufen werden (Abschnitt j). Der Gemischhebel sollte in diesem Fall in Richtung „reich“ geschoben werden. Dies bringt die kritischen Zylinder weg von instabilen Verbrennungszuständen.

wurde). Die Motorüberwachungsinstrumente im Cockpit haben dies nicht angezeigt (siehe Problem-  
beschreibung im vorgängigen Abschnitt j und die Messdaten HBKIA im Anhang 2, Abschnitt 5)!

Allgemeine Erkenntnisse bezüglich Gemischeinstellung mit EGT:

- Eine saubere Gemischeinstellung mit EGT braucht Zeit (5 Minuten und mehr). Die Temperatursonde reagiert meist langsam und der Motor und das Flugzeug brauchen etwas Zeit, um sich bei einer bestimmten Einstellung von Gas- und Gemischhebel zu stabilisieren.
- Die meisten Verfahren für die Gemischeinstellung mit EGT beginnen mit der Suche nach der maximalen Abgastemperatur (peak EGT) eines „Referenzzylinders“ (der magerste Zylinder, wenn für jeden einzelnen Zylinder separate EGT-Werte vorliegen). Dies bedeutet, dass mindestens der Referenzzylinder einige Zeit bei „peak EGT“ laufen muss, was nicht unbedingt gut für die Lebensdauer sein kann, insbesondere dann, wenn der Referenzzylinder zufällig noch der heisseste aller Zylinder ist.

- Eine einzelne EGT (und CHT) Temperatursonde in einem Vier- oder Sechszylinder-„Uralt-Technik“-Motor wird für eine genaue und überwachbare Gemischeinstellung als unzureichend angesehen (siehe vorgängigen Abschnitt j). Zertifizierte Instrumente, welche die CHT und EGT der einzelnen Zylinder anzeigen, sind vorzuziehen.

Allgemeine Erkenntnisse bezüglich aller „Uralt-Technik“-Motoren:

- Jede Änderung der erforderlichen Leistung und der Luftdichte (Änderung der Flughöhe, Starthöhe, Lufttemperatur) erfordert eine Anpassung mit dem Gemischhebel.
- Das Ziehen der Vergaservorwärmung bei einer fixen Stellung des Gashebels (Throttle) führt zu treibstoffreicherem Gemisch. Die wärmere Luft im Ansaugrohr (Manifold) hat eine geringere Dichte, was zum selben Effekt führt, wie wenn das Flugzeug in grösserer Höhe fliegen würde. Deshalb sollte nach dem Ziehen der Vergaservorwärmung das Gemisch in Richtung „weniger reich“ angepasst werden (ausser bei sehr geringer Leistung und Leerlauf).
- Genaue Gemischeinstellungen während des Fluges können einen beträchtlichen Teil der Pilotenkonzentration absorbieren und von Primäraufgaben (Steuerung, Luftraumüberwachung, etc.) ablenken, wenn die Operation durch entsprechendes Training nicht als automatisiertes Programm abläuft.

## I) Gemischverstellung mit Hilfe des Treibstoffverbrauchs

- Wenn immer möglich, sollten (zertifizierte) EGT- und CHT-Messungen für jeden einzelnen Zylinder installiert sein.
- Wenn immer möglich, sollte ein (zertifizierter) Treibstoffdurchfluss-Messer mit entsprechendem Anzeigerät installiert sein.

### Treibstoffverbrauchs-Methode

Mit dieser Methode wird **mit dem Gemischhebel** in Abhängigkeit von der benötigten Leistung (MAP und RPM) und der Flughöhe (PA) **ein tabellierter Treibstoffverbrauch eingestellt**.

Der Autor schlägt vor, als Ausgangspunkt die im entsprechenden AFM eines Flugzeugs vorhandenen Leistungstabellen zu verwenden, um einen bestimmten Treibstoffverbrauch für einen gewissen Leistungswert und gewisse Umgebungsbedingungen einzustellen. Jedoch hat die praktische Erfahrung gezeigt, dass individuelle Unterschiede in den Anzeigen verschiedener Flugzeuge desselben Typs existieren und die praktische Anwendung der AFM-Tabellen oft recht aufwändig ist. Es ist aus diesem Grunde ratsam, für das individuelle Flugzeug einmalig selber eine Treibstoffverbrauchstabelle zu erfliegen. Dies kann mit dem folgenden, vereinfachten Ansatz geschehen:

- Es wird ein Tag mit mittleren Bodentemperaturen und ohne signifikante Temperaturinversion gewählt. Der Höhenmesser wird auf PA gestellt (1013 hPa). Für verschiedene gewünschte Leistungseinstellungen wird auf unterschiedlichen Flughöhen (PA) und gemäss AFM eingestellt-

tem Gemisch der zugehörige Treibstoffverbrauch notiert. Wenn möglich sollte der Motor mit EGT für jeden einzelnen Zylinder ausgestattet sein.

- Ist diese Tabelle einmal erstellt, wird der **Gemischhebel** bei gewünschter Motorenleistung (MAP, RPM) und Flughöhe **auf der Grundlage des Treibstoffverbrauchs eingestellt**.
- Beispiel für ein Flugzeug mit Verstellpropeller:

Für zirka 65% Propellerleistung auf 5500 ft PA sei die Einstellung 22.5 InHg und 2350 RPM, Der entsprechende Treibstoffverbrauch in der erstellten Tabelle für „50°F rich of peak EGT“ sei 9.5 GAL

- ➔ Der Gemischhebel wird zurückgezogen, bis der Treibstoffverbrauch auf 9.5 GAL abgefallen ist.
- ➔ EGT wird unmittelbar und nach ein paar Minuten überprüft, CHT nach ein paar Minuten.

Bemerkung: Die Überprüfung der EGT ist nötig für Feinadjustierungen, vor allem wenn die Aussentemperatur stark von derjenigen Temperatur abweicht, bei der die Tabelle erstellt wurde.

Die Einstellung des Gemischs mit der Treibstoffverbrauchs-Methode geht sehr rasch und lenkt nicht zu stark von primären Aufgaben ab. Diese Methode kann auch ein Vorteil für die Lebensdauer des Motors sein: Es ist nicht mehr nötig, bei jedem Beginn einer Gemischeinstellung die „peak EGT“-Werte zu suchen.



Bild 4: Abgasmessungen, Partikelmessungen, Treibstofftests und Untersuchungen der Gemischeinstellung mit der Robin DR48, HBEYS, Lycoming O-360 Motorenserie.

## 2.2.3 Typische Emissionsfaktoren und Grössenordnung der Schadstoffemissionen

### a) Schadstoffe von "Uralt-Technik"-Motoren im Lande- und Startzyklus (vollreiches Gemisch)

In den meisten Fällen wird "full rich" während des ganzen Lande- und Startzyklus (LTO) gesetzt. Wegen Sauerstoffmangel ist die Verbrennung sehr unvollständig mit viel CO, HC und Partikelemissionen.

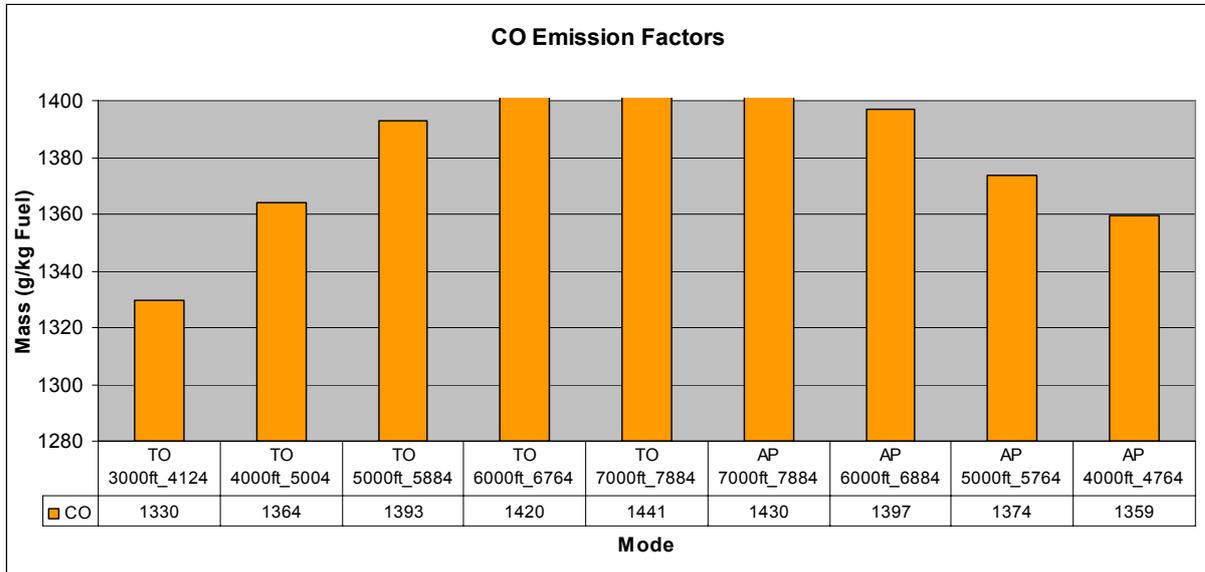


Abbildung 10: Beispiel für CO-Emissionsfaktoren, im Flug gemessen, bei "Full Throttle" zwischen 3000 und 7000ft PA und bei Anflugleistung (ungefähr 45% der maximalen Propellerleistung) zwischen 7000 und 4000ft PA. Die Zahl neben der Höhenangabe in Fuss bezeichnet die Dichtehöhe. Alle Messungen wurden mit HBKEZ und Lyc IO-360 Motor durchgeführt, welcher bei „full rich“ mit grossem Sauerstoffmangel arbeitet. Zu sehen ist auch die Zunahme der CO-Emissionsfaktoren mit der Höhe, weil die Verbrennung mit zunehmender Höhe reicher wird, wenn der Gemischhebel auf „full rich“ stehen bleibt.

Allgemein produzieren "Uralt-Technik"-Motoren bei "full rich" **zwischen 600 und 1200 g CO pro kg Treibstoff**. Bemerkung: Der CO-Emissionsfaktor eines modernen Turbofans („Jettriebwerk“) ist rund um den Faktor 1000 kleiner!

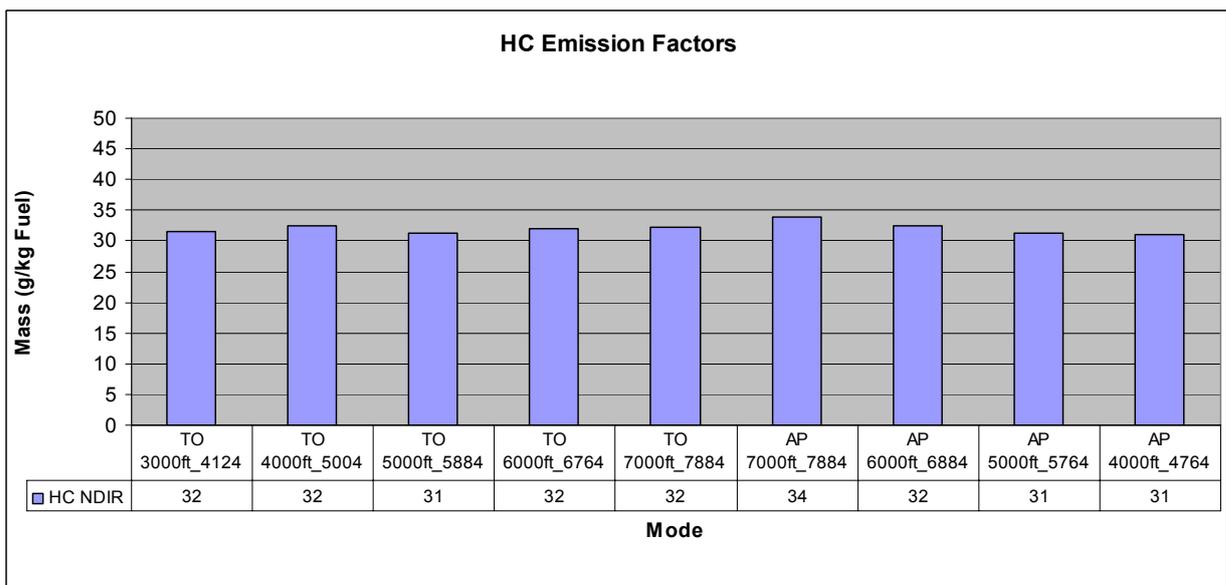


Abbildung 11: Beispiel für HC-Emissionsfaktoren, im Flug gemessen, bei "Full Throttle" zwischen 3000 und 7000ft PA und bei Anflugleistung (ungefähr 45% der maximalen Propellerleistung) zwischen 7000 und 4000ft PA. (HBKEZ)

Allgemein produzieren „Uralt-Technik“-Motoren bei "full rich" **zwischen 12 und 30 g HC pro kg Treibstoff**. Bemerkung: Der HC-Emissionsfaktor eines modernen Turbofans („Jettriebwerk“) liegt bei

Null (vollständige Verbrennung)! Nur beim Leerlauf bzw. beim Rollen liegt der Emissionsfaktor in derselben Grössenordnung.

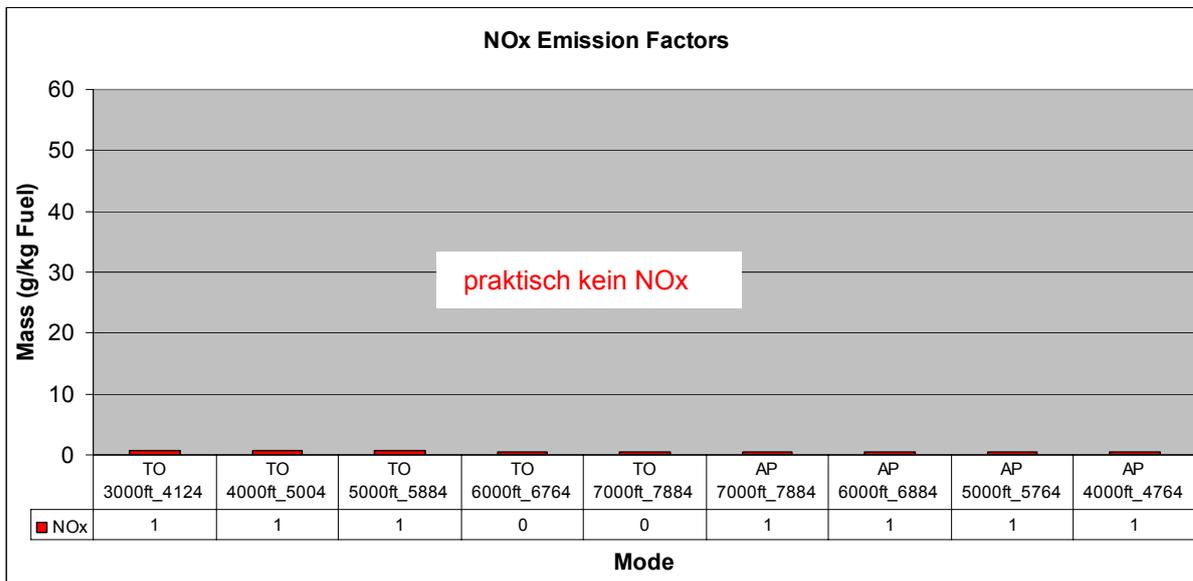


Abbildung 12: Beispiel für NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren, im Flug gemessen, bei "Full Throttle" zwischen 3000 und 7000ft PA und bei Anflugleistung (ungefähr 45% der maximalen Propellerleistung) zwischen 7000 und 4000ft PA. (HBKEZ)

Allgemein produzieren „Uralt-Technik“-Motoren bei "full rich" **nur wenige g NO<sub>x</sub> pro kg Treibstoff**.  
 Bemerkung: Der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor eines modernen Turbofans („Jettriebwerk“) liegt bei hoher Schubleistung zwischen 20 und 30 g / kg Treibstoff, als Folge hoher Effizienz. Beim Leerlauf bzw. beim Rollen liegt der Emissionsfaktor bei wenigen g / kg Treibstoff.

### Emissionsfaktoren für nicht-flüchtige Partikel und Russ:

Die Abbildung 13 auf der folgenden Seite zeigt ein typisches Beispiel einer Partikelzahl-Partikelgrössenverteilung für einen Flugzeug-Kolbenmotor, welcher mit AVGAS 100LL (verbleit) im Anflug mit Gemischhebel in Stellung „full rich“ betrieben wird (HBKEZ).

Für verschiedene typische Leistungsstufen bewegte sich

- der **mittlere Partikeldurchmesser**<sup>9</sup> **zwischen 49 und 108 nm**,
- die **totale Partikelkonzentration** zwischen 5.7 und 8.6 mal **10 Millionen Partikel pro Kubikzentimeter**.

Mit einer angenommenen spezifischen Dichte von 1.2 für Russ betrug

- die abgeschätzte **Konzentration der Partikelmasse** ungefähr **10 000 µg/m<sup>3</sup> (Mikrogramm pro Kubikmeter)**.

Im Allgemeinen scheinen Partikelemissionen von "Uralt-Technik" Flugzeug-Kolbenmotoren, welche mit verbleitem AVGAS und treibstoffreichem Gemisch betrieben werden, mit Partikelemissionen von Auto-Dieselmotoren ohne Partikelfilter vergleichbar zu sein (siehe Abbildung 14). Details der Messungen sind im Anhang 4 aufgezeichnet.

<sup>9</sup> Die meisten Partikel sind ultrafein: 100 nm = 0.00001 mm

### Approach 12-1m

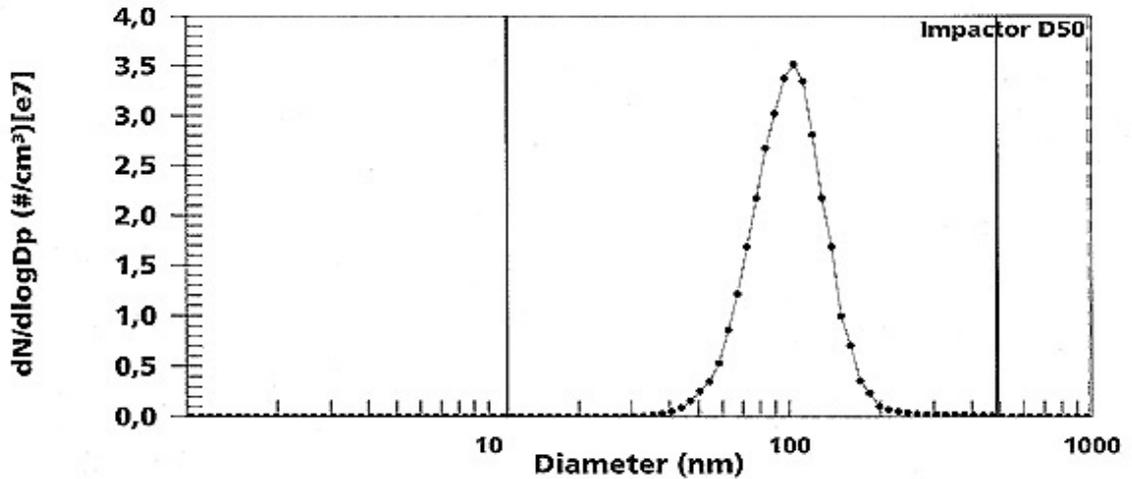


Abbildung 13: Partikelzahl-Partikelgrößenverteilung des Motors der HBKEZ bei Anflugeistung. Der mittlere Partikeldurchmesser liegt bei 100 nm und die totale Konzentration beträgt rund 10 Millionen Partikel pro Kubikzentimeter (cm<sup>3</sup>). [C. Wah/DLR 2004]

File: CD114.000      Sample number: 1      Scan number: 1      Tue 21 Aug 2001  
14:42:34

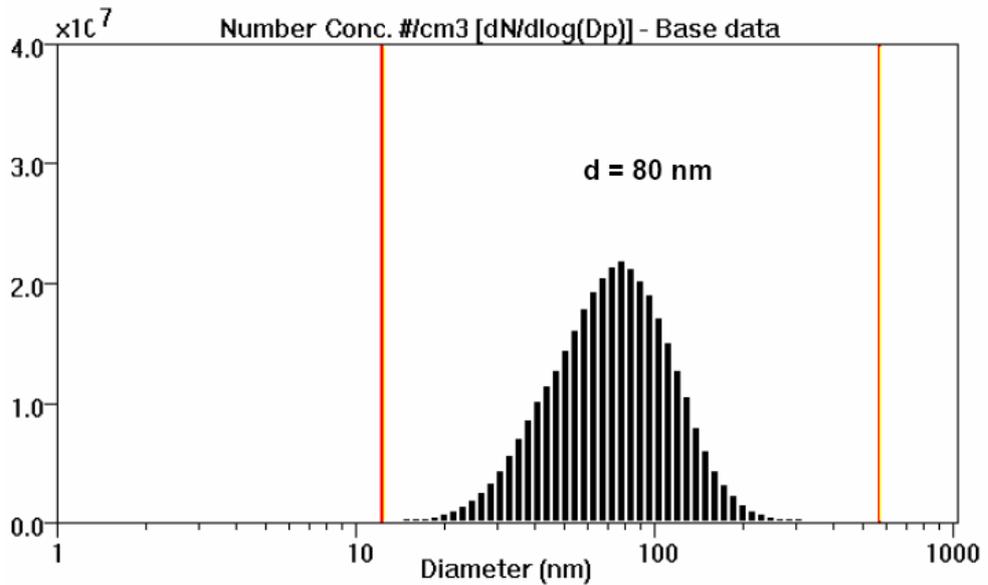


Abbildung 14: Partikelzahl-Partikelgrößenverteilung eines typischen Auto-Dieselmotors (CDI) bei 2000 RPM (erhöhte Standdrehzahl) als Vergleich zur Abbildung 13. [C. Wah/DLR 2004]

Auf der Grundlage von Messungen an zwei "Uralt-Technik"-Flugzeug-Kolbenmotoren (150 und 180 PS) werden die folgenden Emissionsfaktoren für Russpartikel (Soot) vorgeschlagen (Anhang 4):

Fuel	Soot Emission Factors (mg soot / kg fuel)			
	TA	AP	CL	TO
AVGAS 100LL (leaded)	50	40	70	100
AVGAS 91/96UL (unleaded)	1	1	2	3

## b) Schadstoffe im Reiseflug (beim oder nahe beim "peak EGT")

In den meisten Fällen wird unter **Reiseflugbedingungen** eine Gemischeinstellung relativ nahe bei „peak EGT“ gewählt. Bei „peak EGT“ ist die Verbrennung vollständig und theoretisch sollten keine teilweise verbrannten Treibstoffprodukte entstehen. In Wirklichkeit werden immer noch **kleine Anteile von CO** (Kohlenmonoxid) und **HC** (Kohlenwasserstoffe) ausgestossen, vor allem wegen ungleichmässiger Gemisch- und Temperaturverteilung in den Zylindern.

Infolge maximaler Verbrennungswärme und kurzen Reaktionszeiten bei einem "peak EGT"-Gemisch reagieren der Stickstoff ( $N_2$ ) und der Sauerstoff aus der Luft ( $O_2$ ) beim Verbrennen im Zylinder miteinander und bilden **NO (und etwas  $NO_2$ )**, genannt Stickoxide  **$NO_x$**  (siehe Abschnitt 2.2.2 f). Dies ist das klassische „Treibstoffverbrauch- $NO_x$ -Gegenspiel“: Weniger Treibstoffverbrauch kann zu höheren  $NO_x$  Emissionen führen. Die Problematik wird normalerweise für Turbofan-Triebwerke diskutiert, existiert aber auch für Kolbenmotoren, wenn die Effizienz gesteigert wird. Automotoren haben Abgasnachbehandlung mit Katalysatoren, um  $NO_x$  zu reduzieren. Für Flugzeug-Kolbenmotoren wäre dies auch eine Variante, wenn ausschliesslich unverbleiter Treibstoff verwendet werden könnte.

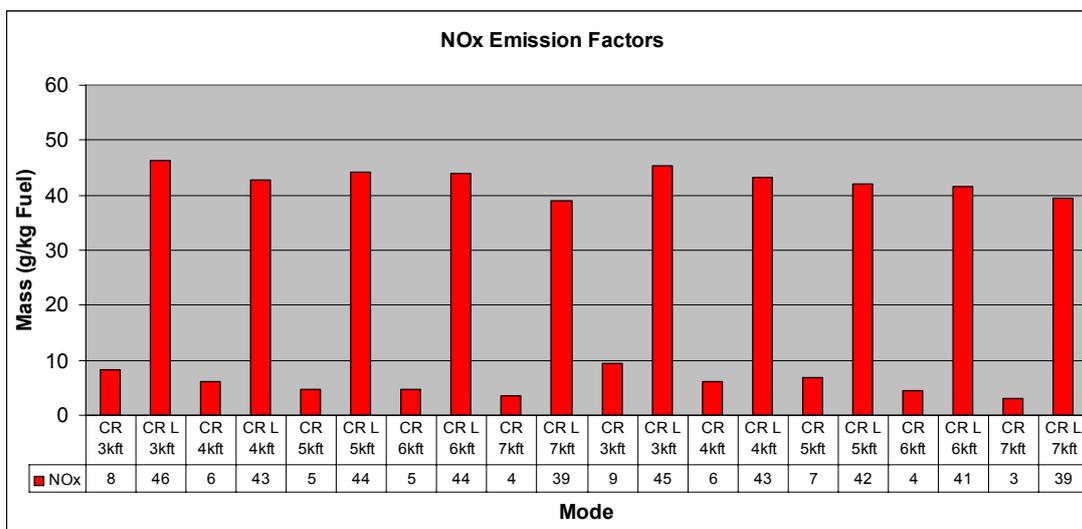


Abbildung 15: Beispiel für  $NO_x$  -Emissionsfaktoren, im Flug gemessen, auf Druckhöhen zwischen 3000 und 7000ft bei ungefähr 65% der maximalen Propellerleistung. Die Messungen wurden wiederholt durchgeführt, mit Gemisch „full rich“ (tiefe  $NO_x$ , mit CR bezeichnet) und mit Gemisch „peak EGT“ (hohe  $NO_x$ , mit CR L bezeichnet). Mit „full rich“ nehmen die  $NO_x$  -Emissionsfaktoren mit zunehmender Höhe ab. Die Messungen zeigen auch, dass die Resultate reproduziert werden können. (HBEYS)

Allgemein produzieren „Uralt-Technik“-Motoren im Reiseflug bei einer Gemischeinstellung nahe „peak EGT“ zwischen 30 und 40 g  $NO_x$  pro kg Treibstoff.

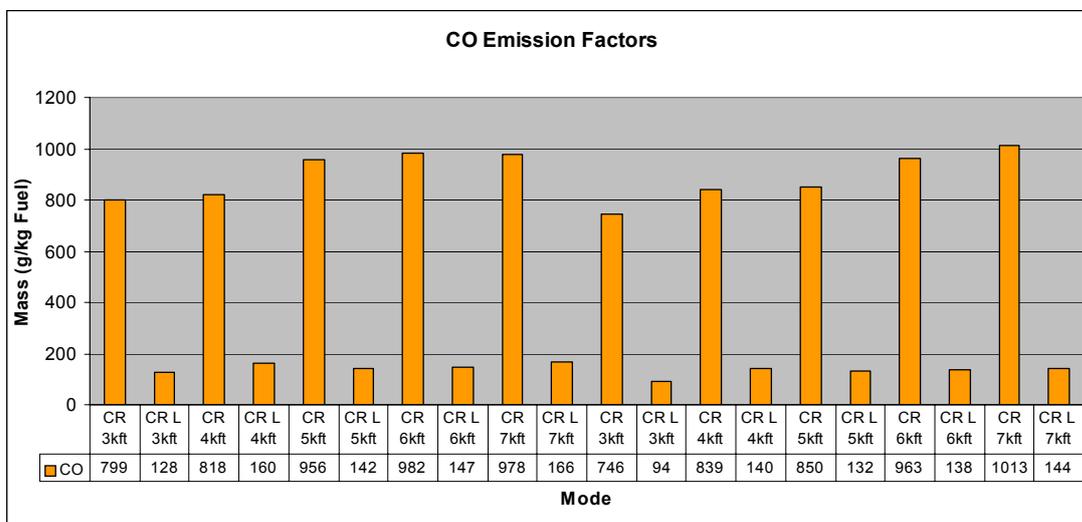


Abbildung 16: Beispiel für CO-Emissionsfaktoren, im Flug gemessen, auf Druckhöhen zwischen 3000 und 7000ft bei ungefähr 65% der maximalen Propellerleistung. Die Messungen wurden wiederholt

durchgeführt, mit Gemisch „full rich“ (hohe CO, mit CR bezeichnet) und mit Gemisch „peak EGT“ (tiefere CO, mit CR L bezeichnet). Mit „full rich“ nehmen die CO-Emissionsfaktoren mit zunehmender Höhe zu. Die Messungen zeigen auch, dass die Resultate reproduziert werden können. (HBEYS)

Allgemein produzieren „Uralt-Technik“-Motoren im Reiseflug bei einer Gemischeinstellung nahe „peak EGT“ um die 200 g CO pro kg Treibstoff.

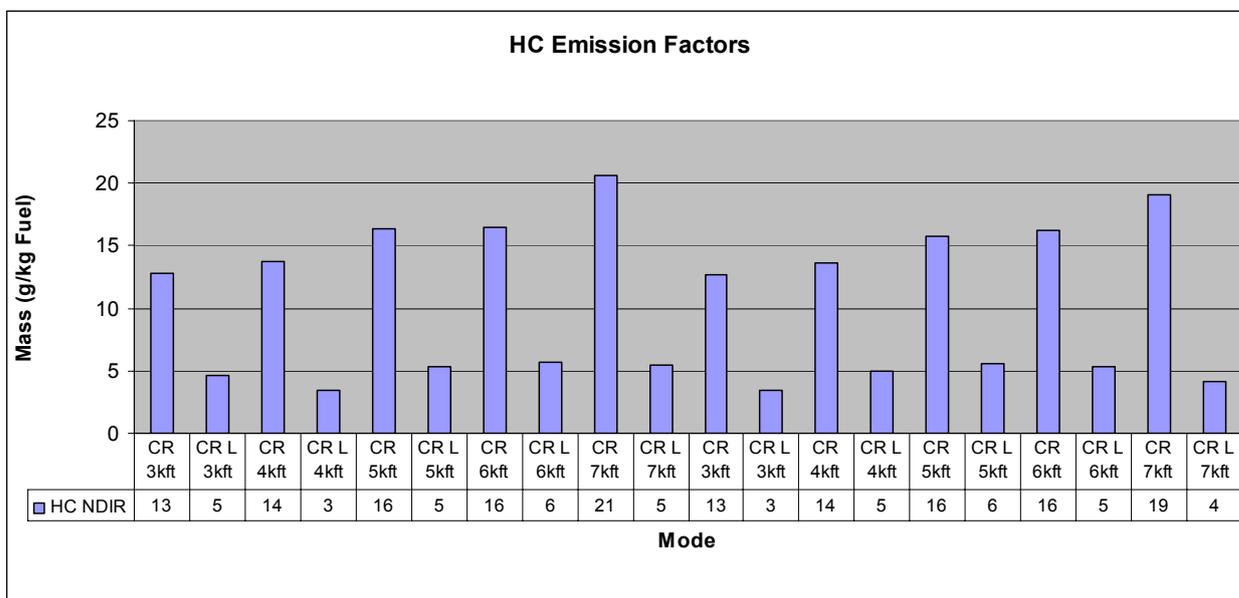


Abbildung 17: Beispiel für HC-Emissionsfaktoren, im Flug gemessen, auf Druckhöhen zwischen 3000 und 7000ft bei ungefähr 65% der maximalen Propellerleistung. Die Messungen wurden wiederholt durchgeführt, mit Gemisch „full rich“ (hohe HC, mit CR bezeichnet) und mit Gemisch „peak EGT“ (tiefere HC, mit CR L bezeichnet). Mit „full rich“ nehmen die HC-Emissionsfaktoren mit zunehmender Höhe zu. Die Messungen zeigen auch, dass die Resultate reproduziert werden können. (HBEYS)

Allgemein produzieren „Uralt-Technik“-Motoren im Reiseflug bei einer Gemischeinstellung nahe „peak EGT“ zwischen 6 und 12 g HC pro kg Treibstoff.

Auf der Grundlage von Messungen an zwei „Uralt-Technik“-Flugzeug-Kolbenmotoren (150 und 180 PS) werden die folgenden Emissionsfaktoren für Russpartikel (Soot) im Reiseflug vorgeschlagen (Anhang 4):

Soot Emission Factors (mg soot / kg fuel)	
Fuel	CR
AVGAS 100LL (leaded)	40
AVGAS 91/96UL (unleaded)	1

### c) Emissionen in Flugplatzrunden („Uralt-Technik“-Motoren)

Platzrunden werden auf Flugplätzen oft zu Trainingszwecken geflogen. Weil einmotorige Kolbenmotor-Flugzeuge unter anderem für die Grundschulung von Piloten eingesetzt werden, haben solche Flugzeuge normalerweise einen hohen Anteil an Platzrunden.

Für ein typisches viersitziges Kolbenmotor-Flugzeug werden die totalen Emissionen für eine Platzrunde in den Tabellen 1 und 2 dargestellt (aus Anhang 2, Abschnitt 3 g). Vorgeschlagene Mittelwerte für ein Kolbenmotorflugzeug höherer Leistung sind in Tabelle 3 zu finden.

Normalerweise wird für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine vollständige Verbrennung angenommen. Rechnerisch heisst dies, die Anzahl kg Treibstoff mit dem Faktor 3.17 zu multiplizieren, um

die Anzahl kg CO<sub>2</sub> zu erhalten (Abschnitt 2.2.1 c). Wie gezeigt wurde, verbrennen „Uralt-Technik“-Kolbenmotoren beim Fliegen in Platzrunden den Treibstoff extrem unvollständig. In Tabelle 1 und 2 wurde dies bei der Angabe der CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt. Mit dieser Methodik entspricht die Summe der einzelnen ausgewiesenen Emissionen den totalen Emissionen.

Bei der Erstellung von Emissionsinventaren werden jedoch CO<sub>2</sub>- (und H<sub>2</sub>O)-Emissionen üblicherweise so berechnet, **wie wenn die Verbrennung vollständig wäre**. Die **Schadstoffmengen** müssen dann als **Teilmenge der CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Emissionen** angesehen werden. Dies macht durchaus Sinn, da die meisten CO und HC Schadstoffe nach der Freisetzung in der Atmosphäre mit der Zeit in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O umgewandelt werden.

Tabelle 1 und 2: Emissionen eines typischen **4-sitzigen einmotorigen Kolbenmotor Flugzeugs (180PS)** beim Fliegen von Platzrunden (aus Anhang 2, Abschnitt 3 g). Bemerkung: Entgegen der üblichen Konvention werden CO<sub>2</sub>-Emissionen hier mengenmässig so angegeben, wie sie direkt aus dem Auspuff kommen, unter Einbezug der unvollständigen Verbrennung im Motor (siehe Erklärungen oben).

**Total circuit emissions (taxi-in, 1 circuit, taxi-out)**

Elevation	fuel (kg)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)	CO2 (kg)	H2O (kg)	lead (g)
2000ft	2.83	3305	73	3	5.66	3.40	2.25
5600ft (Samedan)	2.76	2562	67	8	5.51	3.31	2.19

**Total circuit emissions (1 circuit without taxi)**

Elevation	fuel (kg)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)	CO2 (kg)	H2O (kg)	lead (g)
2000ft	1.90	2200	45	3	3.79	2.28	1.51
5600ft (Samedan)	1.82	1898	44	5	3.65	2.19	1.45

Tabelle 3: Emissionen eines typischen **einmotorigen Hochleistungsflugzeugs mit Kolbenmotor (300PS)** beim Fliegen von Platzrunden (aus Anhang 2, Abschnitt 5 h). Das getestete Muster verfügt über automatische Gemischanpassung für “best power”. Bemerkung: Entgegen der üblichen Konvention werden CO<sub>2</sub>-Emissionen hier mengenmässig so angegeben, wie sie direkt aus dem Auspuff kommen, unter Einbezug der unvollständigen Verbrennung im Motor (siehe Erklärungen oben).

TCM IO-550 B	fuel (kg)	CO (g)	HC (g)	NOx (g)	CO2 (kg)	H2O (kg)	lead (g)
1 Aerodrome circuit	3.9	3300	60	22	7.8	4.6	3.1

#### d) Emissionen im Lande- und Startzyklus

Die Berechnung der Emissionen im Lande- und Startzyklus (LTO-Zyklus) wurden gemäss den Vorschlägen im Abschnitt 2.1.2 und mit Hilfe der Messdaten aus den BAZL-Datenblättern durchgeführt.

Tabelle 4: LTO Treibstoffverbrauch und Emissionen eines typischen **Ultraleichtflugzeugs mit Viertakt-Verbrennungsmotor (Schweiz: Ecolight)**. Bemerkung: Keine Blei- und Bromidmissionen. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

ECOLIGHT (MICROLIGHT 4 - STROKE)	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	1.4	47	940	33	0.002	0.0

Tabelle 5: LTO Treibstoffverbrauch und Emissionen eines typischen **einmotorigen Schulflugzeugs mit Kolbenmotor (150PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE PISTON AIRCRAFT 150HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	3.2	47	2397	28	0.17	2.5

Tabelle 6: LTO Treibstoffverbrauch und Emissionen eines **einmotorigen Flugzeugs mit Turbodieselmotor (135HP)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE TURBO DIESEL 135HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	1.6	5	19	30	0.09	0.0

Tabelle 7: LTO Treibstoffverbrauch und Emissionen eines **typischen 4-sitzigen einmotorigen Kolbenmotor Flugzeugs (180PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE PISTON AIRCRAFT 180HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	3.9	71	3930	12	0.20	3.1

Tabelle 8: LTO Treibstoffverbrauch und Emissionen eines **einmotorigen Hochleistungsflugzeugs mit Kolbenmotor (300PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE PISTON AIRCRAFT 300HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	7.5	174	7327	24	0.39	6.0

Tabelle 9: LTO Treibstoffverbrauch und Emissionen eines **zweimotorigen Hochleistungsflugzeugs mit Kolbenmotor (2 x 325PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

TWIN ENGINE PISTON AIRCRAFT 2 X 325HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
LTO TOTAL FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	21.6	244	19330	46	1.12	17.2

### e) Emissionen im Reiseflug

Die Tabellen unten zeigen den Treibstoffverbrauch (in kg) und Emissionen (in g) pro Flugstunde im Reiseflug. Die Einstellung der Motorenleistung und des Gemischs (abhängig von der Motorentechnologie) wurde gemäss den Beschreibungen im Anhang 3 durchgeführt.

Tabelle 10: Treibstoffverbrauch und Emissionen pro Reiseflugstunde eines typisches **Ultraleichtflugzeugs mit Viertakt Verbrennungsmotor (Schweiz: Ecolight)**. Bemerkung: Keine Blei- und Bromid-emissionen. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

Ecolight Aircraft (Microlight 4-Stroke)	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
CRUISE 1HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	8.7	67	1090	243	0.009	0.0

Tabelle 11: Treibstoffverbrauch und Emissionen pro Reiseflugstunde eines typischen **einmotorigen Schulflugzeugs mit Kolbenmotor (150PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE PISTON AIRCRAFT 150HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
CRUISE 1HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	20.9	243	8557	772	1.09	16.6

Tabelle 12: Treibstoffverbrauch und Emissionen pro Reiseflugstunde eines **einmotorigen Flugzeugs mit Turbodieselmotor (135HP)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE TURBO DIESEL 135HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
CRUISE 1HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	14.1	22	91	373	0.8	0.0

Tabelle 13: Treibstoffverbrauch und Emissionen pro Reiseflugstunde eines **typischen 4-sitzigen einmotorigen Kolbenmotor Flugzeugs (180PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE PISTON AIRCRAFT 180HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
CRUISE 1HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	23.0	197	6743	903	1.20	18.3

Tabelle 14: Treibstoffverbrauch und Emissionen pro Reiseflugstunde eines **einmotorigen Hochleistungsflugzeugs mit Kolbenmotor (300PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

SINGLE ENGINE PISTON AIRCRAFT 300HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
CRUISE 1HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	49.7	268	23490	1149	2.58	39.5

Tabelle 14: Treibstoffverbrauch und Emissionen pro Reiseflugstunde eines **zweimotorigen Hochleistungsflugzeugs mit Kolbenmotor (2 x 325PS)**. Die Russemissionen sind abgeschätzt.

TWIN ENGINE PISTON AIRCRAFT 2 x 325HP	Fuel (kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Soot (g)	Lead (g)
CRUISE 1HOUR FUEL (kg) or EMISSIONS (g)	106.0	766	60088	1648	5.51	84.2

## f) Emissionen eines modernen Flugdieselmotors – ein Vergleich

Dieselmotoren sind Magermotoren, d.h. der Verbrennungsprozess läuft mit Luftüberschuss (mit viel zusätzlichem Sauerstoff) ab! Beim TAE-125-01 Centurion 1.7, den das BAZL gemessen hat, lag der Wert für  $\lambda$  bei mindestens 1.3. In jedem stationären Betriebszustand (Start, Steigflug, Reiseflug, Anflug) läuft der FADEC geregelte Motor mager („lean“). Mit dem im Abschnitt 2.2.2 f dargestellten Hintergrund wird verständlich, dass die **Emissionen im Vergleich zu einem „Uralt-Technik“-Motor minimal sind. Je nach Betriebszustand hat der Flugdieselmotor zirka 100 Mal geringere gasförmige Schadstoffemissionen** (vergleiche Tabellen 6 und 12, sowie Abbildungen 18 und 19).

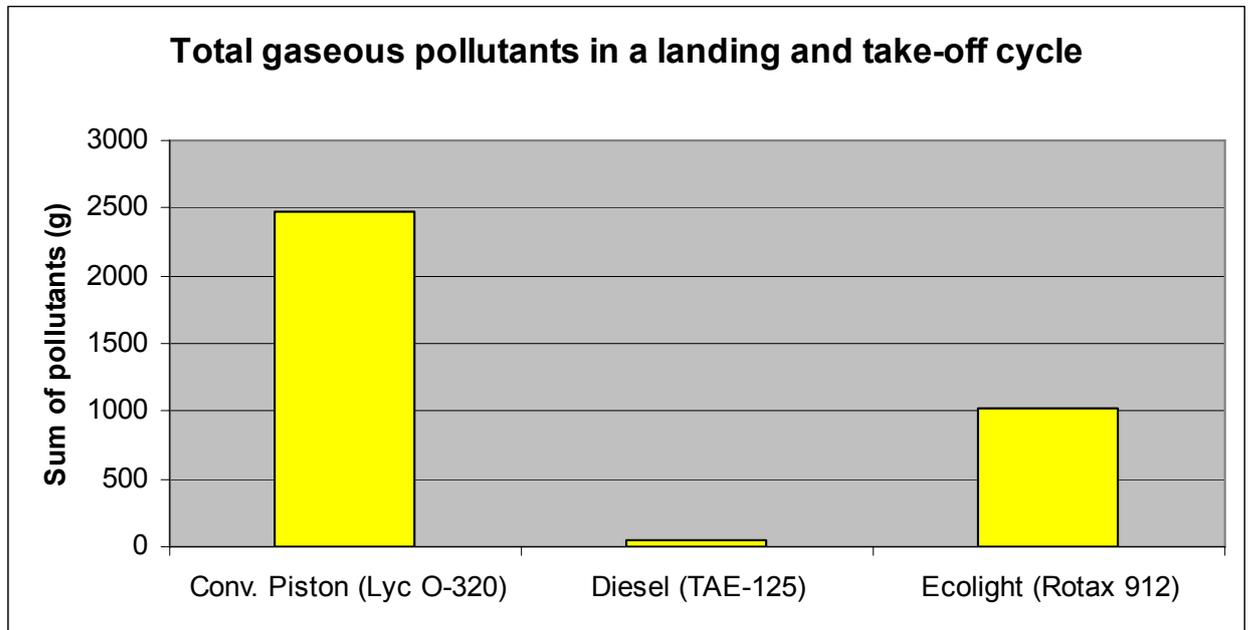


Abbildung 18: Summe der gasförmigen Emissionen im Lande- und Startzyklus, auf Grundlage der BAZL-Messungen, für einen „Uralt-Technik“-Motor, einen ähnlich starken Turbodiesel und einen Viertaktmotor für Ecolight (schweizerisches Ultraleichtflugzeug).

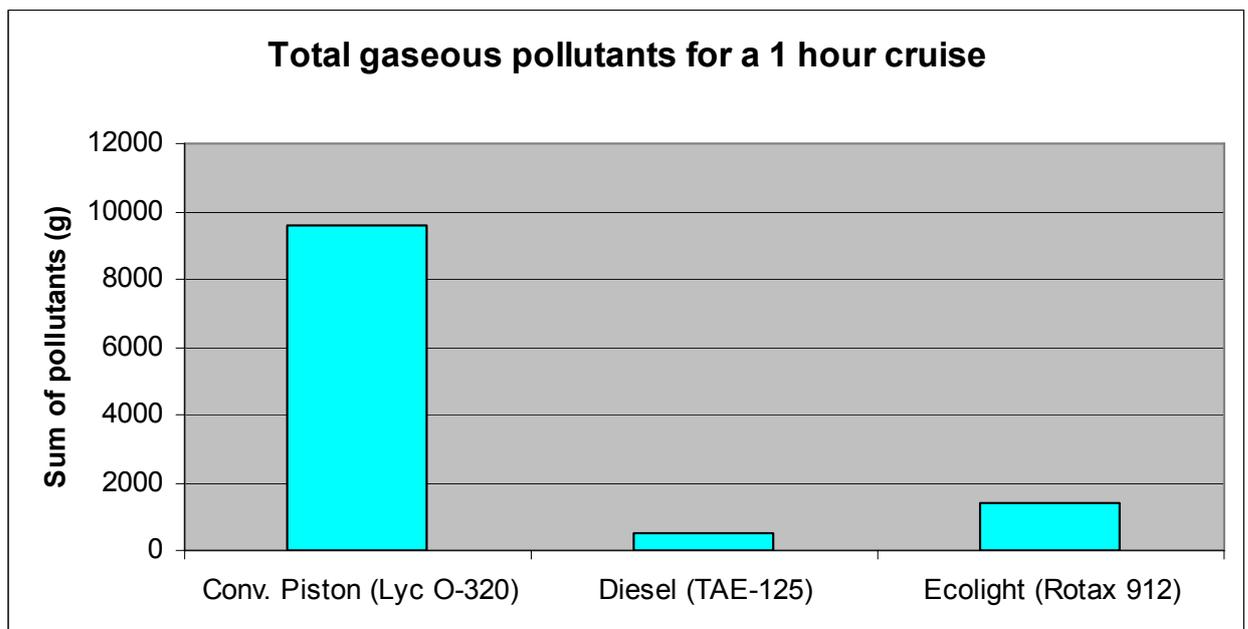


Abbildung 19: Summe der gasförmigen Emissionen für eine Stunde Reiseflug, auf Grundlage der BAZL-Messungen, für einen „Uralt-Technik“-Motor, einen ähnlich starken Turbodiesel und einen Viertaktmotor für Ecolight (schweizerisches Ultraleichtflugzeug).

**Partikelemissionen:** Bei Anflugeistung mit „Uralt-Technik“-Motor und vollreichem Gemisch (full rich) betragen der mittlere Partikeldurchmesser um die 100 nm und Partikelkonzentration etwa 10 Millionen nicht-flüchtige Partikel pro Kubikzentimeter (cm<sup>3</sup>) Abgas. Diese Werte sind mit denen eines Dieselmotors ohne Partikelfilter vergleichbar (siehe Abschnitt 2.2.3 a).

Nach heutigem Wissen können die Partikelemissionen des Turbodiesels nicht als schlimmer angesehen werden als diejenigen des „Uralt-Technik“-Motors, welcher verbleites Benzin bei treibstoffreichem Gemisch verwendet. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die chemische Zusammensetzung der Partikel zum Teil unterschiedlich ist, mit möglichen unterschiedlichen gesundheitlichen Auswirkungen, wenn die Partikel direkt eingeatmet werden.

Der Ecolight-Motor (Rotax 912) hat sehr geringe Partikelemissionen, wenn er mit MOGAS betrieben wird.

#### **g) Anteil der Flugzeug-Kolbenmotoren am Total der Luftfahrtemissionen**

Das BAZL ist gesetzlich verpflichtet, jährliche Emissionsberechnungen nach verschiedenen Prinzipien durchzuführen. In diesem Zusammenhang wurden fortschrittliche Modelle entwickelt, welche jede einzelne Flugbewegung und jedes Flugzeug mit seinen individuellen Motoren bzw. Triebwerken berücksichtigen. Das BAZL stellt darüber hinaus externen Institutionen Emissionsdaten zur Verfügung, z.B. für Umweltverträglichkeitsprüfungen.

Eines der Modelle berechnet den Treibstoffbedarf (CO<sub>2</sub>) und die Emissionen für alle Flüge während eines Jahres von A nach B innerhalb der Schweiz und von allen Flügen von A in der Schweiz bis zur ersten Destination B im Ausland. Das Resultat für den Treibstoffbedarf entspricht ungefähr der während des betrachteten Jahres in der Schweiz getankten Menge Treibstoff (Absatzprinzip). Dieses Modell wurde für den unten stehenden Vergleich angewendet.

Um die totalen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Grundlage des getankten Treibstoffs zu bestimmen, braucht es keine komplizierte Berechnung, da jedes kg Flugtreibstoff letztendlich in rund 3.15 kg CO<sub>2</sub> umgewandelt wird, egal in welchem Motor der Treibstoff verbrannt wird. Die Situation ist völlig anders für Schadstoffemissionen, welche von der Motorentechnologie und demzufolge von den tatsächlich an einem Flugzeug montierten Motoren abhängen. Dafür braucht es Kenntnisse über den exakten Motorentyp, welcher bei einem Flugzeug installiert ist.

Bezüglich Treibstoffverbrauch (CO<sub>2</sub>) können Flugzeug-Kolbenmotoren für ein Land wie die Schweiz vernachlässigt werden. In der Schweiz ist der Verbrauch von AVGAS tiefer als der Benzinverbrauch für Gartenpflege im so genannten „off road“-Sektor. Auch im Vergleich mit „Jet Fuel“ (für Gasturbinen bzw. Jet-Triebwerke) ist der Verbrauch von AVGAS nicht signifikant (siehe unten). Bezüglich Schadstoffemissionen ist das BAZL dank der durchgeführten Messungen nun in der Lage, ein klares Bild des Beitrags von Flugzeug-Kolbenmotoren an die totalen Emissionen des Luftverkehrs zu zeichnen.

Die Resultate für die Schadstoffemissionen wurden aus rund 700 000 Flügen des Jahrs 2004 berechnet. Für alle berechneten Ergebnisse aus den Flugoperationen wurden wo immer möglich die effektiv verwendeten Triebwerke mit individuellen Emissionsfaktoren für jedes einzelne Flugzeug berücksichtigt.

Flugzeug-Kolbenmotoren haben nach Absatzprinzip den folgenden Anteil an den totalen Emissionen der schweizerischen Zivilluftfahrt:

- **Weniger als 1% Anteil am gesamten Luftfahrt-CO<sub>2</sub>**
- **1% Anteil an NO<sub>x</sub>**
- **10% Anteil an HC**
- **40% Anteil an CO**
- **100% Anteil an Blei und Bromiden (AVGAS 100LL ist die einzige Bleiquelle!)\***

\*ungefähr 5 metrische Tonnen Blei und eine ähnliche Menge an Bromiden pro Jahr in der Schweiz

## 2.3 Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen optimieren

### 2.3.1 "Uralt-Technik"-Benzinmotoren

#### a) Einsatz von unverbleitem AVGAS

BAZL- und DLR-Messungen haben eine signifikante Reduktion von Flugzeug-Kolbenmotor-Emissionen durch die Verwendung des unverbleiten Schwedischen AVGAS 91/96 UL aufgezeigt. Daneben erfüllt der Treibstoff dieselben Standards wie das verbleite AVGAS. Der Motorenhersteller Textron Lycoming™ hat AVGAS 91/96 UL bereits 1995 als Treibstoff für eine Vielzahl seiner Motoren zugelassen. Die Motoren sind mit Typennummer in der „service instruction“ No. SI 1070 aufgelistet. Der Motorenhersteller Bombardier-Rotax™ empfiehlt seinerseits explizit den Einsatz dieses Treibstoffs für seine Motoren.

#### b) Tiefstmögliche CO<sub>2</sub>-Emissionen im Reiseflug (Leistung, Geschwindigkeit, Flughöhe)

Tiefstmögliche CO<sub>2</sub>-Emissionen sind das Resultat von tiefstmöglichem Treibstoffverbrauch (Abschnitt 2.2.1 c). Wenn CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden sollen, so muss ein Flug für tiefstmöglichen Treibstoffverbrauch optimiert werden. Um optimale Geschwindigkeiten und Flughöhen für ein gegebenes Flugzeug mit Kolbenmotor zu finden, wird zuerst ein theoretischer Ansatz gezeigt. Es gilt dabei zu beachten, dass Strecken, Geschwindigkeiten und Kräfte eigentlich gerichtete Grössen, so genannte Vektoren sind. Wenn Vektoren parallel liegen, wie im vorliegenden Fall, kann mit ihnen wie mit ungerichteten Grössen gerechnet werden, was die Sache vereinfacht.

Definition von Begriffen für theoretische Betrachtungen:

$$FF = \text{Treibstoffverbrauch} = \frac{\text{Treibstoffmasse}}{\text{Zeit}} = \frac{m_f}{t} \quad (1) \quad \text{und} \quad TAS = \text{wahre Geschwindigkeit} \quad (2)$$

$$S_R = \text{spezifische Reichweite} = \frac{\text{Distanz}}{\text{Treibstoffmasse}} = \frac{d}{m_f} = \frac{\frac{d}{t}}{\frac{m_f}{t}} = \frac{TAS}{FF} \quad (3)$$

$P$  = Motorenleistung

$$P_{req} = \text{erforderliche Leistung (für Flugzeug)} = \text{erforderlicher Schub} \cdot \text{wahre Geschwindigkeit} = F_{req} \cdot TAS \quad (4)$$

$P_{avail}$  = verfügbare Leistung (vom Motor bei "Vollgas")

$$SFC = \text{spezifischer Treibstoffverbrauch} = \frac{FF}{P} = \frac{\frac{m_f}{t}}{P} = \frac{m_f}{t \cdot P} \quad (5)$$

Die Geschwindigkeit für die grösste Reichweite ( $v_{best\ range}$ ) ist die Geschwindigkeit, bei welcher das Verhältnis zwischen Vorwärtsgeschwindigkeit (eine wahre Geschwindigkeit  $TAS$ ) und Treibstoffverbrauch ( $FF$ ) so gross wie möglich ist (Gleichung 3).

Der Ausdruck  $TAS : FF$  wird spezifische Reichweite genannt. Die spezifische Reichweite hängt für ein gegebenes Flugzeug ab von der

- Leistungssetzung inklusive Gemischeinstellung
- Sauberkeit des Flugzeugs
- Flugzeugmasse
- Dichtehöhe

Bei  $v_{best\ range}$ , ist die spezifische Reichweite am grössten.

#### Wie kann $v_{best\ range}$ gefunden werden?

Eine praktische Lösung ist die andauernde automatische Berechnung von  $TAS : FF$  (oder besser: *Ground Speed* :  $FF$ , was den Wind mitberücksichtigt). Dies kann mit einer Treibstoffdurchflussmessung erreicht werden, welche mit einem GPS gekoppelt ist und laufend das Verhältnis von zurückgelegten Nautischen Meilen (NM) zum verbrauchten Treibstoff anzeigt. Mit etwas Erfahrung kann das Verhältnis von NM zu Treibstoff auf einen möglichst hohen Wert gebracht werden, indem entsprechende Anpassungen an der Leistung und an der Flughöhe vorgenommen werden.

Theoretischer Ansatz:

Für den üblichen Leistungsbereich eines Flugzeug-Kolbenmotors ist der Treibstoffverbrauch proportional zur Leistung an der Propellerwelle  $P$ . Mit (5) kann der Treibstoffverbrauch geschrieben werden als:

$$FF = \frac{FF}{P} \cdot P = SFC \cdot P \quad (6)$$

Gleichung (6) in (3) ergibt für die spezifische Reichweite:

$$S_R = \frac{TAS}{SFC \cdot P} \quad (7)$$

Der Ausdruck  $SFC$  beschreibt die Antriebseffizienz.  $TAS : P_{req}$  ist ein Ausdruck für die aerodynamische Güte der Flugzeugzelle. Genauer gesagt wird die grösste spezifische Reichweite bei der höchst möglichen  $TAS$  bei gleichzeitig tiefstmöglichem  $SFC$  und tiefstmöglicher erforderlicher Leistung erzielt.

$$S_R \text{ max.} = \max. \frac{TAS}{SFC \cdot P_{req}} \quad (8)$$

Um die Sache zu vereinfachen, wird die Optimierung in vier Schritte unterteilt:

- 1) Betrachtung der aerodynamischen Güte und der Flugzeugmasse (die Antriebseffizienz wird als konstant angenommen)
- 2) Betrachtung der Antriebseffizienz alleine
- 3) Einbezug der Flughöhe
- 4) Zusammenfassung und Daumenregeln

1) Ausdruck für die aerodynamische Güte, mit Gleichung (4)

$$\frac{TAS}{P_{req}} = \frac{TAS}{F_{req} \cdot TAS} = \frac{1}{F_{req}} \quad (9)$$

Gleichung (9) drückt die Tatsache aus, dass die aerodynamische Güte am grössten ist, wenn der benötigte Schub am kleinsten ist. Im horizontalen, geradlinigen Flug mit konstanter Geschwindigkeit kompensiert der Schub exakt den Widerstand. Mit anderen Worten: Die Anzahl Newton der Schubkraft ist gleich der Anzahl Newton der Widerstandskraft. Bei grösstmöglicher aerodynamischer Güte muss demnach der Widerstand minimal sein. Aus den Auftriebs- und Widerstandsformeln (welche hier nicht aufgeschrieben werden) folgt, dass der kleinstmögliche Widerstand dann erreicht wird, wenn das Verhältnis aus Auftrieb zu Widerstand maximal ist. Die wahre Geschwindigkeit für den kleinsten Widerstand,  $v_{min\_drag}$ , kann theoretisch mit Hilfe einer flugzeugspezifischen Kurve gefunden werden, welche die erforderliche Leistung in Abhängigkeit der  $TAS$  darstellt (Abbildung 20).

Im Reiseflug wird das Flugzeug durch das Verbrennen von Treibstoff leichter, was die benötigte Auftriebskraft reduziert (kleinerer Auftriebskoeffizient nötig), was eine Verringerung des Widerstands bewirkt (Abbildung 21).

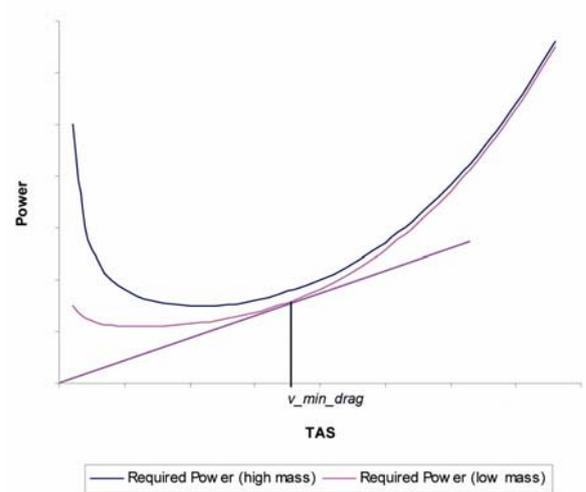


Abbildung 20: Erforderliche Leistung für ein gegebenes Flugzeug in Abhängigkeit von der  $TAS$  für zwei verschiedene Flugzeugmassen. Der höchstmögliche Wert von Gleichung (9) wird mittels Tangente vom Ursprung zur Leistungskurve gefunden. Bei minimaler Tangentensteigung ist  $P_{req} : TAS$  minimal bzw.  $TAS : P_{req}$  maximal. Die entsprechende Geschwindigkeit für kleinsten Widerstand ist  $v_{min\_drag}$ . Die beiden Leistungskurven wurden durch rechnerische Modellierung einer Flugzeugzelle erzeugt. Die Tangente in der Abbildung zeigt ein Beispiel für die Bestimmung von  $v_{min\_drag}$  für die kleinere Flugzeugmasse.

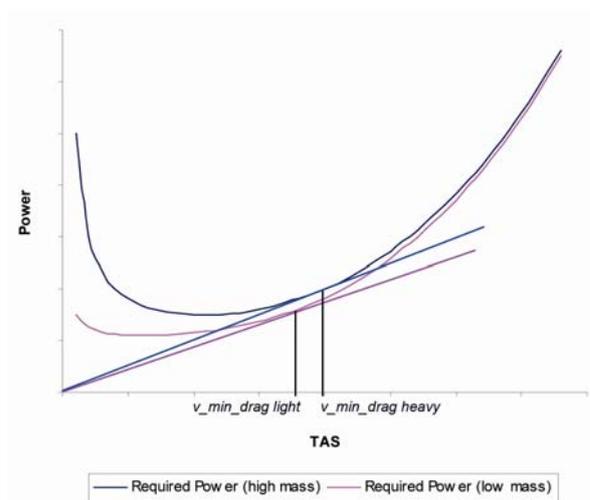


Abbildung 21: Erforderliche Leistung für ein gegebenes Flugzeug in Abhängigkeit von der  $TAS$  für zwei verschiedene Flugzeugmassen. Bei abnehmender Flugzeugmasse nimmt  $v_{min\_drag}$  ab.

- Für grösste Reichweite (bei konstantem SFC) ist  $v_{best\ range}$  gleich  $v_{min\ drag}$ .
- Mit abnehmendem Flugzeuggewicht wird  $v_{min\ drag}$  kleiner.
- Bei Gegenwind wird  $v_{min\ drag}$  grösser. (Der Ursprung der Tangente in Abbildung 20 verschiebt sich nach rechts.)
- $v_{min\ drag}$  ist eine kleine Reisegeschwindigkeit verglichen mit "konventionellen" Reisegeschwindigkeiten.
- Die Verminderung des Widerstandes wird allgemein nicht nur durch Annäherung an  $v_{min\ drag}$ , erreicht, sondern auch durch die Befreiung der Flugzeugzelle und des Propellers von Insekten und Schmutz und durch Verbesserung von Übergängen an der Motorenverkleidung und an der übrigen Flugzeugzelle.

## 2) Antriebseffizienz

Im allgemeinen laufen Flugzeug-Kolbenmotoren effizienter (*SFC* wird besser, kleiner):

- Wenn die erforderliche Leistung, um bei einer bestimmten *TAS* zu fliegen, mit ganz offener Drosselklappe ("Full Throttle") erzielt werden kann.
- Wenn die Motordrehzahl so tief wie möglich ist, um die erforderliche Leistung zu erzeugen.
- Wenn der Motor zwischen 40% und 70% der maximalen Leistung läuft (bezogen auf Meereshöhe).
- Wenn das Luft/Treibstoffgemisch optimal eingestellt ist (Zusammenfassung im nächsten Abschnitt c).

Bei tiefer Motordrehzahl ist die Zylinderfüllung mit Luft/Treibstoffgemisch besser und es gibt weniger Reibungsverluste. Jedoch gibt es auch eine Drehzahlgrenze nach unten für die effiziente Leistungserzeugung. Bei ganz geöffneter Drosselklappe arbeitet das Ansaugsystem (Saugmotor) effizienter.

Tiefe Motordrehzahl kann mit Hilfe eines Verstellpropellers erreicht werden. Tatsächlich ist die Propellereffizienz eines Verstellpropellers auch bei tieferer Drehzahl sehr gut. Kombiniert mit besserer Effizienz des Motors bei tieferer Drehzahl ergibt sich eine Verbesserung der Effizienz des ganzen Antriebssystems. Die Situation kann in gewisser Weise mit der Fahrt eines Autos verglichen werden: Bei 90 km/h wird anstelle des 4. Gangs der 5. Gang gewählt.

Die Erzeugung der erforderlichen Leistung bei tieferer Drehzahl bewirkt eine relative Erhöhung des Manifold Pressure (MAP), respektive des Drehmoments. Für etliche Triebwerke gilt die Faustregel, dass der MAP (gemessen in InHg) die Drehzahl/100 nicht übersteigen darf. Der Grund liegt darin, dass der Motor näher an die Klopfgrenze kommen kann. Er läuft zwar im Allgemeinen eher kühler aber mit mehr Zylinderdruck. Die Limiten für die Drehzahl und MAP-Einstellungen werden von Motorenherstellern angegeben (Engine Operator's Manual, AFM) und gehören zu den Kenntnissen, welche für den optimalen Betrieb eines bestimmten Flugzeugmusters nötig sind.

Neben einer Verbesserung des *SFC* durch tiefere Drehzahl (nicht tiefste Leistung) wird der Propellerlärm deutlich reduziert. Eine Drehzahlreduktion von nur 100 RPM reduziert die Machzahl an den Propellerspitzen deutlich, mit einem eindrücklich positiven Effekt auf den Propellerlärm. Dies ist eine „Win-Win“-Situation für die Umwelt, da gleichzeitig Lärm und Schadstoffemissionen reduziert werden.

Bei Flugzeugen mit Festpropeller ist das Fliegen mit **stark** reduzierter Drehzahl oft nicht sinnvoll. Ob eine Effizienzsteigerung durch Drehzahlreduktion möglich ist, hängt sehr von der gewählten Propellersteigerung ab und ist deshalb extrem abhängig vom jeweiligen Flugzeugmuster.

## 3) Betrachtungen zur Flughöhe

Erinnern wir uns zuerst, dass der übliche Geschwindigkeitsmesser im Flugzeug eigentlich ein Druckmesser ist, welcher in Geschwindigkeitseinheiten angeschrieben wurde. Die angezeigte Geschwindigkeit wird "Indicated Air Speed" *IAS* genannt. Auf Meereshöhe ist *IAS* gleich gross wie *TAS*. *TAS* ist aber im eigentlichen Sinn die einzige wahre Fluggeschwindigkeit.

- Mit zunehmender Flughöhe ist *IAS* kleiner als *TAS*. Wenn *IAS* im Steigflug konstant gehalten wird, nimmt *TAS* zu.

Der dynamische Druck, welcher den Zeiger des Geschwindigkeitsmessers bewegt, entspricht dem dynamischen Druck in der Widerstandsformel für das Flugzeug. Daraus folgt:

- Wenn *IAS* im Steigflug konstant gehalten wird, bleibt auch der Widerstand konstant, aber *TAS* wird zunehmen. Aus Gleichung (4) folgt, dass die erforderliche Leistung zunimmt.
- Wenn *TAS* bei zunehmender Höhe konstant bleiben soll, muss *IAS* reduziert werden. Auf grösserer Höhe sind dann Widerstand und erforderliche Leistung kleiner.

Mit zunehmender Dichtehöhe verlieren Saugmotoren an Leistung, weil der Partialdruck des Sauerstoffs abnimmt. Beim Fliegen in grosser Dichtehöhe kann die verfügbare Leistung bei „Full Throttle“ auf 55% oder sogar darunter abfallen. Bei einer solchen relativ geringen Leistung mit „Full Throttle“, mit optimaler Gemischanpassung und reduzierter Drehzahl ist der Motor bei seinem kleinsten (besten) *SFC*. Trotz kleinerem Widerstand und höherer erreichbarer *TAS* auf grösserer Höhe begrenzt die

relativ geringe verfügbare Leistung die *TAS* auf einen relativ tiefen Wert, nicht sehr weit oberhalb von  $v_{min\ drag}$ . Dies bedeutet, dass die Flugzeugzelle nahe bei ihrer besten aerodynamischen Güte fliegt. Beide Effekte, kleiner *SFC* und die *TAS* nahe bei  $v_{min\ drag}$ , führen in ihrer Kombination zur grössten spezifischen Reichweite.

Während des Reiseflugs wird das Flugzeug wegen des verbrannten Treibstoffs leichter. Abbildung 21 schlägt als Optimierung eine entsprechende Reduktion der *TAS* vor. Dies kann z.B. durch sukzessives Höhersteigen bewerkstelligt werden, weil der Leistungsabfall schliesslich die *TAS* reduziert, trotz geringeren Widerstands auf grösserer Flughöhe.

Bei Turbomotoren kann ein hoher Luftdruck (genügend Sauerstoff pro Volumen) im „Manifold“ bis in grössere Höhen aufrechterhalten werden. Bei Turbomotoren liegt die Flughöhe für grösste spezifische Reichweite meist höher, weil der Motor die erforderliche Leistung auf grösserer Höhe immer noch erbringt. Die kleinere Luftdichte in grösserer Höhe reduziert den Widerstand, mit dem Effekt einer höheren erreichbaren *TAS*. Dies vergrössert die spezifische Reichweite (Gleichungen 4 und 8).

Allerdings führt eine grosse Flughöhe für Flugzeug-Kolbenmotoren nicht notwendigerweise zur grössten spezifischen Reichweite. Der Treibstoff für den Steigflug auf grössere Höhen und die Windkomponenten müssen berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist der *SFC* eines Kolbenmotors nicht sehr höhen- und geschwindigkeitsabhängig – ganz im Gegensatz zu einem Jettriebwerk. Aus diesen Gründen kann eine grosse spezifische Reichweite auch auf kleineren Flughöhen erreicht werden, wenn die Leistung auf einen Wert um 50% der maximalen Leistung auf Meereshöhe zurückgenommen wird, die Drehzahl relativ tief und der MAP – innerhalb der zulässigen Limiten – relativ hoch ist. Die erreichte *TAS* liegt dann nicht sehr weit über  $v_{min\ drag}$ . Die Situation ist in gewissem Sinne vergleichbar mit einer verbrauchsoptimierten Fahrt eines Autos auf der Autobahn: Anstelle von 120 km/h im 4. Gang wird mit 100 km/h im 5. Gang gefahren.

#### 4) Zusammenfassung und Daumenregeln

Die Geschwindigkeit für grösste spezifische Reichweite liegt nicht sehr weit oberhalb  $v_{min\ drag}$ . In jedem Fall sollte das AFM konsultiert werden. Zusätzlich können die folgenden Daumenregeln eine Optimierungshilfe sein:

Am wenigsten CO<sub>2</sub>-Emissionen können im Reiseflug eventuell erzielt werden mit:

- $v_{best\ range}$  (ohne Wind) = *TAS* für beste Steigrate + 15%
- $v_{best\ range}$  + 1/4 der Gegenwindkomponente (für Gegenwind)
- $v_{best\ range}$  – 1/5 der Rückenwindkomponente (für Rückenwind)
- $v_{best\ range}$  – 4% pro 100 kg unterhalb MTOM
- Erforderliche Leistung nicht unter 45% und selten über 55%
- Erforderliche Leistung bei relativ tiefer Drehzahl und relativ hohem MAP (Limiten beachten!)
- Optimale Gemischeinstellung (mit hohem Beitrag, Anhang 2, Zusammenfassung im folgenden Abschnitt c)



Bild 5: Testflug über den Schweizer Alpen

CO<sub>2</sub>-optimierter Reiseflug: Zeitverlust und Treibstoffgewinn in Funktion von Flughöhe (PA) und reduzierter Leistungssetzung, Gemisch 50° "rich of peak EGT", ohne Steigflug, ohne Wind, Testflugzeug HBKEY, Lyc IO-360 Serie, CS Propeller

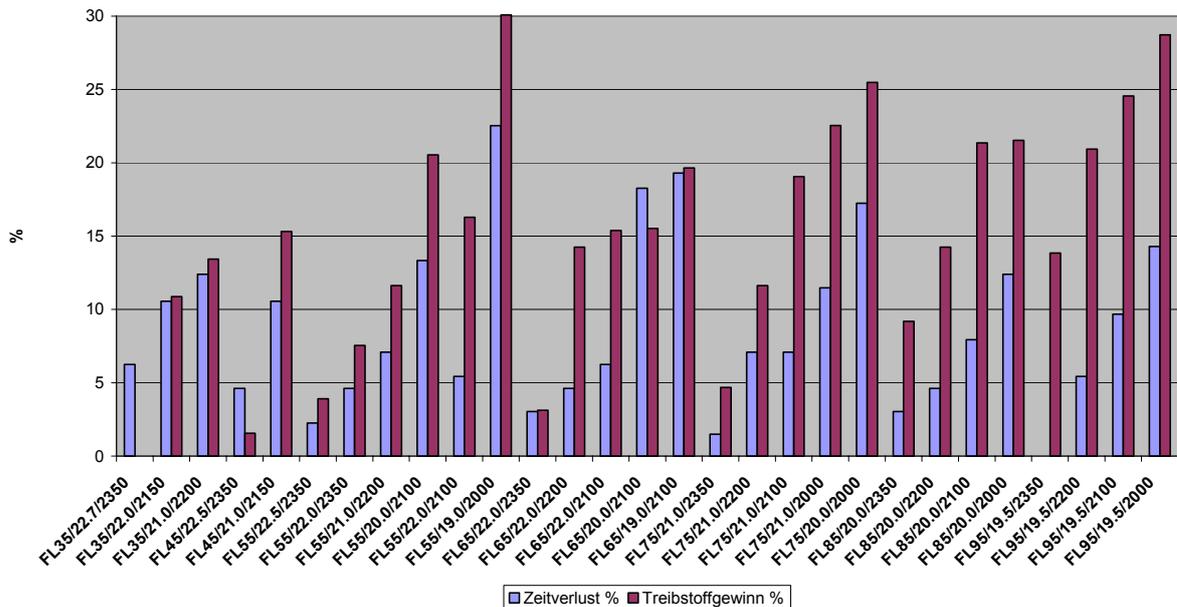


Abbildung 22: Beispiel für den Treibstoffgewinn (= CO<sub>2</sub>-Reduktion, rote Säulen) bei Anwendung der erläuterten Erkenntnisse. Basis für den Vergleich (0% Linie) ist der Treibstoffverbrauch bei Standard 65% Leistungssetzung eines Saugmotors bis auf FL65. Lesehilfe an einem Beispiel: FL55/20.0/2100 bedeutet Reiseflug auf 5500ft Druckhöhe, Motor 20 InHg MAP und 2100 RPM. Gegenüber der Standardeinstellung resultiert ohne Wind 21% weniger Treibstoffverbrauch und ein Zeitverlust von 13%. Ersichtlich wird z.B. auch, dass sich auf FL55 mit entsprechender Leistungsreduktion eine ähnlich grosse Reichweite erzielen lässt, wie auf FL95.

Warteschleifen während des Fluges:

Wenn ein Flugzeug Warteschleifen fliegen muss (z.B. während eines Anflugs), so ist die grösste spezifische Reichweite unwichtig. In diesem Fall sollte das Flugzeug den Treibstoff mit möglichst geringer Rate verbrennen, um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Dies entspricht einer Leistungssetzung für möglichst lange Flugzeit (*best endurance*). Wie früher erklärt wurde, verhalten sich der Treibstoffverbrauch und die abgegebene Leistung beim Kolbenmotor annähernd proportional. Der geringste Treibstoffdurchsatz pro Zeit wird deshalb theoretisch bei einer Geschwindigkeit erzielt, bei welcher am wenigsten Leistung erforderlich ist, um das Flugzeug horizontal bzw. in einer leichten Kurve zu halten. Es ist die Geschwindigkeit bei welcher die erforderliche Leistung am kleinsten ist (tiefster Punkt der Kurven in Abbildung 23). Bei höherer Masse nimmt die Geschwindigkeit für *best endurance* zu. Die tiefste erforderliche Leistung ist gleich dem tiefsten Energieverbrauch pro Zeit, um das Flugzeug in der Luft zu halten. Die Geschwindigkeit, bei welcher dies erreicht wird, ist die Geschwindigkeit für das kleinste Sinken ohne Motor ( $v_{min\_sink}$ ).

Normalerweise wird  $v_{min\_sink}$  in einem AFM für Kolbenmotor-Flugzeuge nicht direkt angegeben. Aber sie ist sehr nahe bei  $v_y$ , der Geschwindigkeit für die beste Steigrate. Der Grund ist folgender: Die beste Steigrate wird bei derjenigen Geschwindigkeit erreicht, bei welcher der Unterschied zwischen verfügbarer Leistung und erforderlicher Leistung für den Steigflug am grössten ist. Der Leistungsüberschuss bestimmt die Steigrate. Weil die erforderliche Leistung bei  $v_{min\_sink}$  am kleinsten ist, liegt die Geschwindigkeit für die beste Steigrate normalerweise in der Nähe der Geschwindigkeit  $v_{min\_sink}$ .

- Die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen in einer Warteschleife können eventuell erzielt werden mit:
- Fluggeschwindigkeit (*IAS*) gleich  $v_y$  oder wenig darüber (Einschränkungen gemäss AFM sind möglich)
  - Erforderliche Leistung bei relativ tiefer Drehzahl und relativ hohem MAP (Limiten beachten!)

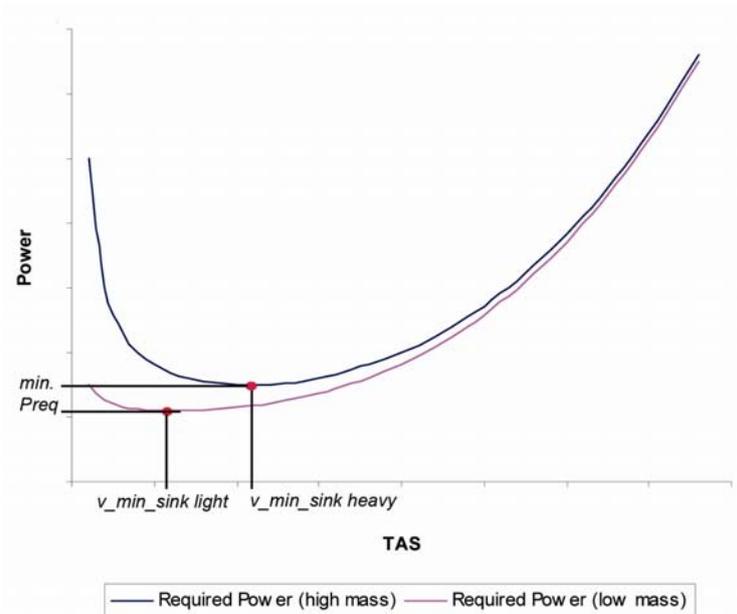


Abbildung 23: Bestimmung der Geschwindigkeit für möglichst lange Flugzeit (*best endurance*).

### c) Bedienung der manuellen Gemischverstellung (Steigflug, Reiseflug, Sinkflug/Anflug)

#### Steigflug

- Im Steigflug kann das Gemisch in vielen Fällen auf **„best power“** angepasst werden, **sofern dies gemäss AFM/EOM erlaubt ist und die CHT-Limiten eingehalten werden können**. Die Gemischverstellung mit Hilfe des Treibstoffverbrauchs kann nützlich sein (wie in Abschnitt 2.2.2 L beschrieben). **Bei zunehmender Dichtehöhe muss** das Gemisch **in der Regel** hin zu weniger treibstoffreichem Gemisch angepasst werden.

#### Reiseflug **„rich of peak EGT“**

- Aus Sicht der Emissionen ist im Reiseflug die Wahl einer Gemischeinstellung etwas auf der treibstoffreichen Seite (**„slightly rich of peak EGT“**) immer noch besser, als eine **„best power“**-Einstellung oder sehr treibstoffreiche Einstellung, obwohl es mehr NO<sub>x</sub>-Emissionen geben wird. Der Treibstoffverbrauch geht zurück (weniger totales CO<sub>2</sub>), es gibt weniger CO- und HC-Emissionen und weniger Partikelmasse.

#### Reiseflug 50°F **„lean of peak EGT“**

- Aus Sicht der Emissionen wäre die treibstoffmagere Gemischeinstellung optimal. Mit dem tiefstmöglichen spezifischen Treibstoffverbrauch für eine gewünschte Leistung und einem Minimum bzw. tiefen Werten für die Emissionsfaktoren resultieren tiefstmögliche Emissionen (wie in Abschnitt 2.2.2 f gezeigt wurde). Der Motor kann gleichzeitig kühler laufen. Jedoch müssen im Minimum folgende Einschränkungen für einen sicheren Betrieb beachtet werden:
  - Das Motorenmanual und das AFM beschreiben explizit das Einstellen eines mageren Gemischs als Option.
  - Der Motor hat eine ausgewogene, praktisch identische Gemisch- und Temperaturverteilung in den verschiedenen Zylindern.

#### Sinkflug und Anflug

- Während des Sinkflugs mit unveränderter Gemischeinstellung wird das Gemisch eines Saugmotors immer treibstoffärmer (magerer) wegen der zunehmenden Luftdichte. Wenn das Gemisch vor dem Sinkflug ein wenig treibstoffreich ist, so erreichen die Zylinder während des Sinkflugs mit der Zeit die maximale Abgastemperatur (**„peak EGT“**). Im treibstoffarmen Fall, bei magerem Gemisch, erreichen die Zylinder im Sinkflug die kritische Gemischgrenze, wo die Verbrennung bis in den Auspuff hinein verzögert werden kann. Aus diesen Gründen werden

Piloten oft instruiert, den Gemischhebel für den Sink- oder Anflug direkt auf „full rich“ zu stellen. Dies kann die geschilderten Probleme vermeiden und ist einfach in der Anwendung.

- BAZL Messungen haben gezeigt, dass mit der einfachen „full rich“-Manipulation im Sinkflug und Anflug pro nautische Meile meist mehr Treibstoff verbrannt wird als im Reiseflug! In Kombination mit einer sehr unvollständigen Verbrennung bei „full rich“ können die totalen Emissionen im Sinkflug höher sein als im Reiseflug (Anhang 2).
- Anstelle einer „full rich“-Manipulation prüfte der Autor eine Alternative: Die Motorenleistung beim Sink- und Anflug liegt meist unterhalb 45%. Der Gemischhebel wurde unmittelbar vor Beginn des Sinkfluges nur soweit gestossen bis zirka 100°F „rich of peak EGT“ erreicht waren. Im Sinkflug wurde etwa alle 1000ft kurz kontrolliert und wenn nötig etwas nachgeschoben, um bei 100°F zu bleiben. Dieses Vorgehen hat drei Vorteile:
  - A) Bedeutende Mengen an Treibstoff und Emissionen können eingespart werden.
  - B) Der Motor läuft mit „best power“-Gemisch. Sollte im Sinkflug kurzzeitig viel Leistung notwendig werden, ist sie verfügbar. Das Gemisch ist genügend reich, damit der Motor sofort hochdrehen kann.
  - C) 100°F unterhalb der „peak EGT“ enthält eine Sicherheitsmarge, falls vergessen wird, das Gemisch während des weiteren Sinkflugs weiter anzureichern.Die Gemischeinstellung „full rich“ wurde vom Autor jeweils erst Mitte des Gegenanflugs gesetzt und im „Final Check“ überprüft, weil „full rich“ für den Fall eines Durchstartmanövers benötigt wird.

## 2.3.2 Wahl der Motorentechnologie

### a) FADEC für Benzinmotoren

Nach Meinung des Autors sind zertifizierte FADEC (Full Authority Digital Engine Control) für „Uralt-Technik“-Einspritzmotoren ein wertvolles Mittel, um den Treibstoffverbrauch und die Emissionen deutlich zu reduzieren. Ein FADEC System ist in der Lage, das Luft/Treibstoffgemisch in jedem einzelnen Zylinder individuell zu regeln und deshalb kann ein Motor im Reiseflug mager betrieben werden. Die manuelle Gemischeinstellung entfällt und wird durch eine optimierte, leistungsangepasste automatische Regelung ersetzt.

### b) Turbodieselmotor

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses BAZL-Berichts hat der getestete Turbodieselmotor bei weitem die geringsten gasförmigen Emissionen pro Leistungseinheit ausgewiesen. Die Turbodiesel-Technologie bringt die grösste Emissionsreduktion im Bereich der Flugzeug-Kolbenmotoren. Was die Partikelemissionen angeht, wird der Turbodiesel nicht schlechter eingestuft als „Uralt-Technik“-Motoren, welche mit AVGAS 100LL betrieben werden.



Bild 6: Abgasmessung am Turbodiesel-Flugmotor

### 3. Ausblick– geplante zukünftige Arbeiten

#### 3.1 Anzahl der gemessenen Motoren

##### 3.1.1 „Uralt-Technik“-Motoren und neue Motorenkonzepte

Einige BAZL-Daten beruhen auf Messungen an nur einem bestimmten Motor eines bestimmten Motorentyps. Zwischen verschiedenen Exemplaren desselben Motorentyps können aber zum Teil erhebliche Unterschiede auftreten. Aus diesem Grund plant das BAZL die Verbesserung der repräsentativen Auswahl von Motoren, indem die Messung an einer grösseren Anzahl von Motoren desselben Typs vorgenommen wird. Die Datenbank wird auch sukzessive durch Daten von noch fehlenden Motorentypen ergänzt.

##### 3.1.2 Mit FADEC modernisierte „Uralt-Technik“-Motoren

Während der letzten Jahre sind FADEC Optionen für Einspritzmotoren im Markt aufgetaucht, welche für verschiedene Kombinationen von Flugzeugzellen und Motoren zertifiziert wurden. Gemäss heutigem Wissen folgert der Autor, dass mit FADEC nachgerüstete Motoren erheblich geringere Emissionen aufweisen. Für fundierte Aussagen sind aber noch mehr Messungen nötig.

#### 3.2 Unverbleites AVGAS

In Europa ist AVGAS 100LL heute noch der **einzig**e im Markt verwendete **verbleite Treibstoff**. Neben Blei-Tetraethyl enthält dieser Treibstoff Bromide, welche zum Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre beitragen können. Das wissenschaftliche Forschungsprogramm, welches im Anhang 4 vorgestellt und zu einem Teil dokumentiert wurde, hat aufgezeigt, dass die Verwendung von AVGAS 91/96 UL die Emissionen von existierenden Flugzeug-Kolbenmotoren dramatisch reduzieren kann. Aus diesem Grunde unterstützt das BAZL unter Beibehaltung der Sicherheitsaspekte den Wechsel zum saubereren unverbleiten AVGAS. Unglücklicherweise kann AVGAS 91/96 UL das traditionelle AVGAS 100LL nicht in jedem Fall ersetzen, wegen einer etwas geringeren Klopfestigkeit. Weiterentwickeltes unverbleites AVGAS mit immer noch relativ niedrigen Emissionen, aber höherer Klopfestigkeit, wurde getestet. Treibstoffe wie C und G (Anhang 4) hätten das Potential, um 100LL vollständig zu ersetzen. Sie müssen aber noch besser evaluiert werden.

Unverbleites Autobenzin (MOGAS) ist nur mit Einschränkungen für den Einsatz in Flugzeugen tauglich. Für „Uralt-Technik“-Motorentypen braucht es – sofern überhaupt möglich – ein zusätzliches Typenzertifikat (STC), welches den sicheren Betrieb mit MOGAS garantiert. Meist muss dabei ein sehr geringer maximaler Ethanolgehalt vorgeschrieben werden. In Zukunft könnte es durch den in Europa steigenden Ethanolgehalt in Autobenzin Schwierigkeiten bei der Versorgung mit MOGAS für Flugzeuge geben. In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, dass MOGAS Substanzen enthalten kann, welche ein gewisses Risiko für die Verseuchung von Trinkwasser darstellen können<sup>10</sup>.



Bild 4: Erforschung von unverbleitem AVGAS, St. Stephan, Schweiz, Mai 2006. Von links nach rechts: C. Wahl, M. Kapernaum (beide DLR), L. Hjelmberg (Hjelmco), T. Rindlisbacher, W. Bula (beide BAZL)

<sup>10</sup> Im Jahre 2006 in der Schweiz verkauftes und analysiertes MOGAS enthielt überraschend grosse Mengen an MTBE.

### 3.3 Emissionsdaten für Helikopterturbinen und kleine “Turbofans”



Für andere Motorenfamilien ohne ICAO-Emissionszertifizierung, wie z.B. Helikopterturbinen und kleine Turbofans, gibt es immer noch einen grossen Mangel an verfügbaren individuellen Emissionsdaten. Das BAZL plant auf der Grundlage des Luftfahrtgesetzes (SR 748.0, LFG Art. 58) die Arbeit an zwei entsprechenden Paketen,:

- **Helicopter engine emissions**, Projekt **HELEN** (Start Mitte 2007)
- **Small turbofan engine emissions**, Projekt **STUF** (Start geplant für 2008).

Eine erste Machbarkeitsstudie unter Anwendung des BAZL-“low cost“-Messsystems wurde im Sommer 2006 an einem typischen Businessjet-Triebwerk durchgeführt. Die Bestimmung der gasförmigen Emissionen wurde mit der anspruchsvollen Messung der Partikelemissionen kombiniert (gemäss Anhang 4, Abschnitt 4). Die Messdaten wurden mit zertifizierungsähnlichen Daten verglichen, welche der Triebwerkhersteller freundlicherweise zur Verfügung stellte. Die beiden Datensätze stimmten in befriedigender Weise überein.

### 3.4 Internationale Aktivitäten

Auf Grund der Umweltschutzgesetze in verschiedenen Ländern und dem international gewachsenen Interesse wird die Verbesserung der Kenntnisse über die Emissionen von kleineren Motoren ohne Emissionszertifizierung immer wichtiger. Das BAZL unterstützt die Weiterentwicklung von ICAO-Anleitungsmaterial zur Berechnung von Emissionen des Luftfahrtsektors und für Berechnungen im Zusammenhang mit Umweltverträglichkeitsprüfungen.

- ENDE -

## 4. Zusammenstellung von Abkürzungen und Begriffen

AFM	Flugzeug Flughandbuch
AMSL	Über der mittleren Meereshöhe
AP	Leistungsstufe für Anflug (Approach)
ASTM	American Society for Testing and Materials, eine der weltweit grössten Organisationen für die Entwicklung von Standards
AVGAS	Flugbenzin
AVGAS 100LL	verbleites AVGAS mit 100/130 flugspezifischer Oktanzahl
AVGAS 91/96 UL	unverbleites AVGAS mit 91/96 flugspezifischer Oktanzahl
BAZL	Bundesamt für Zivilluftfahrt
BHP	Abbremsleistung (Brake Horsepower)
°C	Temperatur in Grad Celsius
CAEP	Umweltgremium der ICAO (Committee on Aviation Environmental Protection)
CHT	Zylinderkopftemperatur (Cylinder Head Temperature)
CL	Leistungsstufe für Steigflug (Climb)
CLD	Chemolumineszenz
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CPC	Kondensations-Teilchen-Zähler
CR	Leistungsstufe für Reiseflug (Cruise)
CR L	Leistungsstufe für Reiseflug mit Lambda = 0.95
CR LL	Leistungsstufe für Reiseflug mit Lambda = 1.3
CR R	Leistungsstufe für Reiseflug mit Gemisch vollreich ("full rich")
Dichtehöhe DA	Höhe in der Standardatmosphäre (ISA), bei welcher die vorherrschende Luftdichte auftritt. Die Dichtehöhe ist eine der wichtigsten Einflussgrössen auf die Flugzeug- und Triebwerkleistungen.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Gegenanflug (Downwind)
EEPS	Gerät für die Partikelgrössenbestimmung (Engine Exhaust Particle Sizer )
EF	Emissionsfaktor (manchmal auch als Emissionsindex EI abgegeben)
EGT	Abgastemperatur (Exhaust Gas Temperature)
ELT	Notsender (Emergency Localizer Transmitter)
EOM	Motorenhandbuch (Engine Operating Manual)
°F	Temperatur in Grad Fahrenheit
FADEC	Full Authority Digital Engine Control
FF	Treibstoffdurchfluss (Fuel Flow), oft einfach Treibstoffverbrauch genannt
FID	Flammen-Ionisations-Detektor
Final	Endanflug (Final approach)
FOCA	Engl. Bundesamt für Zivilluftfahrt (Federal Office of Civil Aviation)
ft	Flughöhe in Fuss
FT	Vollgas bzw. ganz geöffnete Drosselklappe (Full Throttle)
GPS	Global Positioning System
H <sub>2</sub>	Wasserstoff (Hydrogen)
H <sub>2</sub> O	Wasser(dampf). Wasserdampf ist gasförmig und deshalb unsichtbar
HBEYS	BAZL Flugzeug Robin DR400-180 mit Lycoming Serie O-360 Motor
HBHFX	Flugzeug AS202 Bravo mit Lycoming O-320 Motor
HBKEY	BAZL Flugzeug t Robin DR400/500 mit Lycoming Serie IO-360 Motor
HBKEZ	BAZL Flugzeug Robin DR400/500 mit Lycoming Serie IO-360 Motor
HBKIA	BAZL Flugzeug Bonanza A35 mit Teledyne Continental Serie IO-550 Motor
HBWAD	Flugzeug Ikarus C42 mit Rotax 912S Motor
HC	(Totale) Kohlenwasserstoff Emissionen
HC6NDIR	NDIR HC Messung mit Angabe in Hexane ppm
He	Helium
HP	(Propeller) Leistung
hPa	Hektopascal (Druckeinheit)
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation (Int. Civil Aviation Organization)
InHg	Druckeinheit in Zoll Quecksilbersäule, z.B. 23 InHg = 779 hPa
ISA	Internationale Standard Atmosphäre
λ	Zahl, welche ausdrückt, wie reich oder mager ein Luft/Treibstoff Gemisch ist
Lambda	Zahl, welche ausdrückt, wie reich oder mager ein Luft/Treibstoff Gemisch ist
Lean	Luft/Treibstoffgemisch, welches arm an Treibstoff ist ( = mager, Sauerstoffüberschuss) im Vergleich zum stöchiometrischen Gemisch

LTO	Lande- und Startzyklus (Landing and take-off cycle)
M	Drehmoment
MAP	Luftdruck im Ansaugrohr (Manifold Air Pressure)
Mixer	Hebel im Cockpit, um das Luft/Treibstoff Gemisch einzustellen
Mixture	Luft/Treibstoff Gemisch
Mode	Flugphase und –lage mit einer bestimmten Leistungseinstellung.
MOGAS	Automobiltreibstoff (Autobenzin)
MPH	Meilen pro Stunde
N <sub>2</sub>	Stickstoff (Nitrogen)
Nanoparticles	Ultrafeine Verbrennungspartikel mit Durchmessern zwischen 10 and 500 Nanometern. Ein Nanometer = ein Milliardstel Meter
NDIR	Nicht-dispersiver Infrarot Sensor
NO <sub>x</sub>	Stickoxide (Nitrogen Oxydes)
"Old tech"	Das den Flugzeug Kolbenmotormarkt dominierende Motorenkonzept
P	Leistung
PM	Partikelmasse
Pressure Altitude PA	Druckhöhe. Höhe in der Standardatmosphäre (ISA), bei welcher der vorherrschende Druck auftritt. Die Höhe bei Einstellung des Druckhöhenmessers auf 1013.2 hPa
QNH	Umgebungsluftdruck, mit ISA Temperatur auf Meereshöhe korrigiert
Rich	Luft/Treibstoffgemisch, welches reich an Treibstoff ist (Sauerstoffmangel) im Vergleich zum stöchiometrischen Gemisch
RPM	Umdrehungen pro Minute (Revolutions per Minute), Drehzahl
RWY	Piste (Runway)
SMPS	Gerät zur Bestimmung von Partikelgrößen (Scanning Mobility Particle Sizer)
STC	Ergänzendes Typenzertifikat (Supplemental Type Certificate)
stoichiometric	stöchiometrisch. Verbrennungsbedingungen bei welchem das Luft/Treibstoffgemisch so eingestellt ist, dass weder ein Überschuss an Treibstoff noch ein Überschuss an Luft auftritt.
TA	Rollen (Taxi mode). Rollen vom Standplatz bis zur Piste und Rollen zum Standplatz nach der Landung
THC	Totale Kohlenwasserstoff Emissionen (oft einfach als HC angegeben)
TO	Leistungsstufe für Start (Take-off)
UV	Ultraviolette Strahlung
VFR	Sichtflug Regeln (Visual Flight Rules)
Vne	Niemals zu überschreitende Geschwindigkeit (Never-exceed speed)

## 5. Quellen

- 1) Bombardier-Rotax, engine test stand data, property of Rotax, 2005
- 2) Chevron Products Company, Technical Review "aviation fuels", 2000
- 3) DLR, German Aerospace Centre, Institute of Combustion Technology, C. Wahl/M. Kapernaum, written and oral communication, 2004 – 2007
- 4) Hjelmcø Oil, Aviation Gasolines, AVGAS 91/96UL description, Edition V, 1997
- 5) Hjelmcø Oil, Aviation Gasolines, turbo fuels & lubricants, Fuel Certificate, 2005
- 6) HORIBA, Mexa 1170 HFID manual, 2006
- 7) ICAO Annex 16, volume 2, aircraft emissions, second edition, July 1993, amendment 5
- 8) Intertek Caleb Brett, C-H relation measurements for test fuels, FOCA property, 2006
- 9) Kas Thomas, Light Plane Maintenance, 2000, ISBN 0-965196-0-6
- 10) Porsche, PFM3200, Abgaskonzentrationen, BAZL, 1988
- 11) Technotest, Stargas 898 manual, 2003
- 12) Textron-Lycoming, Power Curves O-360 and IO-360 series engines, provided hand written documents
- 13) TSI Incorporated, SMPS and EEPS functional drawings, 2007
- 14) US EPA, Control of air pollution from aircraft and aircraft engines, federal register, volume 38, number 136, July 17, 1973
- 15) US FAA, Advisory Circular AC34-1A
- 16) US FAA, Federal Aviation Engine Emissions Databank, November 26, 1991