



Kraftstoffe für Flugmotoren – ein Faktencheck für sicheres fliegen

OLIVER KLEEN, FLUGLEHRER, PRÜFER, WARTER AVIATION FUEL, KLEEN@WARTER-AVIATION.DE

DR. ANDREAS TITZE, PHYSIKER, ING. AUTOMOBILINDUSTRIE, PILOT SEIT 1991, ANDREAS.TITZE@WEB.DE

Worum geht es uns hier?

Unsere Flugzeugmotoren laufen mit verschiedenen Kraftstoff-Sorten,
aber:

Bei zertifizierten Flugzeugen bedarf es für den Einsatz von MoGas einer
entsprechenden Typgenehmigung oder eines STCs.

Für UL bedarf es der Freigabe des Motorherstellers und des Zellen-
Herstellers.

Sowohl PKW Kraftstoffe (Super oder Super Plus), als auch Flugkraftstoffe
(100LL, UL91) können dann möglicherweise genutzt werden.

Was sollen wir denn jetzt tun und was müssen wir
als Piloten beachten?

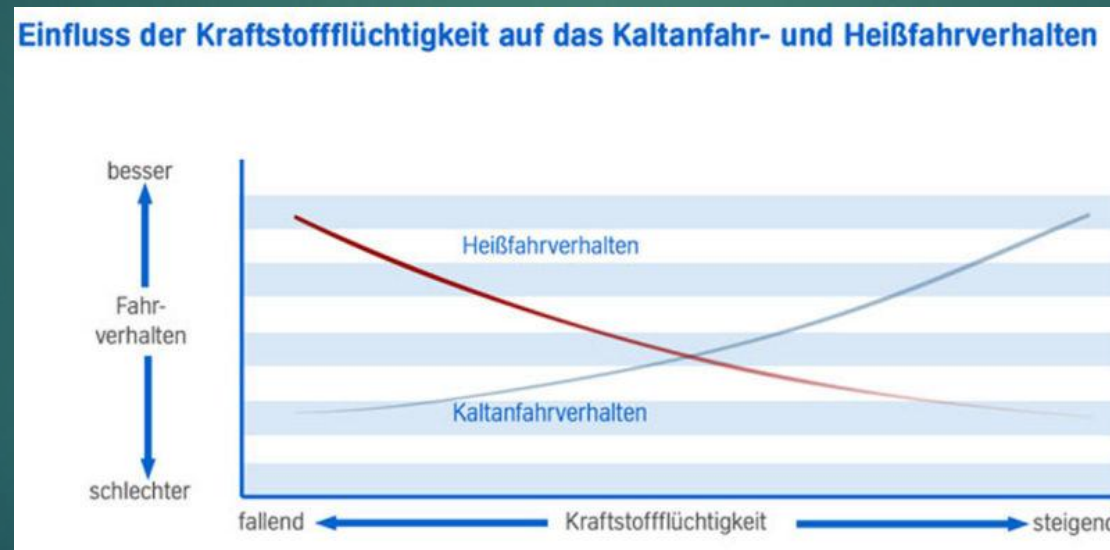
PKW und Flugkraftstoffe unterscheiden sich in diversen Dimensionen

- ▶ Physikalische Eigenschaften (Flüchtigkeit, Oktanzahl, ...)
- ▶ Saisonalität
- ▶ Lieferkette, Lagerfähigkeit
- ▶ Materialverträglichkeit
- ▶ Tendenz zur Wasseraufnahme

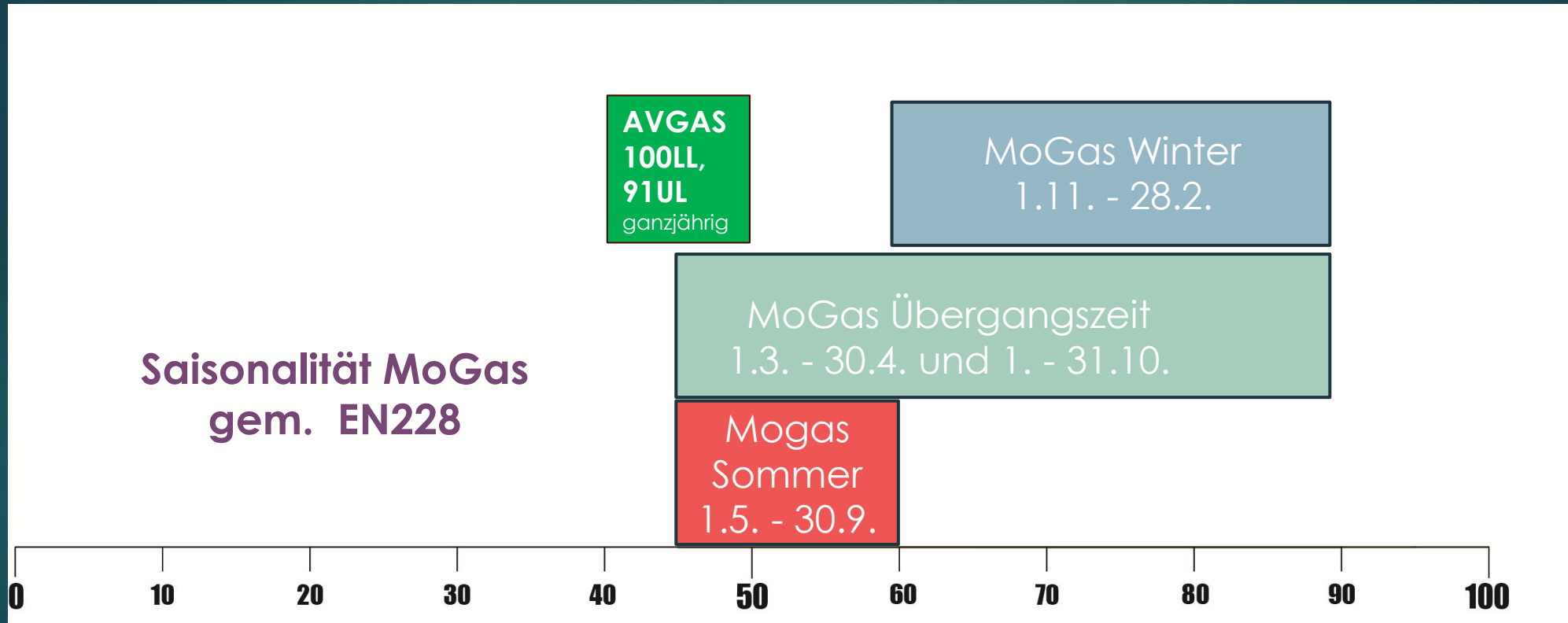
Ein sicherer Einsatz von PKW Kraftstoffen bedarf einer ganzen Reihe von Voraussetzungen

Kraftstoff-Flüchtigkeit erklärt

- ▶ Die Neigung des Benzins zur Verdampfung – seine Flüchtigkeit – ist die zentrale Voraussetzung zum Einsatz als Ottokraftstoff.
- ▶ Hohe Flüchtigkeit verbessert die Startfähigkeit.
- ▶ Niedrige Flüchtigkeit verbessert das Warmlaufverhalten.
- ▶ Ein Maß für die Flüchtigkeit ist der Dampfdruck nach Reid.



Saisonalität von Mogas und Flugkraftstoff im Vergleich




Dampfdruck kPA
Kraftstoffflüchtigkeit

kleiner größer

Saisonalität Mogas, Beispiel Shell V-Power Racing

Shell Deutschland GmbH

Produktname / Product name: Shell V-Power Racing
 Verwendung / Application: Kraftstoff für Ottomotoren / Fuel for spark ignition engines
 Produktcode / Product code: 002C0164




Übertreft die Anforderungen und Prüfverfahren nach DIN EN 228 / Surpass requirements on DIN EN 228

Eigenschaften / Properties	Einheit / Unit	Grenzwerte / Requirement Minimum	Grenzwerte / Requirement Maximum	Prüfverfahren / Test method
Research-Octanzahl, ROZ Research Octen number, ROZ		100+		EN ISO 5164
Motor-Octanzahl, MOZ Motor Octen number, MOZ		88,0		EN ISO 5163
Bleigehalt Lead content	mg/l		5	EN 237
Dichte bei 15 °C Density at 15 °C	kg/m³	720,0	775,0	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Schwefelgehalt Sulphur content	mg/kg		10,0	EN ISO 20884 EN ISO 20846 EN ISO 13032
Oxidationsstabilität Oxidation stability	min	360		EN ISO 7536
Abdampfdruckstand (gewaschen) Evaporating gum (washed)	mg/100ml		5	EN ISO 6246
Korrosionswirkung auf Kupfer (3h bei 50 °C) Copper corrosion	grade		1	EN ISO 2160
Aussehen Appearance		klar und trübungsfrei clear and bright		visuell
Gehalt an Kohlenwasserstoffgruppen Composition				EN ISO 22854 EN 15553
	Olefine / Olefines Aromaten / Aromatics	%(V/V)	18,0 35,0	
Benzolgehalt Benzene content	%(V/V)		1,00	EN 12177 EN 238 EN ISO 22854
Sauerstoffgehalt Oxygen content	w%		2,7	EN 1601 EN 13132, EN ISO 22854
Gehalt an sauerstoffhaltigen organischen Verbindungen Oxygenates				EN 1601 EN 13132 EN ISO 22854
	Methanol / Methanol	%(V/V)	3,0	
	Ethanol / Ethanol	%(V/V)	0,7	
	Iso-propyl-Alkohol / Iso-propyl-alcohol (IPA)	%(V/V)	10,0	
	Iso-butyl-Alkohol / Iso-butyl-alcohol (IBA)	%(V/V)	10,0	
	Tert-butyl-Alkohol / Tert-butyl-alcohol (TBA)	%(V/V)	7,0	
	Ether (5 oder mehr C-Atome)	%(V/V)	15,0	
	andere sauerstoffhaltige Verbindungen / others	%(V/V)	10,0	
Flüchtigkeitsklassen Volatility		1. Mai bis 30. September (Klasse A) 1. May till 30. Sep. (Class A)		
Dampfdruck / Vapour pressure	kPa	45,0	60,0	EN 13016-1
aufgefangen bei / recovered at 70 °C, E70	%(V/V)	20,0	48,0	EN ISO 3405
aufgefangen bei / recovered at 100 °C, E100	%(V/V)	46,0	71,0	EN ISO 3405
aufgefangen bei / recovered at 150 °C, E150	%(V/V)	75,0		EN ISO 3405
Siedepunkt / Final boiling point	°C		210	EN ISO 3405
Destillationsrückstand / Residue	%(V/V)		2	EN ISO 3405
VLI (10 VP + 7 E70)	Index	nicht spezifiziert / not specified		
		30. - 15. Nov. und 16. März - 30. April (Klasse D) Oct. - 15. Nov. and 16. March - 30. April (Class D)		
Dampfdruck / Vapour pressure	kPa	45,0	90,0	EN 13016-1
aufgefangen bei / recovered at 70 °C, E70	%(V/V)	20,0	50,0	EN ISO 3405
aufgefangen bei / recovered at 100 °C, E100	%(V/V)	46,0	71,0	EN ISO 3405
aufgefangen bei / recovered at 150 °C, E150	%(V/V)	75,0		EN ISO 3405
Siedepunkt / Final boiling point	°C		210	EN ISO 3405
Destillationsrückstand / Residue	%(V/V)		2	EN ISO 3405
VLI (10 VP + 7 E70)	Index	1150		
		16. Nov. bis 15. März (Klasse D) 16. Nov. bis 15. March (Class D)		
Dampfdruck / Vapour pressure	kPa	60,0	90,0	EN 13016-1
aufgefangen bei / recovered at 70 °C, E70	%(V/V)	22,0	50,0	EN ISO 3405
aufgefangen bei / recovered at 100 °C, E100	%(V/V)	46,0	71,0	EN ISO 3405
aufgefangen bei / recovered at 150 °C, E150	%(V/V)	75,0		EN ISO 3405
Siedepunkt / Final boiling point	°C		210	EN ISO 3405
Destillationsrückstand / Residue	%(V/V)		2	EN ISO 3405
VLI (10 VP + 7 E70)	Index	nicht spezifiziert / not specified		

Änderungen vorbehalten
TDB Shell V-Power Racing Germany 002C0164 2023-09-01.xlsx
Datum / Date 06.09.2023
Seite / Page 1 / 1

Shell Deutschland GmbH

Produktname / Product name: Shell V-Power Racing
 Verwendung / Application: Kraftstoff für Ottomotoren / Fuel for spark ignition engines
 Produktcode / Product code: 002C0164



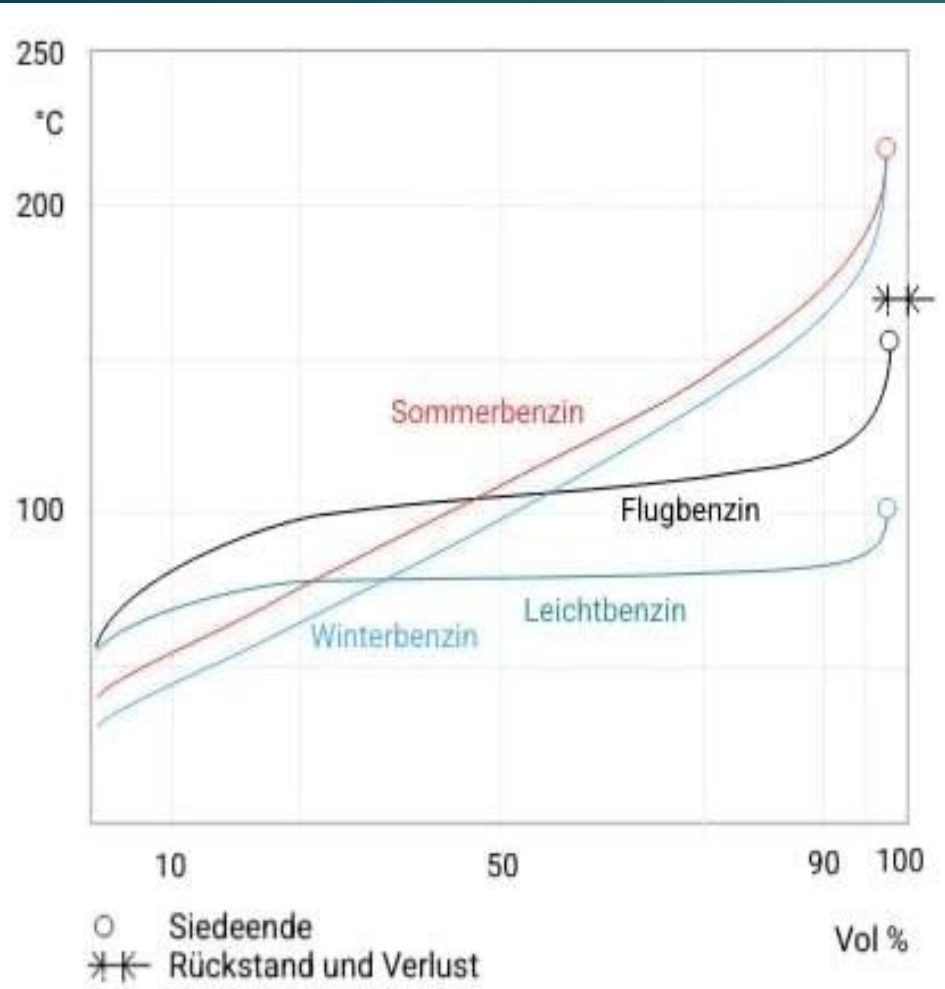
Übertreft die Anforderungen und Prüfverfahren nach DIN EN 228 / Surpass requirements on DIN EN 228

Eigenschaften / Properties	Einheit / Unit	Grenzwerte / Requirement Minimum	Grenzwerte / Requirement Maximum	Prüfverfahren / Test method
Research-Octanzahl, ROZ Research Octen number, ROZ		100+		EN ISO 5164
Motor-Octanzahl, MOZ Motor Octen number, MOZ		88,0		EN ISO 5163

Flüchtigkeitsklassen Volatility	Einheit	Grenzwerte / Requirement		Prüfverfahren / Test method	
		Minimum	Maximum		
Dampfdruck / Vapour pressure aufgefangen bei / recovered at 70 °C, E70 aufgefangen bei / recovered at 100 °C, E100 aufgefangen bei / recovered at 150 °C, E150 Siedepunkt / Final boiling point Destillationsrückstand / Residue VLI (10 VP + 7 E70)	kPa	45,0	60,0	EN 13016-1	
	%(V/V)	20,0	48,0	EN ISO 3405	
	%(V/V)	46,0	71,0	EN ISO 3405	
	%(V/V)	75,0		EN ISO 3405	
	°C		210	EN ISO 3405	
	%(V/V)		2	EN ISO 3405	
	Index	nicht spezifiziert / not specified			
	1. Mai bis 30. September (Klasse A) 1. May till 30. Sep. (Class A)				
	Dkt. - 15. Nov. und 16. März - 30. April (Klasse D) Oct. - 15. Nov. and 16. March - 30. April (Class D)				
	Dampfdruck / Vapour pressure aufgefangen bei / recovered at 70 °C, E70 aufgefangen bei / recovered at 100 °C, E100 aufgefangen bei / recovered at 150 °C, E150 Siedepunkt / Final boiling point Destillationsrückstand / Residue VLI (10 VP + 7 E70)	kPa	45,0	90,0	EN 13016-1
%(V/V)		20,0	50,0	EN ISO 3405	
%(V/V)		46,0	71,0	EN ISO 3405	
%(V/V)		75,0		EN ISO 3405	
°C			210	EN ISO 3405	
%(V/V)			2	EN ISO 3405	
Index		1150			
16. Nov. bis 15. März (Klasse D) 16. Nov. bis 15. March (Class D)					
Dampfdruck / Vapour pressure aufgefangen bei / recovered at 70 °C, E70 aufgefangen bei / recovered at 100 °C, E100 aufgefangen bei / recovered at 150 °C, E150 Siedepunkt / Final boiling point Destillationsrückstand / Residue VLI (10 VP + 7 E70)		kPa	60,0	90,0	EN 13016-1
		%(V/V)	22,0	50,0	EN ISO 3405
	%(V/V)	46,0	71,0	EN ISO 3405	
	%(V/V)	75,0		EN ISO 3405	
	°C		210	EN ISO 3405	
	%(V/V)		2	EN ISO 3405	
	Index	nicht spezifiziert / not specified			

Quelle: <https://www.epc.shell.com/>

Warum ist die Physik für uns relevant?



Die Siedekurven von unterschiedlichen Kraftstoffen auf Meereshöhe.

Die Dampfbildung startet bei

- Winterbenzin bei 30°C
- Sommerbenzin bei 40°C
- Flugbenzin bei 60°C

Zwischen Winterbenzin und Flugbenzin liegen 30°C Sicherheitsabstand beim Siedebeginn.

Mit zunehmender Dichtehöhe sinkt der Siedebeginn weiter ab. Bsp. Wasser 100°C@MSL, 90°C@3000m.

Wie war das noch mit der Dampfblasenbildung?

- ▶ Dampfblasenbildung passiert, wenn Kraftstoff, normaler Weise in flüssiger Form, sich noch im Kraftstoffsystem in Dampf verwandelt.
- ▶ Die Dampfblasenbildung startet, wenn der aktuelle Druck im Kraftstoffsystem kleiner gleich dem Dampfdruck des Kraftstoffs ist
- ▶ Niedriger Druck entsteht insbesondere auch an der Saugseite der Kraftstoffpumpe
- ▶ Diese Veränderung kann ein Abreißen der Kraftstoffsäule an der Kraftstoffpumpe bewirken.
- ▶ Sie unterbricht den Kraftstofffluss und kann zu teilweisem oder vollständigem Verlust der Triebwerksleistung führen.

Faktoren für die Dampfblasenbildung

- ▶ Flüchtigkeit des Kraftstoffs (Dampfdruck)
- ▶ Niedriger Umgebungsdruck
- ▶ Hohe Kraftstofftemperatur

Unterstützende Faktoren

- ▶ Turbulenzen
- ▶ Widerstände im Kraftstoffsystem (Engstellen, Knicks)
- ▶ Motorraum-Überhitzung

Szenario

- ▶ Sommer:
 - ▶ Außentemperatur 30°C, Sonneneinstrahlung
 - ▶ Nach dem Abstellen des Motors bleibt der Motorraum erhitzt, der Tank wird ebenfalls warm. Der warme Kraftstoff im Motorraum wird auch später nicht durch kühleren aus dem Tank ersetzt.
 - ▶ Nach dem Start erhöht ein schneller Aufstieg bei Vollast in große Dichtehöhen das Risiko von Dampfblasen im Kraftstoffsystem wegen des sinkenden Siedepunktes weiter
 - ▶ Thermik-bedingte Turbulenzen (Schütteln) erhöht die Tendenz zur Dampfblasenbildung weiter

Oktanzen erklärt

- ▶ Ein Motor klopft, wenn das Kraftstoff-Luft-Gemisch vor dem optimalen Zündzeitpunkt detoniert, bevor der Kolben die Abwärtsbewegung begonnen hat.
- ▶ Die Oktanzahl (OZ) ist eine Kennzahl für die Klopfestigkeit bei Ottokraftstoffen.
- ▶ Die Research-Oktanzahl (RON) beschreibt das Verhalten des Kraftstoffes im Motor bei niedrigerer Temperatur und Drehzahl.
- ▶ Die Motor-Oktanzahl (MON) beschreibt das Verhalten des Kraftstoffes im Motor bei hoher Drehzahl und hohem Temperaturbereich.
- ▶ In Flugmotoren ist die MON relevant. Uns geht es nicht um das Beschleunigungsverhalten, sondern um die Klopfestigkeit bei Vollast.
- ▶ RON und MON unterscheiden sich um ca. 10, MON ist in der Regel um 10 niedriger als die RON

Oktanzen gangiger Kraftstoffe, frische Ware

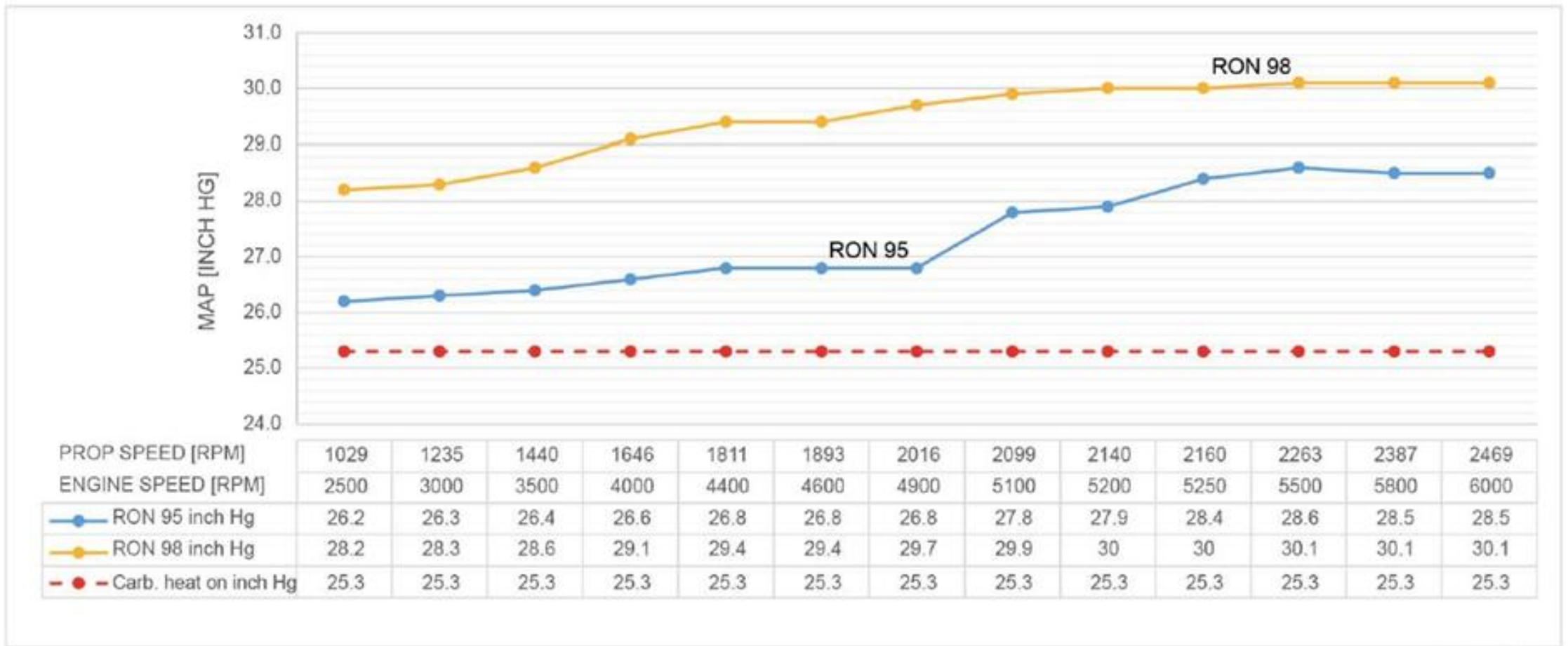
- ▶ Super Kraftstoff hat eine RON von 95
- ▶ Super Plus hat eine RON von 98
- ▶ Premium-Kraftstoffe haben eine RON von ≥ 100
(z.B. Total Excellium, Aral Ultimate, Shell Vpower)
- ▶ AVGAS 100LL (low lead) hat eine MON von 100 (~RON 110)
- ▶ AVGAS UL91 (unleaded) hat eine MON von 91 (~RON 100)

Kloppfestigkeit bei Rotax 912S/ULS Motoren

- ▶ Rotax spezifiziert den maximalen Ladedruck („Gasstellung“), der bei einer gegebenen Kloppfestigkeit und einer gegebenen Drehzahl genutzt werden darf. Beim Überschreiten besteht die Gefahr des Motorklopfens mit möglicherweise fatalen Folgen für den Motor.
- ▶ Der Rotax 912ULS z.B. sollte bei „Vollgas“ nicht zu niedrig drehen. Bei Super Plus Kraftstoff (RON 98) besteht erst ab einer Motordrehzahl von 5200U/min keine Begrenzung des MAP nach oben.
- ▶ Bei Super (RON 95) ist schon bei 28,5 inHG Schluss, diese sollte man nicht überschreiten, will man sicher ein Motorklopfen vermeiden. Bei Drehzahlen unter 5100U/min liegt diese Grenze sogar deutlich niedriger.
- ▶ Bei betätigter Vergaservorwärmung liegt die MAP Grenze generell Drehzahl- und Kraftstoffunabhängig bei 25,3 inHg.

Klopffestigkeit bei Rotax 912S/ULS Motoren

Der Bereich über der jeweiligen Kurve muss grundsätzlich vermieden werden.



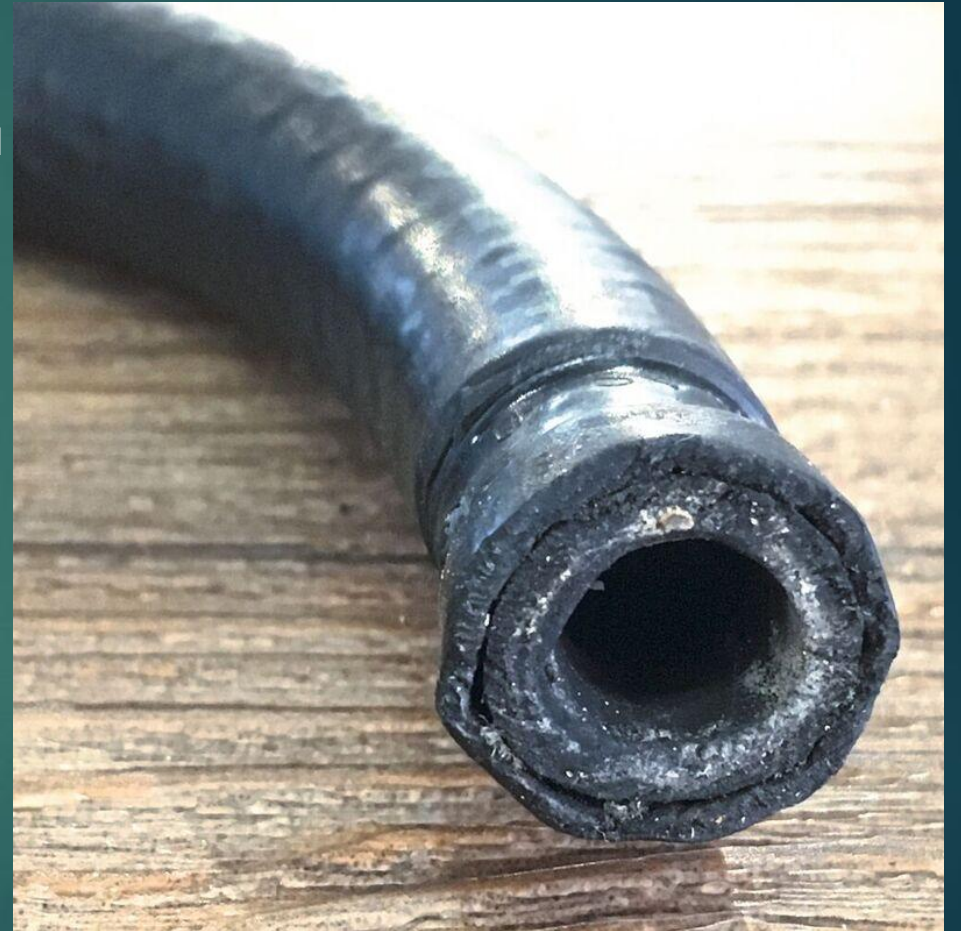
AE_2_0589

Klopfestigkeit – was müssen wir beachten?

- ▶ Klopfen schädigt und zerstört damit den Motor
- ▶ Mindestens Super Plus mit RON 98 tanken
- ▶ Steht nur Super mit RON 95 zur Verfügung, so gelten strenge MAP Grenzen abhängig von der Motordrehzahl
- ▶ Auf frischen Kraftstoff achten, ggf. Alter beachten
- ▶ Vollastdrehzahl im Start muss nach kurzer Zeit ≥ 5200 U/min liegen (Prop. ≥ 2140 U/min)
- ▶ Vergaservorwärmung gem. US Vorbild bereits im Endanflug z.B. bei Anwahl max. Drehzahl bei VP Propeller deaktivieren

Materialverträglichkeit - Ethanol im Sprit

- ▶ Benzin mit geringen Mengen Ethanol ist mit etlichen Werkstoffen nicht verträglich. (Ottokraftstoff-Ethanol-Gemisch Anomalien)
- ▶ Beim Einsatz von Super Benzin ist nahezu immer mit einem Ethanol-Anteil zu rechnen. Auch Aral Ultimate, Total Excellium und Shell V-Power garantieren nicht mehr Ethanolfreiheit (Beispiel Shell V-Power ~1% Ethanol)
- ▶ Kraftstoffleitungen können massiv degenerieren
- ▶ Kunststoffe können verspröden (T-Stücke, Verbinder, Flow-Sensoren)
- ▶ Kunststoff-Kraftstoff-Filter können aufquellen und "dicht" werden.
- ▶ Papierfilter können wegen des Wasser-Ethanolgemisch mit Bakterien zuwachsen.
- ▶ Messing ist nicht Ethanol-fest, besonders bei geringer Wandstärke
- ▶ **Nur FKM/Viton Dichtungen und Schläuche sind Ethanol-Gemisch fest**



Wasseraufnahme

- ▶ Bei AVGAS und Ethanol-freiem Ottokraftstoff wird Wasser stets und vollständig am Gefäßboden abgesetzt. Beim Drainen erkennt man Wasser im Kraftstoff zuverlässig.
- ▶ Ein Kraftstoff mit Ethanol ist wasseranziehend und löst Wasser zunächst bis zu einer gewissen Menge. Es entsteht ein Wasser-Kraftstoff-Gemisch.
- ▶ Bei Kälte wird das Wasser wieder abgeschieden (z.B. bei Abkühlung im Vergaser->Vergaservereisung wird begünstigt).
- ▶ Bei größerer Wasserkonzentration fällt das (hoch korrosive) Wasser-Ethanolgemisch am Gefäßboden aus. (Bsp. Lochfraß an gelöteten Messing Vergaserschwimmern)
- ▶ Besonders geringe Ethanol-Konzentrationen führen bei langer Standzeit zur Entmischung und folgender Korrosion, z.B. in Tank, Pumpen und Vergasern. E10 ist hier deutlich gutmütiger als E5.

Lagerfähigkeit von Kraftstoffen

- ▶ Lagerfähigkeit von Super Kraftstoff ist begrenzt und von den Lagerbedingungen abhängig (3 – 6 Monate, Saisonalität beachten!)
- ▶ Bei der Lagerung verändern sich die Kraftstoffeigenschaften hin zu geringerem Dampfdruck und einer reduzierten Oktanzahl.
- ▶ Superkraftstoff ist nach einem Winter im Flugzeugtank im allgemeinen nicht mehr als Flugkraftstoff geeignet. Zu viele Kraftstoff-bedingte Zwischenfälle passieren zum Saisonstart!

Lieferketten bei Kraftstoff

- ▶ Superbenzin wird local gesourced (locale Raffinerien beliefern ALLE Kunden), Transport erfolgt in Mehrsorten-Tankfahrzeugen. Restmengen verbleiben in Schläuchen und Pumpen
- ▶ Tankanlagen sind zugelassen, aber aus unterschiedlichen Epochen nach unterschiedlichen Vorschriften
- ▶ Ethanolanteil “versteckt” enthaltenes Wasser
- ▶ Luftfahrtkraftstoff ist wesentlich länger ohne Qualitätseinbußen Lagerfähig, hat dazu auch eine deutlich anspruchsvollere (also leider auch teurere) Transportkette und Qualitätssicherung bis zum Endabnehmer

Flugkraftstoffe sind deutlich teurer als Auto-Kraftstoffe. Warum nicht immer Mogas nutzen, bei dem Preisunterschied?

- ▶ Bei Mogas ist nicht sicher vorhersagbar, welche Saisonware verfügbar ist
- ▶ Mogas ist nicht für alle Betriebspunkte geeignet (heiß, hoch...)
- ▶ Es sind im Betrieb MAP Grenzen unbedingt zu beachten, um Motorklopfschäden zu vermeiden
- ▶ Verunreinigung mit Wasser ist wesentlich schlechter erkennbar
- ▶ Mogas ist wesentlich schlechter lagerfähig
- ▶ Es gibt relevante Anforderungen an die Kraftstoffanlage im Flugzeug

Darum:

- ▶ Bei unklarer Kraftstoffherkunft und -geschichte
- ▶ Bei hoher Außentemperatur oder großer Dichtehöhe
- ▶ Bei stark erwärmtem Motorraum
- ▶ Bei starken Turbulenzen
- ▶ Bei zu erwartenden langen Vollast-Phasen bei hoher Temperatur und ungünstigem Motor-Betriebspunkt (Fix-Prop oder “Sparfux”)
- ▶ Bei Unklarheit zum Flugzeug bzgl. Material- und ggf. Zulassungs-Anforderungen

Zweimal nachdenken, berücksichtigen und ggf. warten und nicht starten oder anderen Kraftstoff nutzen!

Was kann alles passieren...



Ein hervorragendes (leider Englisch) Video zu dem Thema findet ihr hier:

<https://youtu.be/aKVyA7ROQ6A?si=SBpEab67NLCq2Kej>

Das Video lässt sich bei Youtube auch mit "automatisch" übersetzten Deutschen Untertiteln abspielen.

Unfallberichte zu dem Thema:

<https://taproot.com/monday-accidents-lessons-learned-uk-crash-reveals-use-of-mogas-a-vapor-lock/>

<https://generalaviationnews.com/2018/10/15/vapor-lock-contributes-to-crash/>

<https://www.timeschronicle.ca/plane-crash-north-of-osoyoos-in-july-2015-likely-caused-by-vapour-lock-and-use-of-gasoline-tsb/>

Ein Video zum Siedeverhalten von Autokraftstoff im Vergleich zu 91UL:

<https://youtu.be/rKloTwCQoDk>



Feuer frei:
Fragen und Antworten

gerne auch per Mail
kleen@warter-aviation.de
andreas.titze@web.de