



BILD © KGG1961 / Wikipedia

BIOGENE AUTOMOBILKRAFTSTOFFE IN DER ALLGEMEINEN LUFTFAHRT

Für zahlreiche Kleinflugzeuge mit Ottomotoren ist es erlaubt, gegenüber dediziertem Flugkraftstoff deutlich günstigere und bleifreie Automobilkraftstoffe zu verwenden. In einer umfangreichen Studie für die European Aviation Safety Agency (EASA) untersuchte die FH Aachen in Verbindung mit mehreren industriellen Verbundpartnern die möglichen Gefährdungen der Lufttüchtigkeit bei Verwendung von Kraftstoffen mit bis zu 15 Vol.-% Ethanolanteil.

AUTOREN



PROF. DR.-ING. THOMAS ESCH

ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Angewandte Thermodynamik und Verbrennungstechnik an der FH Aachen.



PROF. DR.-ING. HARALD FUNKE

ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Gasturbinen und Flugtriebwerke an der FH Aachen.



DR.-ING. PETER ROOSEN

ist Geschäftsführer der g.o.e.the GmbH Aachen, freiberuflicher Thermodynamiker und Physiker auf dem Gebiet der Systemmodellierung und -optimierung.



DIPL.-ING. ULRICH JAROLIMEK

ist Geschäftsführer der ISP GmbH in Aachen.

MOTIVATION UND STATISTISCHE BASIS

Die Zulassung von Automobilkraftstoffen ist jedoch derzeit für die meisten Flugzeuge an eine Obergrenze des Ethanolgehalts von 1 % geknüpft, die von einigen Fahrzeugkraftstoffen (Super Plus) eingehalten wird. Bedingt durch die mittlerweile fast flächendeckende Beimischung von bis zu 5 % Ethanol wird diese Obergrenze seit etwa einem Jahr auch bei einigen Super-Plus-Benzinen deutlich überschritten. Kraftstoffe mit nochmals höheren Ethanolkonzentrationen (E10) stehen kurz vor ihrer flächendeckenden Einführung.

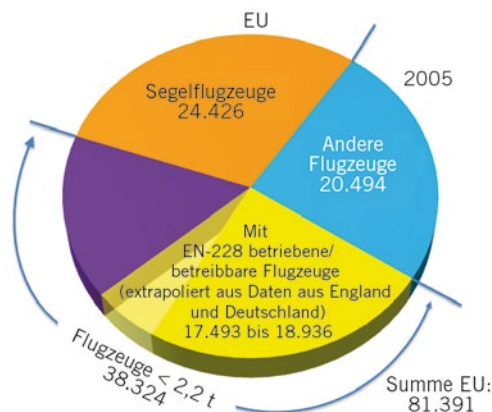
Die europäischen Staaten erfüllen ihre Verpflichtung zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes unter anderem durch die Beimischung biogener, nachwachsender Kraftstoffkomponenten zu fossilen Grundkraftstoffen. Bei den Ottokraftstoffen kommt aufgrund technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen derzeit fast ausschließlich Ethanol als biogene Zumischung größeren Maßstabs in Frage. Ethanol unterscheidet sich jedoch chemisch und physikalisch recht stark von den bislang üblichen fossilen Komponenten und dem nur teilweise aus Ethanol gewonnenen und entsprechend in der Beimischungsverordnung geringer angerechneten ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether).

Ein kleiner Teil der für den Straßenverkehr produzierten Ottokraftstoffe wurde in den vergangenen Jahren zum Betrieb hier-

für zugelassener kleiner Flugzeuge mit Kolbenmotoren eingesetzt. Nicht zuletzt aus ökonomischen Gründen verwendet ein zunehmender Teil der Piloten gerne diese in Fliegerkreisen Mogas (Motor Gasoline) genannten Fahrzeugkraftstoffe. Zwar wird die größere Zahl dieser Flugzeuge weiterhin mit Avgas (Aviation Gasoline) betrieben, doch steht dieser Treibstoff zunehmend wegen seines recht hohen Bleigehalts in der Kritik, so dass auch insgesamt nach technisch überzeugenden und gleichzeitig bezahlbaren Alternativen gesucht wird.

Die durch Verwendung ethanolhaltigen Kraftstoffs entstehenden Gefährdungspotenziale wurden zunächst durch eine FMEA (zur Produktion und Verteilung des Kraftstoffs, seiner Lagerung, Verwendung im Flugzeug und zur Auswirkung auf Flugzeugteile) eruiert. Es folgte eine ausführliche exemplarische experimentelle Untersuchung der als vordringlich erkannten Problempunkte an zwei typischen Motoren kleiner Flugzeuge: Einem für die Verwendung von Fahrzeugkraftstoff nach DIN EN 228 zugelassenen Rotax 912 ULS und einem nur für Avgas freigegebenen Lycoming O 360 A1A. Nach entsprechenden Tests wurde der Rotax-Motor sogar bis zu Ethanolgehalten von 10 % (v/v) freigegeben. Flankiert wurden diese motorischen Untersuchungen von Kraftstoff-Langzeitlagerversuchen unter flugzeugähnlichen Bedingungen, Laboruntersuchungen zur temperaturinduzierten Entmischung wasserhaltiger Kraftstoffe, dynamischen Dampfdruckmessungen unter flugähnlichen Randbedingungen, Flugversuchen mit einem Forschungsflugzeug und einer ausführlichen Material-Kompatibilitätsrecherche.

① zeigt den derzeitigen, aus deutschen und englischen Daten gewonnenen und auf Gesamteuropa hochgerechneten Anteil der derzeit aktiv mit Mogas betriebenen und potenziell betreibbaren Flugzeuge an der gesamten europäischen Flotte der sogenannten Allgemeinen Luftfahrt. Da die Flugflotte dieser beiden Staaten bereits zirka 40 % der gesamten europäischen Flotte ausmachen, kann dieser Statistik eine hohe Praxisrelevanz zugesprochen werden. Insgesamt kann von einer Zahl von knapp 20.000 betroffenen Flugzeugen in Europa ausgegangen werden.



① Europäischer Anteil der aktiven und potenziellen Mogas-Flugzeuge an der gesamten GA-Flotte (statistische Daten aus 2005)

UNTERSCHIEDE ZWISCHEN MOGAS UND AVGAS

Flugkraftstoff muss andere Betriebsrandbedingungen als Fahrzeugkraftstoff berücksichtigen: Bedingt durch den Temperaturabfall in Höhen von teilweise mehreren Kilometern kühlt der Kraftstoff während des Flugs im Tank deutlich ab. Im thermischen Gleichgewicht sind Temperaturen bis unter -35 °C möglich. Sämtliche Motorteile sind auch luftgekühlt und somit hinsichtlich des Wärmeabtransports vom propellerinduzierten Luftdurchsatz abhängig, der sich in unterschiedlichen Flugsituationen deutlich unterscheiden kann. Die Motorkonzepte, die Brennverfahren und damit einhergehend die Materialauswahl des Kraftstoffsystems sind häufig mehrere Jahrzehnte alt und damit einer Zeit zuzuordnen, in der niemand an die Zumischung freien Ethanol dachte.

Da ein Motorausfall bei einem Flugzeug im Vergleich zu einem Fahrzeug vergleichs-

weise sehr kritisch bis lebensgefährlich ist, unterliegen dedizierte Flugkraftstoffe einer sehr strengen Produktkontrolle, die sich auf die Spezifikation ihrer Zusammensetzung, ihre technischen Eigenschaften und auf die Überwachung der Distributionskette inklusive der Lagerung auf dem Flugplatz bis in den einzelnen Flugzeugtank hinein erstreckt. ❷ stellt vergleichend wesentliche Eigenschaften von Avgas und Mogas einander gegenüber. Bemerkenswert und in Bezug auf die möglichen Auswirkungen von Ethanolbeimischungen wichtig ist der Unterschied im Dampfdruckwert, der jedoch nur unzureichend den unterschiedlichen Verlauf der Siedelinie des Vielkomponentengemisches „Kraftstoff“ summarisch beschreibt. Während Avgas unabhängig von der Jahreszeit mit stets gleich bleibenden physikalischen Eigenschaften ausgeliefert wird, schwanken die des Fahrzeugkraftstoffs saisonal bedingt, insbesondere hinsichtlich des Dampfdrucks.

GEFÄHRDUNGSPOTENZIALE

Aus dem deutlich höheren Dampfdruck des Mogas leitet sich unmittelbar das erste, jedoch auch unanschaulichste Gefährdungspotenzial im Zusammenhang mit zugemischtem Ethanol für den Flugzeugbetrieb ab. Beimischungen von bereits recht geringen Mengen Ethanol zu konventionellem Kraftstoff erhöhen den Dampfdruck des Gemischs deutlich [1]. Dies ist auf die gegenüber dem Reinstoff geänderte molekulare Umgebung des Ethanol zurückzuführen: Es fehlen den einzelnen Ethanolmolekülen ihre Wasserstoffbrücken-Bindungspartner, wenn sie nur in geringen Prozentmengen fossilen, unpolaren, hydrophoben Grundkraftstoffen beigemischt werden. Dieser Effekt ist jedoch nichtlinear: Der Dampfdruck eines Benzins unveränderter Basisformulierung steigt zunächst bis zu einer beigemischten Ethanolmenge von zirka 2 bis 3 % stark an und verringert sich dann wieder, um bei hohen Ethanolgehalten (jenseits

PARAMETER	MOGAS	AVGAS 100LL
Siedeendpunkt	210 °C	170 °C
Destillationsrückstand	< 2 % v/v	< 1,5 % v/v
Sauerstoffgehalt	2,7 % m/m	nicht zugelassen
Methanolgehalt	< 3 % (im Superbenzin)	nicht zugelassen
Isopropyl-Alk.	< 10 % (im Superbenzin)	nicht zugelassen
Isobutyl-Alk.	< 10 % (im Superbenzin)	nicht zugelassen
Tert-Butyl-Alk.	< 7 % (im Superbenzin)	nicht zugelassen
Gesamt-Alkoholgehalt	< 1 % (sofern als Mogas eingesetzt)	nicht erlaubt
Ether	< 15 %	nicht zugelassen
Wasser	kein normatives Limit	wasserfrei
Dampfdruck (DVPE)	Winter 60 bis 90 kPa Sommer 45 bis 60 kPa	immer 38 bis 49 kPa
Kälteverhalten	nicht definiert	Kristallisationspunkt -60 °C
Additive	unterschiedlich	begrenzte Anzahl
Qualität	DIN EN 228	ASTM D 910-02
Oktanzahl	MOZ min 88	MOZ min 100
Bleigehalt	< 0,005 g/l	< 0,56 g/l
Leitfähigkeit	keine Spezifikation	spezifiziert
Handling	Qualitätsmanagement für Lager und Transport	vollständig und umfassend beschriebene Abläufe für Lagerung, Logistik etc.
Tankkontrolle	Stichprobe	Verprobung jedes Tanks
Verladung	Kontrolle durch den Fahrer	Verladung mit Aufsicht
Schwefel	< 50 ppm	< 500 ppm
Lagerung	gelegentliche Tankkontrolle, branchen- und marktüblich	tägliche Kontrolle, regelmäßige Tankpflege, Entfernung von Wasser und Verschmutzung

❷ Ausgewählte Eigenschaften von Avgas und Mogas im Vergleich



3 Prüfstand zur Untersuchung der Auswirkung dynamischer Druckabsenkungen auf das Entstehen von Kraftstoffdampfblasen

marktgängigen Kraftstoffvarianten eingehalten. Problematisch wird die Situation jedoch, wenn bei aufeinander folgenden Betankungen Benzine unterschiedlichen Ethanolgehalts in größeren Mengen aufeinander treffen: Hier kann der Dampfdruck des Gemischs um mehrere Prozent höher sein als der seiner einzelnen Komponenten. In Verbindung mit dem bei Fahrzeugkraftstoffen inhärent höheren Dampfdruck kann dies zu verstärkter Blasenbildung in heißen, motornahen Abschnitten des Kraftstoffversorgungssystems eines Flugzeugs führen. Dieser Effekt wurde in einem speziell dafür konstruierten Prüfstand, 3, untersucht, in dem im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung konventionellem Benzin Ethanol in variablen Mengen beigegeben und das Auftreten von Blasen im simulierten Flugzeugkraftstoffsystem bei erhöhten Temperaturen und abgesenktem Umgebungsdruck untersucht wurde.

4 zeigt das Auftreten von Dampfblasenbildung in einem so hergestellten E10-Gemisch im Vergleich zu Avgas. Zwei Grenzwerte eines optischen Blasensensors definieren einen Bereich relativ schwacher Blasenbildung, innerhalb dessen ein Pilot voraussichtlich beginnt, Auswirkungen auf den Motorlauf zu bemerken und bei Nichtbeachtung ernsthafte Schwierigkeiten mit der Blasenbildung bekommen wird. Diese Grenzen sind für das untersuchte Feld von

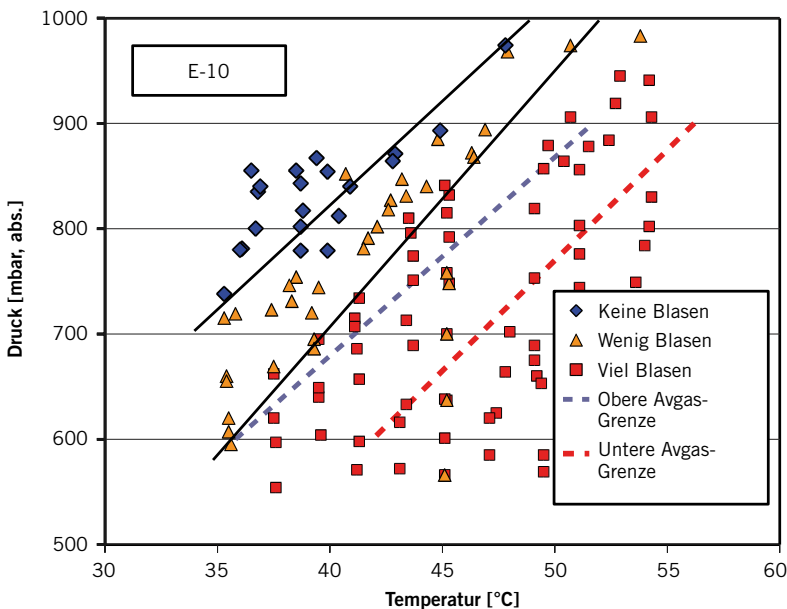
Temperatur- und Absolutdruck-Randbedingungen in Form zweier durchgezogener Linien dargestellt. Entsprechende, für Avgas ermittelte Grenzlinien sind gestrichelt in das gleiche Diagramm eingezeichnet. Sie zeigen, dass Dampfblasenbildung vergleichbarer Stärke im ethanol-dotierten Mogas im Vergleich zum Avgas bereits bei deutlich geringeren Temperaturen und höheren Umgebungsdrücken auftreten.

Insbesondere nach einem längeren Sinkflug mit reduzierter Propellersgeschwindigkeit und bei Wiedereintritt in wärmere, bodennahe Luftschichten kann sich das motornah Kraftstoffsystem beträchtlich aufheizen. In entsprechenden Versuchen der FH Aachen wurden Temperaturen bis über 60 °C gemessen. Das Auftreten einer verstärkten Dampfblasenbildung ist unter solchen Randbedingungen zu erwarten. Bei der Landung am Ende des Sinkflugs muss jedoch die volle Motorleistung für ein möglicherweise notwendiges Durchstarten zur Verfügung stehen. War die Dampfblasenbildung jedoch zu stark, ist dies nicht mehr der Fall, und der Motor kann beim Versuch eines starken Beschleunigens sogar ganz absterben. Dieser Effekt wird als „Vapour Locking“ bezeichnet, da die gebildeten Dampfblasen das Nachfördern flüssigen Kraftstoffs unterbinden können.

Bedingt durch die gegenüber fossilen Kraftstoffkomponenten deutlich erhöhte

der 40 %) sogar unter den des Basiskraftstoffs zu fallen.

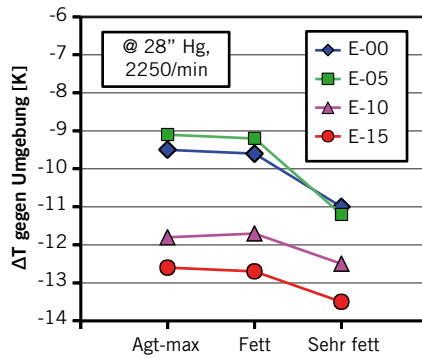
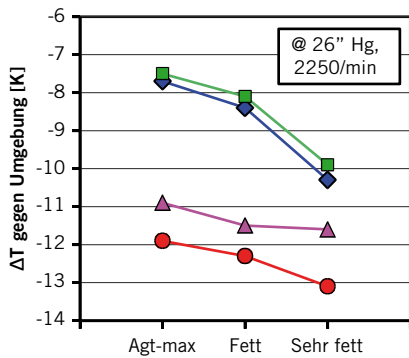
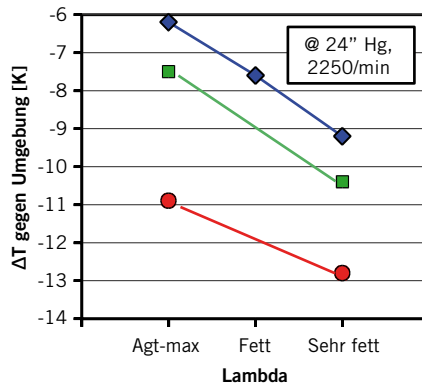
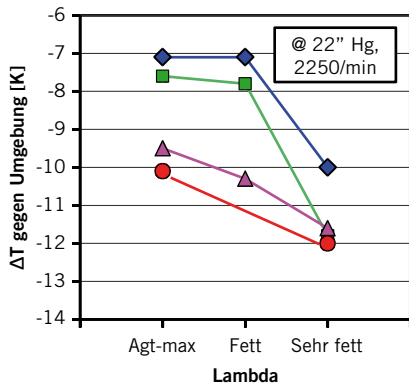
Für sich genommen ist jedes marktübliche ethanolhaltige Benzin durch seine Formulierung, insbesondere die Auswahl des die Grundlage bildenden, fossil gewonnenen Basiskraftstoffs, normkonform eingestellt. Die DIN EN 228 wird von allen



4 Exemplarisches Ergebnis zum Einfluss einer 10-prozentigen Ethanolzugabe zu konventionellem Kraftstoff auf das Entstehen von Kraftstoffdampfblasen



5 Propellerbestückter Rotax 912 ULS auf dem Prüfstand



6 Temperaturabsenkung im Ansaugkanal hinter dem Vergaser bei Ethanolbetrieb an einem Lycoming-O-360-A1A-Motor für verschiedene Lastzustände (Saugrohr-Absolutdrücke angegeben in Inch-Quecksilbersäule); „Agt-max“ = Maximum der Abgastemperatur

Verdampfungsenthalpie des Ethanol kann es auch zu einem genau entgegengesetzten Effekt kommen: Praktisch alle Benzin-Flugmotoren sind noch mit Vergasern ausgestattet. Die zur mindestens teilweisen Verdampfung des Kraftstoffs erforderliche Wärmemenge wird wesentlich aus der Abkühlung des sich bildenden Luft-Benzin-Gemischs gezogen, so dass sich bei Vorliegen kondensierbarer Feuchtigkeit Eis im Vergaserdurchtritt ablagern und die fluiddynamischen Eigenschaften dieses Bauteils stark beeinträchtigen kann. Da dieser Effekt von mehreren Faktoren (Wassergehalt des Kraftstoffs und der Luft, Temperatur der Luft, Wärmeeintrag in den Vergaserbereich, ...) in nichtlinearer Form abhängt, ist eine genaue Ursachenkonstellation für das Auftreten einer Vergaservereisung nur schwer vorherzusagen. Experimente zur ethanolbedingten Temperaturabsenkung wurden sowohl an einem Rotax-912-ULS-Motor auf einem Prüfstand, 5, als auch am Laborflugzeug der FH Aachen, einer einmotorigen Morane mit einem Lycoming-O-360-A1A-Motor, am Boden durchgeführt. Hierzu wurden die Aggregate mit unterschiedlich stark etha-

nolversetztem Automobilkraftstoff betrieben und die sich ergebende Temperaturabsenkung im Ansaugstutzen nach dem Zumischungspunkt des Kraftstoffs gemessen. 6 zeigt Ergebnisse für den genannten Lycoming-Motor. Je nach Brennstoff-Luft-Verhältnis, das bei vielen kleinen Flugzeugen händisch an verschiedene Flugbedingungen angepasst werden kann und muss, wurden zusätzliche Temperaturreduktionen gegenüber dem Basiskraftstoff von bis zu 4 °C beobachtet.

Ethanolhaltiger Kraftstoff hat die grundsätzlich angenehme Eigenart, Wasser zu binden. Mit wachsendem Ethanolgehalt wächst das sogenannte Wassertragevermögen, das zudem positiv mit der Temperatur korreliert. Dies stellt jedoch für die flugtechnische Nutzung ethanoldotierter Kraftstoffe ein Problem dar: Da in größeren Höhen die Umgebungstemperatur deutlich niedriger liegt als am Erdboden und die Tanks des Flugzeugs häufig in den Tragflächen untergebracht und vom Wind umströmt sind, kühlt das Benzin stark aus: Experimente an einem relativ gut gegen die Umströmung geschützten Tank zeigten Abkühlungen um zirka 20 °C. Solange das

Benzin nur wenig Wasser enthält, stellt dies kein Problem dar. Wenn jedoch durch Fehler in der Logistik, undichte Tankeinfüllstutzen, Absorption der Umgebungsfeuchte während langer Standzeiten im Freien oder Ähnlichem Wasser in zunächst gelöster Form vom Benzin aufgenommen wurde, kann dies bei der starken Abkühlung während des Flugs zu einer sogenannten Phasenseparation führen, 7. Statt eines homogenen, alle drei Komponenten (Benzingrundstoffe, Ethanol, Wasser) enthaltenden Kraftstoffs liegen dann zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Zusammensetzung vor, die zunächst als trübes Gemisch (Kraftstoff mit fein emulgierten Ethanol-Wasser-Tröpfchen) in Erscheinung treten. Nach einer nicht genau bezifferbaren Zeit koagulieren diese emulgierten Flüssigkeiten aufgrund ihres Dichte-Unterschieds durch die Gravitation in zwei übereinander geschichtete, makroskopische Volumina: Die obere Phase enthält dann hauptsächlich die hydrophoben Benzinbestandteile und noch etwas Ethanol. Dieser Kraftstoff ist zündfähig, jedoch in der Regel etwas weniger klopfest. Die schwerere untere Phase besteht hingegen fast vollständig aus einer Wasser-Ethanol-Mischung. Da der Kraftstoff in Flugzeugen üblicherweise an der Unterseite des Tanks abgezogen wird, wird somit nicht brennbares Fluid in das Kraftstoffsystem gezogen, und der Motor setzt aus. Die besondere Gefährlichkeit dieses Effekts liegt darin begründet, dass der Pilot in seiner geforderten technischen Durchsicht des Flugzeugs vor dem Abflug das Vorhandensein des eingelagerten Wassers mit heutigen Mitteln nicht erkennen kann: Im Warmen und vor dem Abflug liegt keine abscheidbare zweite Bodenphase vor. Mögliche Messinstrumente, die die Menge des gelösten Wassers anzeigen können, sind zwar in der Entwicklung, jedoch noch nicht verfügbar.

Abgesehen von einigen Materialunverträglichkeiten bei älteren Fahrzeugen wirkt sich die neue Kraftstoffzusammensetzung im Fahrzeugbetrieb nur in relativ geringem Maße aus. Das Durchschnittsalter der deutschen Fahrzeugflotte liegt bei etwa acht Jahren. Das Durchschnittsalter der Flugflotte ist hingegen mit 20 Jahren deutlich höher. Viele Materialien des Kraftstoffsystems kleiner Flugzeuge sind aufgrund ihres konstruktiven Alters von mehr als 30 Jahren nicht für Benzin-

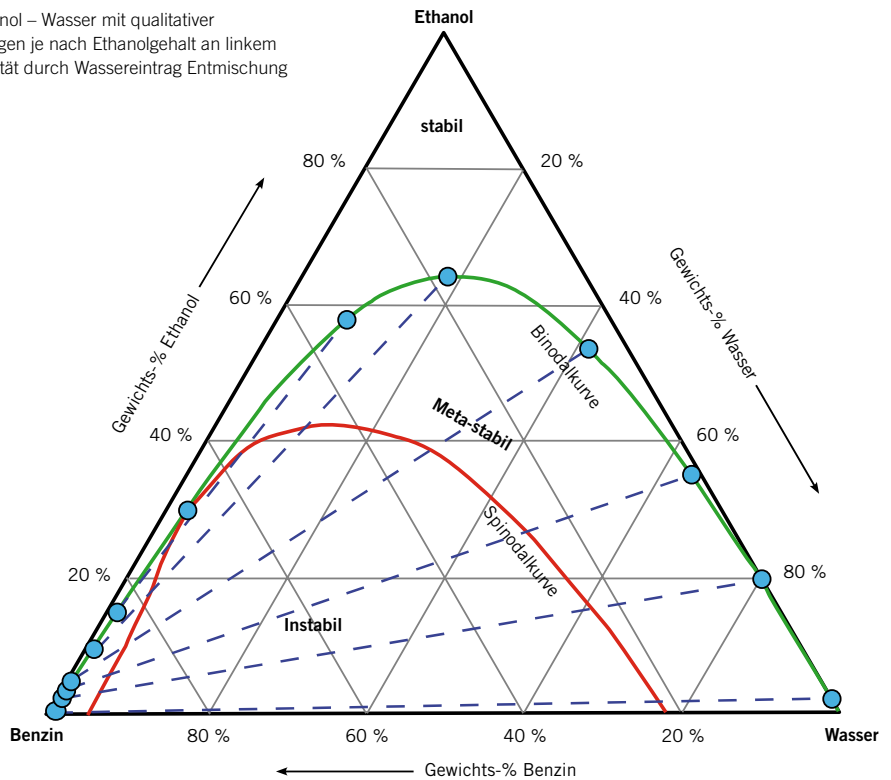
7 Ternärdiagramm des Gemisches Fossilkraftstoff – Ethanol – Wasser mit qualitativer Entmischungsgrenze; normale Kraftstoffzusammensetzungen je nach Ethanolgehalt an linkem Rand beziehungsweise in linker unterer Ecke, bei Instabilität durch Wassereintrag Entmischung entlang der gestrichelten Linien in zwei separate Phasen

Alkoholgemische ausgelegt und können in verschiedensten Varianten versagen, etwa durch Versprödung, durch Aufquellen mit gleichzeitigem Festigkeitsverlust oder einer Verlegung enger Strömungsquerschnitte etwa nach flockigen Ablösungen alter Ablagerungen im Kraftstoffsystem.

Der Bereich der Elastomere erwies sich bei den Materialrecherchen als wesentlicher Problembereich. In vielen Flugzeugen kommen NBR-basierte „Gummi“-Schläuche zum Einsatz, die insbesondere bei höheren Temperaturen in Motornähe nicht ethanolfest sind. Mit Perfluor-Kautschuken stehen zwar alternative Materialien zur Verfügung, jedoch wurden aus ökonomischen Gründen – das Basismaterial ist teils um das Hundertfache teurer – bislang keine entsprechenden Ersatzbeziehungsweise Austauscherteile gefertigt und für den Luftbetrieb zertifiziert. Aufgrund der relativ geringen verbauten Materialmengen würden die resultierenden Teile zwar nur wenige oder wenige zehn Euro teurer, jedoch gab es bislang für die Hersteller dieser Teile keinen Grund, solche zu entwickeln.

ZUSAMMENFASSUNG

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass ein Flugbetrieb auch mit ethanol-dotierten Kraftstoffen grundsätzlich möglich wäre. Dies gilt auch für ältere Flugzeugtypen, sofern sie sorgfältig und unter Berücksichtigung einer größeren Zahl möglicher Gefährdungspotenziale auf ethanol-dotierte Kraftstoffe umgestellt und fortan ausschließlich damit betrie-



ben würden. Die bei einer Umstellung abzuwehrenden, möglichen Gefährdungen hängen jedoch sehr individuell vom einzelnen Flugzeugmodell, seiner Konstruktionsweise und nicht zuletzt seiner Vorgeschichte ab. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Notwendigkeit einer sehr sorgfältigen, regelmäßigen Wartung aller kraftstoffführenden Komponenten, weil mögliche Säumnisse bei ethanolhaltigen Kraftstoffen weitaus größere negative Effekte hervorrufen als bei früheren, rein fossilen Ottokraftstoffen. Der ausführliche Bericht zur Studie, der hier nur in kurzen Auszügen referiert werden kann, steht elektronisch auf den Webseiten der EASA zum allgemeinen Download zur Verfügung [2].

LITERATURHINWEISE

- [1] Ludzay, J.; Terschek, R.: DGMK-Forschungsbericht 645, S. 19f. Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle, 2005
- [2] EASA-Link zum Download der Studie: <http://easa.europa.eu/safety-and-research/research-projects/miscellaneous.php>



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.MTZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
SpringerAutomotive@abo-service.info

Sie wollen sich verändern oder suchen die erste Stelle, dann senden Sie bitte Ihre kompletten Bewerbungsunterlagen an:

tl Engineering GmbH, Schönaustr. 11, 65201 Wiesbaden
bewerbung@tlengineering.de - www.tlengineering.de
 Tel.: 0611-4060616 - Fax: 0611-4060617