

Die Qualitätskontrolle von Flugtreibstoffen an der EMPA

Autor(en): **Ruf, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **86 (1968)**

Heft 49: **Eduard Amstutz zum 65. Geburtstag, 2. Sonderheft**

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70195>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eduard Amstutz zum 65. Geburtstag, zweites Heft

Die Qualitätskontrolle von Flugtreibstoffen an der EMPA

DK 62-631.9:620.162

Von Dr. H. Ruf, Vorstand der Abt. flüssige Treib- und Brennstoffe der EMPA, Dübendorf-Zürich

In kaum einem Betrieb hat das Aussetzen der Motoren so schwerwiegende Folgen, wie im Flugbetrieb. Kein Wunder, dass an die Qualität der verwendeten Treibstoffe besonders hohe Anforderungen zu stellen sind. Diese werden auf dem Wege vom Hersteller zum Verbraucher häufiger, zum Beispiel immer wieder nach Transporten und nach der Auffüllung der Lagertanks der Flugplätze, untersucht; dabei sind die Spezifikationen umfassender und auch vielfach strenger als zum Beispiel für Automobiltreibstoffe. Bevor das Ergebnis der Kontrolle durch ein qualifiziertes Laboratorium vorliegt, bleiben die Bestände in der Regel für den Verbrauch gesperrt. Qualitätskontrollen an Flugtreibstoffen sind deshalb nicht nur umfänglich; sie müssen meist auch in kürzester Frist erledigt werden. An solchen Arbeiten hat auch die EMPA einen bemerkenswerten Anteil und zwar nicht nur für die landeigenen Flugplätze, sondern auch für einen grösseren Kundenkreis im östlichen Europa bis nach Istanbul, Athen, Wien, Warschau, Belgrad, Neapel usw. Die Proben treffen per Luftfracht ein; die Untersuchungen werden je nach Bedarf und Umfang innert einem bis wenigen Tagen durchgeführt und das Ergebnis wird per Telex dem Auftraggeber gemeldet. Zur Kontrolle, dass die erhaltenen Resultate immer in Ordnung sind – auch Prüfmotoren haben ab und zu einmal ihre Tücken! – nimmt die EMPA an einem grossen internationalen Ring teil, in welchem jeden Monat eine Probe Automobil- und Flugtreibstoff vor allem auf seine Klopf Eigenschaften untersucht und das Ergebnis mit jenen der andern Laboratorien verglichen wird.

Unter den Treibstoffen für den Zivilluftverkehr kommt heute dem *Flugpetrol* (JP-1) weitaus die grösste Bedeutung zu (siehe Tabelle 1). Die Flotte der International Civil Aviation Organization zählte 1967 2206 Strahltriebwerke und 1335 Turboprops, die zusammen 95 % der Jahresleistung an Tonnenkilometern aufbrachten. Diese Maschinen verwenden neben etwas *Wide-Cut-Gasoline* (JP-4, einem Petrol-Schwerbenzin-Gemisch) hauptsächlich *Flugbenzin*. Mit den 2688 Kolbenmotoren, die verschiedene Sorten *Flugbenzin* verwenden, wurden nur noch 5 % der Jahresleistung erbracht. Entsprechend betrug auch der Flugtreibstoffverbrauch unseres Landes im Jahre 1967 342 822 t *Flugpetrol* gegenüber nur 13 866 t *Flugbenzin* (JP-4 wird in der Schweiz auf dem Zivillsektor nicht verwendet).

Die für einen Flugtreibstoff *massgebenden Eigenschaften* sind:

- Sauberkeit
- Kälteverhalten
- Dampfdruck (B und WC)
- Viskosität (K)
- Siedebereich
- Flammpunkt (K)
- Abdampfdruckstand
- Mischbarkeit mit Wasser
- Wasserabscheidevermögen (WC und K)
- Schwefelgehalt
- Gehalt an Merkaptanschwefel (WC und K)
- Korrozierender Schwefel
- Neutralisationszahl
- Bleigehalt (B)
- Gehalt an Olefinen und Aromaten (WC und K)
- Lagerbeständigkeit
- Wärmestabilität (WC und K)
- Klopfestigkeit (B)
- Brennverhalten (Russpunkt, Luminometerzahl) (WC und K)
- Heizwert

Wo nicht anders vermerkt, sind die angeführten Eigenschaften für alle Flugtreibstoffe massgebend. B = Benzin; WC = Wide Cut; K = Petrol (Kerosen).

Sauberkeit: Diese wird bei Flugtreibstoffen gross geschrieben. Bei den vor allen bei den Jets enormen Durchsätzen können bereits Spuren von Wasser oder festem Schmutz zu empfindlichen

Störungen führen. Flugtreibstoffe müssen deshalb heutzutage «klinisch sauber» sein. Entsprechende Kontrollen führt man an Ort und Stelle während dem Betanken der Maschinen durch. Man hat einfache Methoden zum Nachweis von Wasserspuren, wie den SHELL-Wasserdetektor, den ESSO-Hydrokit und das BP-Aquascan-Gerät entwickelt. Auf Anwesenheit fester Verunreinigungen prüft man periodisch, indem man eine gemessene Treibstoffmenge durch ein vorher gewogenes Millipore-Filter leitet und dieses nachher zurückwiegt. Für die Behandlung und Wägung der Filter wird oft die EMPA beigezogen.

Kälteverhalten: Angesichts der in grosser Höhe herrschenden niedrigen Temperaturen muss von den Flugtreibstoffen eine grosse Kältebeständigkeit verlangt werden. *Benzine* dürfen nach den Spezifikationen bis -60°C , *Wide Cut* bis -58°C und *Petrol* bis -50°C keine Kohlenwasserstoffkristalle abscheiden. Man kontrolliert dies in einem einfachen Laborversuch, bei welchem man eine Probe erst bis unter die Trübungs- (Kristallausscheidungs-) Temperatur abkühlt und dann unter Rühren wieder langsam bis zum Verschwinden der Kristalle erwärmt.

Dampfdruck: Der Dampfdruck ist ein Mass für den Gehalt eines Treibstoffes an besonders leichtsiedenden Anteilen. Bei vermindertem Luftdruck besteht eine erhöhte Tendenz zur Verdampfung, d. h. zum Schäumen. Dabei können Verluste von Treibstoff durch die Tankentlüftungen und Dampfblasenbildung auftreten, die die Treibstoffzufuhr zum Motor abschnüren. Deshalb muss der Dampfdruck bei Flugtreibstoffen genügend tief gehalten werden. Man bestimmt ihn in der Erdölindustrie üblicherweise nach *Reid* bei einem Treibstoff/Luft-Verhältnis von 1:4 und einer Temperatur von 38°C (100°F). Er soll bei *Flugbenzinen* 0,38 bis 0,50 kp/cm^2 und beim *Wide-Cut-Gasoline* 0,14 bis 0,21 kp/cm^2 betragen; beim *Flugpetrol* ist der Dampfdruck kein Problem.

Viskosität: Diese ist umgekehrt nur bei den etwas zähflüssigeren *Petrolen* von Bedeutung. Zur Vermeidung von Pump- und Zerstäubungs-Schwierigkeiten soll sie bei -18°C nicht mehr als 6 cSt betragen.

Siedebereich: Die vor allem auch in der Siedekurve zum Ausdruck kommende Flüchtigkeit ist für die Eignung eines Flugtreibstoffes für bestimmte Motoren von entscheidender Bedeutung. Bild 1 zeigt die Apparatur zur Durchführung der Siedeanalyse. Bei den *Flugbenzinen* ergibt sich, wie bereits erwähnt, die Notwendigkeit zum Ausschluss allzu leichtflüchtiger Komponenten. Zur Eindämmung von Vergaservereisungs-Störungen darf die Summe des 10+50 %-Punktes nicht unter 135°C^1 liegen. Damit aber doch ein normales Anspringen gewährleistet ist, sollen

¹⁾ Gemeint ist damit die Summe der Temperaturen, bei denen bei einer Siedeanalyse 10 % bzw. 50 % verdampft sind.

Tabelle 1. Zivilverbrauch der «Freien Welt» an Flugtreibstoffen im Jahre 1967 in Mio Fass

| | Flugpetrol | Flugbenzin | JP-4 |
|-------------------|------------|------------|------|
| Nordamerika | 145 | 17 | 6 |
| Übrige Freie Welt | 95½ | 13 | 10½ |
| Total | 240½ | 30 | 16½ |
| | 84½ % | 10½ % | 5½ % |

Der gesamten Menge von 287 Mio Fass entsprechen 45,5 Mio m³.

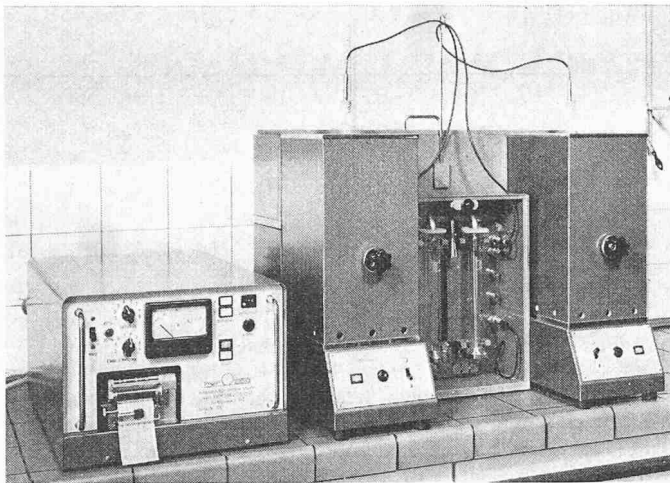


Bild 1. Automatische Apparatur zur Erstellung einer Siedeanalyse

10 bis 40 % bis 75 °C sieden. Ein 50 %-Punkt von nicht über 105 °C und ein 90 %-Punkt von max. 135 °C befördern die Bildung eines gleichmässigen Treibstoff/Luft-Gemisches. Zur weiteren Ausschaltung zu hoch siedender Fraktionen ist schliesslich ein Siedeende von max. 170 °C vorgeschrieben.

Auch bei den *Flugturbinentreibstoffen* wünscht man ein Minimum an relativ leichter siedenden Anteilen einerseits, und ein nicht zu hohes Siedeende andererseits, d. h. beim Flugpetrol zum Beispiel mindestens 20 % bis 200 °C siedende Anteile und ein Siedeende von höchstens 300 °C.

Flammpunkt: Aus Sicherheitsgründen hat sich im zivilen Luftverkehr als Treibstoff für Düsenflugzeuge, wie gesagt, das *Flugpetrol* mit einem Flammpunkt von über 38 °C durchgesetzt. Für militärische Zwecke wird zwar im Ausland vor allem Wide Cut (JP-4) verwendet, ein Produkt, das wie alle Benzine sehr niedrig entzündet; für besondere Zwecke kennt man aber auch bei den Flugwaffen ein Sicherheitspetrol mit einem Flammpunkt von sogar über 60 °C.

Abdampfdruckstand: Geringe Mengen sehr schwerflüchtiger, vor allem «gum»- oder «harz»-artiger Anteile erfasst man im Abdampfversuch. Sie könnten sich im Betrieb auf kritischen Teilen des Treibstoffsystems absetzen und Störungen verursachen. In der Regel wird es sich dabei um «Alterungsprodukte» handeln. Den «aktuellen» (heute im Produkt vorhandenen) Harzgehalt bestimmt man durch rasches Abdampfen der Probe aus einem gewogenen, in die Aussparungen eines geheizten Metallblockbades eingesetzten Glasgefäss, unter Aufblasen eines warmen Luft- oder Dampfstroms. Bild 2 zeigt die Apparatur. *Flugbenzine* dürfen höchstens 3, *Wide Cut* und *Flugpetrol* höchstens 7 mg Abdampfdruckstand/100 ml (Milliliter) enthalten.

Es genügt aber nicht, dass der Treibstoff bei der Einlagerung harzfrei ist; er soll sich unter normalen Bedingungen auch län-

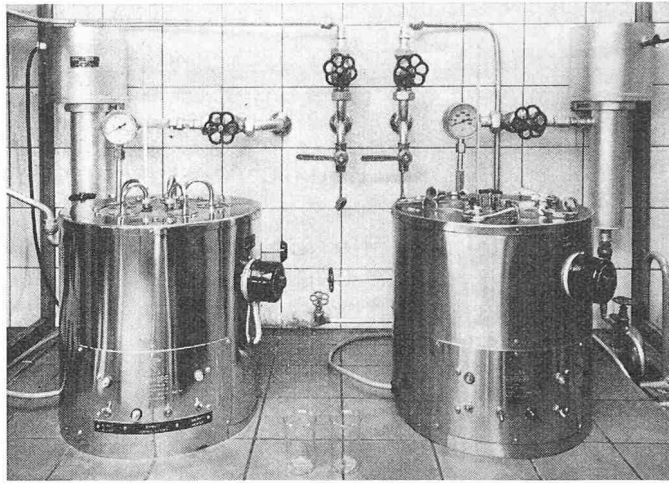


Bild 2. Metallblockbäder zur Bestimmung des Abdampfdruckstandes

gere Zeit lagern lassen, ohne zu altern. Die *Lagerbeständigkeit* ermittelt man, indem man eine Probe unter einem Sauerstoffdruck von 7 atü 16 h auf 100 °C erhitzt. Anschliessend wird die Menge des entstandenen Abdampfdruckstandes bestimmt. Bei *Flugbenzinen* darf sich weder mehr als 2 mg/100 ml Niederschlag noch mehr als 6 mg Rückstand/100 ml gebildet haben. Für die *Flugturbinentreibstoffe* ist die Summe der beiden auf max. 14 mg/100 ml festgelegt.

Wassermischbarkeit: Ein einfacher Schüttelversuch stellt fest, ob ein Treibstoff *wasserlösliche Anteile* enthält oder umgekehrt ein anormales Wasserlösevermögen aufweist.

Wasserabscheidevermögen: Mechanisch im Treibstoff emulgiertes Wasser bildet eine grosse Gefahr, da es bei Temperaturen unter 0 °C ausfrieren und kritische Teile des Systems verstopfen kann. Leider lässt es sich in der Praxis nicht vermeiden, dass der Treibstoff mit Wasser in Berührung kommt. Es soll sich aber beim ruhigen Stehenlassen wieder rasch absetzen und kann dann unten aus den Behältern abgezogen werden. Die letzten Spuren werden normalerweise durch Filtrierung entfernt.

Enthält der Treibstoff aber oberflächenaktive Stoffe, so können sehr hartnäckige Emulsionen entstehen, die sich beim Stehenlassen nur langsam trennen und auch durch Filter hindurchtreten.

Gewisse Anhaltspunkte über das Wasserabtrennvermögen ergeben sich schon aus dem erwähnten Schüttelversuch. Genauere, objektive Messungen ermöglicht das *Wasser-Separometer*, Bild 3. Die Probe wird mechanisch mit Wasser agitiert. Nach einiger Zeit misst man optisch die Trübung.

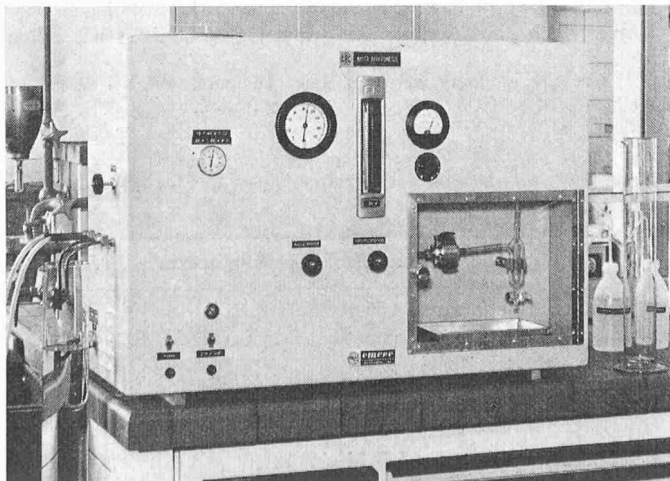
Totalschwefel: Die Verbrennungsprodukte des Schwefels können Metallteile angreifen. Bei *Flugbenzinen* liegt der Schwefelgehalt allerdings sehr niedrig; er ist auf höchstens 0,05 Gew. % begrenzt. Bei *Flugpetrolen* darf er maximal 0,20 %, beim *Wide-Cut-Gasoline* 0,40 % betragen. Störend ist dann aber vor allem der *Merkaptanschwefel*. Solche Schwefelverbindungen haben einen sehr schlechten Geruch, wirken auch schon vor der Verbrennung korrodierend und greifen gewisse Kunststoffe, die im Tankbau und als Packungen verwendet werden, an. Man lässt in Flugtreibstoffen deshalb höchstens Spuren (max. 0,001 %) zu.

Korrodierende Schwefelverbindungen: Die korrodierende Wirkung von Schwefelverbindungen prüft man, indem man blank polierte Kupfer- oder Silberplättchen einige Zeit der Einwirkung des Treibstoffs aussetzt.

Neutralisationszahl: Diese Prüfung soll die Anwesenheit von Spuren vor allem starker (anorganischer) Säuren feststellen, die versehentlich nach der Säurebehandlung in den Treibstoffen zurückbleiben können.

Bleigehalt: Wie die meisten Automobiltreibstoffe enthalten auch die Hochleistungs-Flugbenzine als Klopfbremse eine organische Bleiverbindung, hier noch ausschliesslich *Bleitetraäthyl*. Die Dosis darf aber sowohl aus hygienischen wie auch motorischen Gründen (Rückstandsbildung, Kerzenstörungen) 1,22 ml Btä/l (Milliliter Bleitetraäthyl pro Liter) nicht überschreiten. Zur Bestimmung des Bleigehaltes wird die Probe mit Salzsäure gekocht,

Bild 3. Wasserseparometer zur Bestimmung des Wasserabtrennvermögens



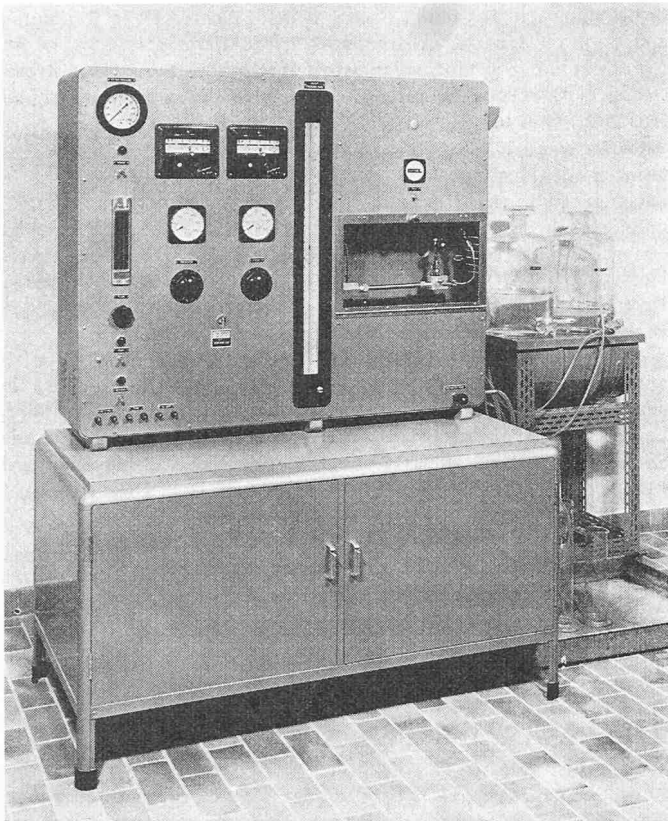


Bild 4. «Fuel Coker» zur Bewertung der Wärmestabilität

wobei das Blei als Chlorid in Lösung geht. Nach der Zerstörung restlicher organischer Anteile wird es in Wasser aufgenommen und dann als Chromat gefällt und gewogen.

Gehalt an Olefinen und Aromaten: Die Art der in einem Treibstoff vorhandenen Kohlenwasserstoffe kann ebenfalls qualitätsbestimmend sein. Einerseits ändern sich die Eigenschaften der in den Treibstoffsystemen von Flugzeugen verwendeten Kunststoffe in Berührung mit Aromaten. Damit ein genügendes Quellvermögen gewährleistet ist, muss der Aromatengehalt des 115/145-Flugbenzins mindestens 5 % betragen. Andererseits ist aber ein zu hoher Aromatengehalt bei *Flugturbinentreibstoffen* unerwünscht, weil die Flamme sonst zu stark leuchtet. Es bildet sich gern Rauch und Russ, und die Brennkammern haben eine verkürzte Lebensdauer. Ein Flugpetrol darf deshalb höchstens 20 %, Wide Cut höchstens 25 % Aromaten enthalten.

Der *Olefingehalt* interessiert vor allem zur Feststellung, ob es sich um ein reines Destillat oder um eine auch gekrackte Fraktionen enthaltende Ware handelt, was sich unter anderem nachteilig auf die Stabilität auswirken kann. Der Olefingehalt ist bei *Wide Cut* und *Petrol* auf höchstens 5 % begrenzt. Zur Bestimmung des Aromaten- und Olefingehaltes drückt man eine kleine Probe durch eine mit Silicagel gefüllte Kolonne, wobei sich die Kohlenwasserstoffe nach Familienzugehörigkeit trennen.

Wärmestabilität: Bei den modernen, schnell fliegenden Maschinen, bei denen sich die Luft beim Vorbeistreichen an der Flughaut stark erhitzt, muss zur Kühlung von Schmieröl und Kabinenluft der Treibstoff herangezogen werden. Er wird dann aber ganz erheblich erwärmt. Ist er nicht genügend wärmestabil, so können Zersetzungsprodukte entstehen, die sich auf den Rohren des Wärmeaustauschers festsetzen und den Wärmeübergang behindern. Sie können auch die Filter und andere empfindliche Teile des Treibstoffsystems verstopfen.

Zu den wichtigsten Untersuchungen eines *Flugturbinentreibstoffs* gehört deshalb die Prüfung auf Wärmestabilität im «*Fuel Coker*», Bild 4. Der Treibstoff wird während fünf Stunden über ein auf die gewünschte Temperatur gebrachtes Aluminiumrohr gepumpt, das man nachher auf Belagsbildung bewertet. Während des Versuches wird zudem der Druckabfall durch ein ebenfalls aufgeheiztes Filter gemessen.

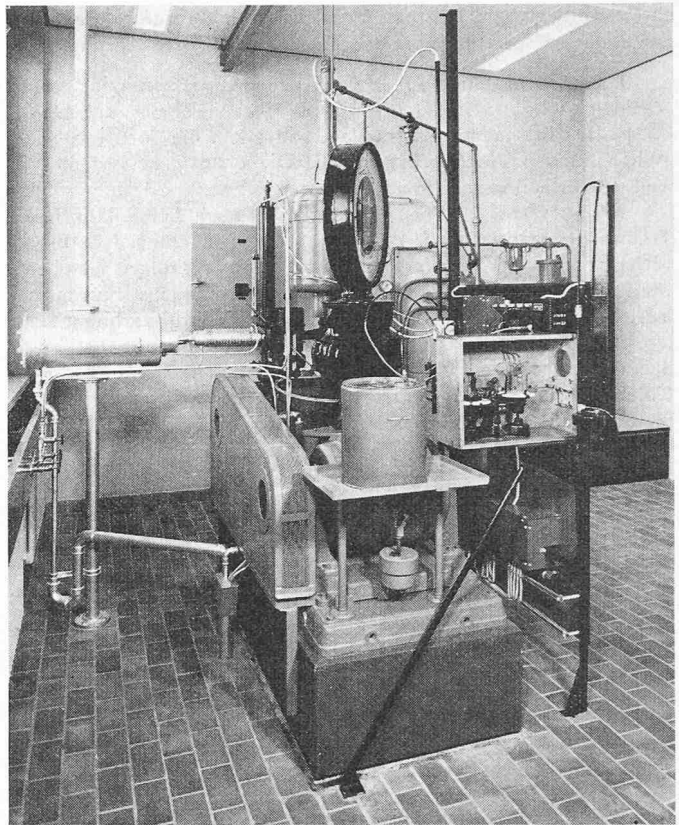
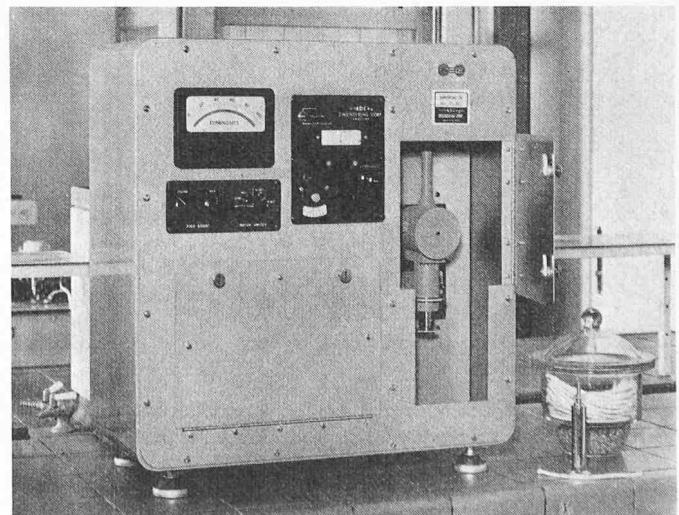


Bild 5. Einrichtung zur Bestimmung der Klopfestigkeit im fetten Bereich nach der Überlademethode

Klopfestigkeit: Die Flugzeug-Kolbenmotoren sind hochgezüchtete Ottomotoren hohen Verdichtungsgrades, die zu störungsfreiem Betrieb einen besonders klopfesten Treibstoff verlangen. Es muss dabei sowohl auf die Klopfestigkeit im mageren Bereich (Reiseflug), wie auch jene im fetten Bereich (Start) geachtet werden. Für beide Bewertungen hat man Prüfverfahren entwickelt. Jene im Bereich magerer Gemische geschieht an der EMPA als sog. «*erweiterte Motor-Methode*»; es gibt aber auch noch einen als «*Aviation-Methode*» bekannten Test, der auf der Messung der Verbrennungsraum-Temperatur beruht. Zur Bewertung der Klopfestigkeit im fetten Bereich dient die «*Überlade-*» (F-4) *Methode*, Bild 5. Bei dieser wird bei konstantem Verdichtungsverhältnis der Überladedruck stufenweise gesteigert und jeweils die klopfbegrenzte Leistung als Funktion des Treibstoff/Luftverhältnisses bestimmt. Die Klopfestigkeit wird unter 100 als *Oktanzahl*, darüber als *Leistungszahl* angegeben. Darunter versteht man u. a. bei der Überlademethode die höchste, mit dem Treibstoff erziel-

Bild 6. Luminometer



bare klopfbegrenzte Leistung, ausgedrückt in Prozenten jener von Isooktan.

Die verschiedenen im Handel üblichen Flugbenzine unterscheiden sich in der Klopfestigkeit. Neben einem ungebleiten OZ-80-Benzin sind in unserm Land vor allem die Sorten 100/130, 108/135 und 115/145 gebräuchlich. Die erste Zahl bedeutet jeweils die Leistungszahl mager, die zweite fett.

Brennverhalten: Wenn Flugturbinen auch keine klopfesten Treibstoffe benötigen wie die Ottomotoren, so muss dem Brennverhalten des Treibstoffs doch auch Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Probleme liegen hier bei einer möglichst raucharmen Verbrennung und einer nicht zu grossen Wärmestrahlung, letzteres zum Schutze der Brennkammern vor Überhitzung. Es kommt dabei, wie bereits erwähnt, vor allem auf die *chemische Natur* der Kohlenwasserstoffe des Treibstoffs an, über die andere Prüfmethoden Aussagen machen.

Wichtig ist dann aber auch die Bestimmung des *Russpunktes*, d. h. der in einem genormten Lämpchen bei russfreier Verbrennung zu erzielenden maximalen Flammenhöhe. Diese soll beim Flugpetrol mindestens 20 mm betragen. Beim Wide-Cute-Gasoline

bringt man den Russpunkt noch mit der Flüchtigkeit in Beziehung und ermittelt den sog. *Russpunkt-Flüchtigkeits-Index*.

Über die von einem Treibstoff im Vergleich zu Bezugstreibstoffen abgegebene Strahlungswärme gibt die *Luminometerzahl* Auskunft, Bild 6.

Heizwert: Die mit dem Treibstoff «getankten Kalorien» begrenzen die Nutzlast, bzw. den Aktionsradius des Flugzeugs. Je nachdem sollte der Heizwert, ausgedrückt in kcal/kg oder kcal/l, möglichst hoch sein. Obwohl die Kohlenwasserstoffe verschiedener Familien etwas unterschiedliche Heizwerte aufweisen, verbietet sich in der Praxis die Auswahl des Treibstoffs nach Heizwert, weil man damit das Angebot zu sehr einschränken und den Preis in die Höhe treiben würde.

Dennoch ist die Kenntnis des Heizwertes für den Flugbetrieb wichtig. Er wird allerdings selten wirklich bestimmt, sondern in der Regel aus der *Anilin-Gravity-Konstanten* abgeleitet. Für Flugbenzin OZ 80 und 100/130 muss sie mindestens 7500, für die Sorte 115/145 mindestens 10 000, und für Wide-Cut-Gasoline und Flugpetrol schliesslich mindestens 5250 betragen. Dies entspricht einem untern Heizwert von 10 400, bzw. 10 500, bzw. 10 220 kcal/kg.

Zur Frage der Wasserdampfdiffusion durch angestrichene Wände

DK 667.613 : 546.212 : 533.15

Von Dr. M. Hochweber, Vorstand der Abt. Farben und Lacke der EMPA, Dübendorf-Zürich

1. Allgemeines

Die meisten Schäden an gestrichenen Aussenfassaden und Innenwänden hängen mit Diffusionserscheinungen und Kondensationsvorgängen von Wasserdampf in den Wandkonstruktionen zusammen. Während die rechnerische Behandlung des Wärmedurchgangs durch Wandkonstruktionen längst Allgemeingut geworden ist und die dazu benötigten Zahlenwerte in weitem Umfange bekannt sind, trifft dies für den Durchgang von Wasserdampf nur in geringerem Masse zu, obwohl die Grundlagen dafür schon lange vorhanden sind. Im Literaturverzeichnis sind einige Arbeiten über Diffusionsvorgänge in Wänden aus den letzten Jahren angeführt, die zum Teil umfangreiche Literaturhinweise auf frühere Arbeiten enthalten [2], [3], [6].

Vor etwa zwölf Jahren wurde die sogenannte Gemeinschaftsgleichung zur Berechnung des Wasserdampfdurchgangs durch Wandkonstruktionen von verschiedenen deutschen Forschern aufgestellt. Sie lehnt sich an die für den Wärmedurchgang gültige Grundgleichung an, ein Gedankengang, der schon früher geäussert wurde [4], [5]¹⁾.

$$(1) \quad g = \frac{\Delta P}{\frac{1}{\beta'_1} + \frac{s_1}{\delta'_1} + \frac{s_2}{\delta'_2} + \dots + \frac{1}{\beta'_2}}$$

g = stündlich durch 1 m² Wand diffundierende Wassermenge in kg/m² h

ΔP = Differenz der Wasserdampf-Partialdrücke in der Luft an beiden Wandseiten in kp/m²

β'_1, β'_2 = Wasserdampfübergangszahl Luft-Wand bzw. Wand-Luft in 1/h

s_1, s_2 = Dicken der aufeinander folgenden Wandschichten in m

δ'_1, δ'_2 = Dampfleitzahlen der aufeinander folgenden Wandschichten in m/h

β^* und δ^* sind abgeleitete Grössen:

$$(2) \quad \beta^* = \frac{\beta}{R_D T} \quad \delta^* = \frac{D}{\mu R_D T}$$

R_D = Gaskonstante für Wasserdampf (47,1 mkp/kg °K)

T = abs. Temp. in °K

β = Stoffübergangszahl in m/h

D = Wasserdampf-Diffusionszahl in Luft in m²/h

μ = Diffusionswiderstandsfaktor der Stoffe der einzelnen Schichten

Für die praktischen Berechnungen können die Übergangszahlen β^* vernachlässigt werden, wodurch sich die Grundgleichung (1) ver-

einfacht. Die Werte für $D/R_D T$ sind tabelliert, sodass die Berechnungen stark vereinfacht werden.

Die Dampfleitzahl δ wird in der Regel gravimetrisch durch Wägung des Wasserdampfdurchgangs durch eine geeignete Probe bestimmt, wenn beidseits der Probe verschiedene, bekannte Partialdrücke herrschen. Man beschränkt sich meist auf versuchstechnisch einfache isotherme Bedingungen und benützt zur Einstellung der verschiedenen Luftfeuchtigkeiten Trocknungsmittel und geeignete Salzlösungen²⁾.

Die Dampfleitzahl δ ist dann

$$(3) \quad \delta = \frac{G s}{\Delta P}$$

G = Gewicht des durch die Probe hindurchdiffundierenden Wasserdampfes in kg/m²h.

s = Dicke der Probe.

der gesuchte Diffusionswiderstandsfaktor μ wird

$$\mu = \frac{\Delta P}{G s} \frac{D}{R_D T}$$

Der Diffusionswiderstandsfaktor gibt an, wieviel mal grösser der Diffusionswiderstand eines Stoffes im Vergleich zu einer ruhenden Luftschrift gleicher Abmessung und unter gleichen Bedingungen ist.

Aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich die Beziehung

$$(4) \quad \mu s = \mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \dots + \mu_n s_n$$

μ = Diffusionswiderstandsfaktor einer Schichtenkombination

s = Gesamtdicke der Schichtenkombination

μ_1, μ_2 = Diffusionswiderstandsfaktoren der einzelnen Schichtenstoffe

s_1, s_2 = Dicken der einzelnen Schichten

Mit Hilfe der Beziehung (4) lassen sich Diffusionswiderstandsfaktoren einzelner Schichten indirekt bestimmen, also etwa den eines Anstriches auf seiner Unterlage, indem zuerst das Trägermaterial allein und dann in angestrichenem Zustand geprüft und daraus der Wert für den aufgetragenen Anstrich allein berechnet wird.

Die Kenntnis des Verhaltens der Stoffe in Kombinationen ist insbesondere bei Anstrichstoffen wichtig, da in der Praxis auf den hier interessierenden Unterlagen nie gleichmässig dicke Schichten vorliegen, sondern sich durch Unterschiede im Aufsaugvermögen, in der Arbeitsweise usw. eine sehr breite Streuung der Schichtdicke ergibt. Bei stark saugenden Unterlagen haben Schichtdickenangaben überhaupt nur noch rechnerische Bedeutung.

²⁾ Vgl. hierzu den Aufsatz von R. Sagelsdorff: Die neue k-Wert-Kammer an der EMPA, in diesem Heft.