

# AUSWIRKUNG VON HVO-KRAFTSTOFFEIGENSCHAFTEN AUF DAS NUTZLAST-REICHWEITEN-VERHALTEN

J. Isfort, N. Nittinger, V. Gollnick

Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) – Institut für Lufttransportsysteme,  
Blohmstraße 18, 21079 Hamburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Durch Veränderungen in der Verfügbarkeit vorhandener Kraftstoffe und den zunehmenden Druck auf die Luftverkehrsgesellschaften trotz steigendem Passagieraufkommen die Umweltauswirkungen zu begrenzen, ist es erforderlich, neben weiteren Effizienzsteigerungen im Flugzeug- und Turbinenbau pro aktiv in neue Treibstoffalternativen für Flugzeuge zu investieren. HVO stellt dabei eine Art von alternativem Kraftstoff dar. Bei seiner Verwendung ist aber auf einige Unterschiede in den Kraftstoffeigenschaften hinzuweisen. Denn neben den Flugzeugeigenschaften haben die Kraftstoffeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf das Nutzlast-Reichweiten-Verhalten von Flugzeugen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher für drei Distanzklassen die Nutzlast-Reichweiten-Diagramme auf Basis von Kerosin, reinem HVO und einem 50/50 Gemisch dieser beiden Kraftstoffarten berechnet und miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass HVO aufgrund seines hohen Heizwertes bei nicht vollgetankten Flugzeugen eine bessere Performance gegenüber Kerosin bietet. Sind die Tanks voll und soll eine sehr hohe Reichweite geflogen werden, ist auf Kerosin zurückzugreifen, da dieser Kraftstoff eine höhere Dichte aufweist als HVO.

## Nomenklatur

### Abkürzungen

|       |   |
|-------|---|
| A/C   | Aircraft  |
| AIREG | Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany |
| ASTM  | American Society for Testing and Materials          |
| CAAFI | Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative    |
| ETS   | Emission Trading System                             |
| EU    | Europäische Union                                   |
| HRJ   | Hydrotreated Renewable Jet                          |
| HVO   | Hydrotreated Vegetable Oil                          |
| SPK   | Synthetic Paraffinic Kerosene                       |
| UN    | United Nations                                      |

### Formelzeichen

|        |                      |                                   |
|--------|----------------------|-----------------------------------|
| $\rho$ | [kg/m <sup>3</sup> ] | Dichte                            |
| GED    | [MJ/kg]              | Gravimetrische Energiedichte      |
| L/D    | [-]                  | Gleitverhältnis                   |
| LCV    | [MJ/kg]              | Unterer Heizwert                  |
| MFC    | [l]                  | Maximale Kraftstoffkapazität      |
| MPL    | [t]                  | Maximale Nutzlast                 |
| MTOW   | [t]                  | Maximales Abfluggewicht           |
| MZFW   | [t]                  | Maximales Gewicht ohne Kraftstoff |
| OEW    | [t]                  | Betriebsleergewicht               |
| P      | [-]                  | Punkt                             |
| PL     | [t]                  | Nutzlast                          |
| R      | [km]                 | Reichweite                        |
| sfc    | [mg/Ns]              | Spezifischer Kraftstoffverbrauch  |
| V      | [m/s]                | Fluggeschwindigkeit               |
| VED    | [GJ/m <sup>3</sup> ] | Volumetrische Energiedichte       |
| W      | [t]                  | Flugzeuggewicht                   |

## Index

|        |                         |
|--------|-------------------------|
| altern | Alternativer Kraftstoff |
| i      | Flugphase               |
| kero   | Kerosin                 |

## 1. EINLEITUNG

Der anthropogene Ausstoß an Treibhausgasen ist in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Aus diesem Grund haben sich die Teilnehmer der 16. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention (UN-Klimakonferenz) im Dezember 2010 im mexikanischen Cancún auf das sog. 2°C-Ziel geeinigt, welches den politischen Willen bekundet, die globale Erwärmung auf maximal 2°C gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung zu begrenzen [1]. In der EU äußert sich dies für den Luftverkehr durch die Integration desselben in den Emissionshandel ab 2012. Dies geschieht zum einen aus der grundsätzlichen Überlegung, dass jeder Emittent seinen Anteil an der Bekämpfung des Klimawandels zu leisten hat. Zum anderen hatte der weltweite zivile Luftverkehr hohe Zuwachsraten innerhalb der letzten Dekaden zu verzeichnen, den es aktuellen Prognosen zu Folge auch in der Zukunft geben wird [2].

Vor diesem Hintergrund ist es für die Luftverkehrsindustrie erforderlich, neben weiteren Effizienzsteigerungen im Flugzeug- und Turbinenbau pro aktiv in neue Treibstoffalternativen für Flugzeuge zu investieren, um sowohl ökologisch als auch ökonomisch auf die aus den genannten politischen Zielsetzungen ableitbaren Herausforderungen und Markterfordernisse vorbereitet zu sein. Neben der Notwendigkeit zur Einführung von Treibstoffalternativen zur Emissionsreduktion ist der absehbar steigende Bedarf an Rohödestillaten und der damit einhergehende zu erwartende mittel- bis langfristige Preisanstieg von Rohöl ein weiterer Grund, sich mit Alternativen zu befassen.

Biokraftstoffe stellen dabei eine Art von alternativem Kraftstoff dar. Sie werden aus forst-, land- oder wasserwirtschaftlich gewonnenen Rohstoffen produziert und anschließend in Flüssigkraftstoffe umgewandelt. Eine Untergruppe der Biokraftstoffe bildet HVO. HVO steht für „Hydrotreated Vegetable Oil“ (hydriertes Pflanzenöl). Üblich sind ebenfalls die Bezeichnungen „Bio-Synthetic-Paraffinic-Kerosene“ (Bio-SPK) oder „Hydrotreated Renewable Jet“ (HRJ). Mittlerweile arbeiten viele Fluggesellschaften auf den Einsatz von HVO hin, denn die Qualität dieses Kraftstoffes ist nahezu identisch zu der von herkömmlichem, auf Erdöl basierendem Kerosin.

Es ist bei der Verwendung von HVO dennoch auf einige Unterschiede in den Kraftstoffeigenschaften hinzuweisen. Denn neben den Flugzeugeigenschaften haben die Kraftstoffeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf das Nutzlast-Reichweiten-Verhalten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für drei Distanzklassen („Kontinental“, „Interkontinental“, „A380“) die Nutzlast-Reichweiten-Diagramme auf Basis von Kerosin, reinem HVO und einem 50/50 Gemisch dieser beiden Kraftstoffarten berechnet und miteinander verglichen.

## 2. KRAFTSTOFFEIGENSCHAFTEN

Die Verwendbarkeit von HVO-Kraftstoffen im Luftverkehr wurde durch eine Vielzahl von Testflügen durch Fluggesellschaften sowie die Zertifizierung durch die ASTM International (ursprünglich „American Society for Testing and Materials“) aufgezeigt. Seit Juli 2011 beinhaltet der Standard ASTM D7566 eine fünfzigprozentige Beimischung von HVO zu Kerosin [3]. Kraftstoffe, die diesem Standard entsprechen, erfüllen gleichzeitig den Standard D1655, welcher herkömmliches Kerosin (Jet A und Jet A-1) beschreibt [4].

Eine Substitution ist also möglich, wenn auch ein Vergleich der Eigenschaften von HVO und Kerosin zeigt, dass die Eigenschaften von Kraftstoffen innerhalb des Standards variieren können (Tabelle 1).

| Kraftstoff | $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] | LCV [MJ/kg] | VED [GJ/m <sup>3</sup> ] |
|------------|-----------------------------|-------------|--------------------------|
| Kerosin    | 775 – 840                   | ≈ 42,8      | 33,2 – 36,0              |
| HVO        | 720 – 753                   | 44,0 – 44,3 | 31,7 – 33,4              |
| 50/50      | 779 - 789                   | 43,5 – 43,7 | 33,9 – 34,5              |

TAB 1. Kraftstoffeigenschaften [5]; [6]

Die Spanne der in Tabelle 1 genannten Daten für HVO ergibt sich aus den unterschiedlichen zur Herstellung des HVO-Kraftstoffes verwendeten Rohstoffen.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass der Heizwert pro Volumeneinheit (volumetrische Energiedichte, VED) bei HVO im Durchschnitt geringfügig kleiner (ca. 5,9%), der Heizwert pro Masseneinheit (gravimetrische Energiedichte, GED) geringfügig größer (ca. 3,2%) ist als bei herkömmlichem Kerosin. Dass die volumetrische Energiedichte trotz etwas größerer gravimetrischer Energiedichte etwas kleiner ist als bei Kerosin, resultiert aus der geringeren Dichte von HVO (durchschnittlich 8,8%). Wird Kerosin mit einem Gemisch aus 50% Kerosin und 50% HVO verglichen, lässt sich feststellen, dass die Werte des Gemischs für Dichte und volumetrische

Energiedichte innerhalb des Wertebereichs von Kerosin liegen. Werden die Mittelwerte der Bereiche gegenübergestellt, können die gleichen Aussagen getroffen werden wie für den Vergleich von Kerosin und HVO, d.h. Dichte und volumetrische Energiedichte sind bei dem Gemisch geringfügig kleiner als bei Kerosin (2,9% bzw. 1,1%). Der Heizwert des Gemischs ist leicht größer als bei Kerosin (ca. 1,9%).

Die gezeigten Unterschiede in den Eigenschaften werden durch die Literatur insofern bestätigt, dass schwere Kraftstoffe meist einen hohen Energieinhalt pro Volumeneinheit aufweisen und leichte Kraftstoffe einen hohen Energieinhalt pro Masseneinheit [7].

## 3. FLUGZEUGEIGENSCHAFTEN

Die zur Berechnung der Nutzlast-Reichweiten-Diagramme herangezogenen Flugzeugeigenschaften sind in Tabelle 2 aufgelistet. Dabei stellen die Werte den Durchschnitt über repräsentative Flugzeugtypen einer Distanzklasse dar. Es werden drei Distanzklassen betrachtet. Die Klasse „Kontinental“ umfasst die Flugzeuge A318, A319, A320, A321 und B737. Die Werte der Klasse „Interkontinental“ ergeben sich aus den Flugzeugeigenschaften der A330, A340, B747, B767 und B777. Der A380 bildet eine eigene Distanzklasse, da seine Eigenschaften zu sehr von den Eigenschaften der anderen Interkontinentalflugzeuge abweichen und somit kein repräsentativer Durchschnitt für diese Klasse entstehen würde.

| A/C Data | Kontinental | Interkontinental | A380    |
|----------|-------------|------------------|---------|
| MFC [l]  | 25.000      | 142.500          | 320.000 |
| MTOW [t] | 72          | 271              | 560     |
| MPL [t]  | 17          | 49               | 91      |
| MZFW [t] | 59          | 187              | 361     |
| OEW [t]  | 42          | 138              | 271     |
| V [m/s]  | 242         | 248              | 263     |
| L/D [-]  | 17,9        | 17,5             | 17,1    |

TAB 2. Flugzeugeigenschaften [7]; [8]; [9]

## 4. FLUGZEUGEIGENSCHAFTEN

Die Abbildung 1 zeigt die markanten Punkte eines Nutzlast-Reichweiten-Diagramms. Angefangen mit der maximalen Nutzlast wird die Reichweite durch Hinzufügen von Kraftstoff erhöht. Dies geschieht bis zu dem Punkt, wo das Flugzeuggewicht das maximale Abfluggewicht erreicht. Um anschließend die Reichweite weiter steigern zu können ohne das maximale Abfluggewicht zu überschreiten, muss die Nutzlast durch Kraftstoff substituiert werden. Dieser Vorgang lässt sich fortsetzen bis das maximal verfügbare Volumen der Kraftstofftanks erreicht ist. Eine weitere Erhöhung der Reichweite ist dann nur noch über eine weitere Reduktion der Nutzlast möglich. Ist die Nutzlast gleich Null, erreicht das Flugzeug seine maximale Reichweite, die sog. Überführungsreichweite.

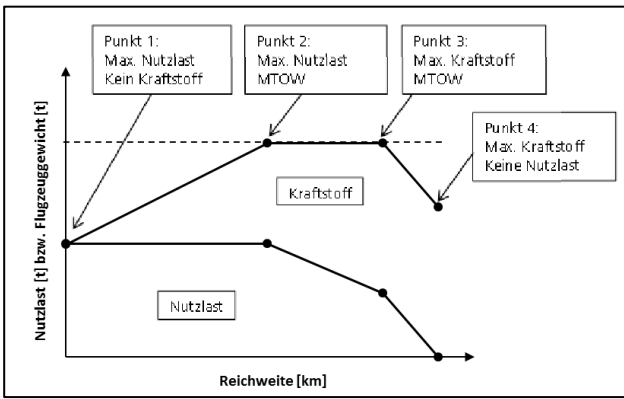


BILD 1. Nutzlast-Reichweiten-Diagramm

Zur Berechnung der einzelnen Eckpunkte wurde die Breguet'sche Reichweitenformel verwendet [10]:

$$(1) \quad R = \frac{v L/D}{sfc} \ln\left(\frac{W_{i-1}}{W_i}\right)$$

Mit der Breguet'sche Reichweitenformel, benannt nach Louis Charles Breguet, kann die Reichweite von motorisierten Flugzeugen berechnet werden. Der errechnete Reichweitenwert ist nur exakt für konstante Flugzeugmasse, konstante Fluggeschwindigkeit, konstante Leistung und konstante Flughöhe. Dennoch liefert sie auf einfache Weise eine grobe Abschätzung, um eine erste Untersuchung der Effekte von Änderungen in Kraftstoffeigenschaften und einen anschließenden Vergleich der Nutzlast-Reichweiten-Diagramme vorzunehmen.

Um HVO Kraftstoffe mit der Breguet'schen Reichweitenformel modellieren zu können, wurde der spezifische Kraftstoffverbrauch für HVO angepasst [7]:

$$(2) \quad sfc_{altern} = sfc_{kero} \frac{LCV_{kero}}{LCV_{altern}}$$

Damit ergeben sich folgende Durchschnittswerte der spezifischen Kraftstoffverbräuche sfc [mg/Ns]:

| Kraftstoff | Kontinental | Interkontinental | A380  |
|------------|-------------|------------------|-------|
| Kerosin    | 17,88       | 17,46            | 17,10 |
| HVO        | 17,33       | 16,93            | 16,58 |
| 50/50      | 17,55       | 17,14            | 16,79 |

TAB 3. Spezifische Kraftstoffverbräuche [7]; [8]; [9]

## 5. ERGEBNISSE

Neben den Flugzeugeigenschaften haben die Kraftstoffeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf das Nutzlast-Reichweiten-Verhalten. Die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Berechnungen sind in Abbildung 2 beispielhaft für die Distanzklasse „Kontinental“ dargestellt.

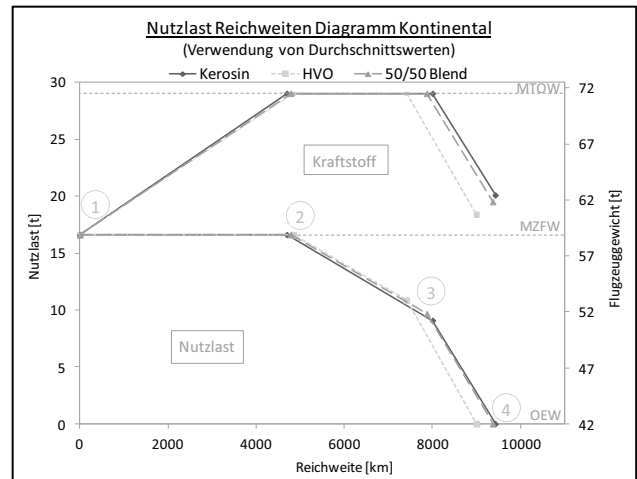


BILD 2. Vgl. der Nutzlast-Reichweiten-Diagramme (Durchschnittswerte)

Zunächst (Punkt 1 – Punkt 2) ist der HVO Kraftstoff dem Kerosin und dem 50/50 Gemisch überlegen, da bei gleicher Nutzlast und gleicher Reichweite eine geringere Kraftstoffmasse getankt werden muss bzw. bei gleicher Kraftstoffmasse eine höhere Reichweite erreicht werden kann. Zwischen Punkt 2 und Punkt 3 bieten HVO Kraftstoffe gegenüber Kerosin eine höhere Reichweite bei gleicher Nutzlast bzw. bei gleicher Reichweite kann mehr Nutzlast mitgenommen werden, da weniger Kraftstoffmasse benötigt wird. Jedoch sind aufgrund der geringeren Dichte die Tanks bei der Verwendung von HVO schneller voll. Ab diesem Zeitpunkt dreht sich die Situation um. Nun bieten Kerosin und das 50/50 Gemisch eine höhere Reichweite bei gleicher Nutzlast bzw. bei gleicher Reichweite kann mehr Nutzlast mitgenommen werden.

Der Graph des 50/50 Gemischs liegt zwischen der Nutzlastkurve für Kerosin und HVO. Ein Vergleich mit Kerosin ergibt im Prinzip die gleichen Schlussfolgerungen wie für HVO. Zusätzlich ist anzumerken, dass zwischen den Punkten 1 und 3 die Kurve des Gemischs näher an der HVO Kurve liegt während sie sich zwischen Punkt 3 und Punkt 4 nah bei der Kerosinkurve befindet. Der Grund dafür ist, dass das Gemisch einen ähnlich erhöhten Heizwert aufweist wie HVO, aber die gleiche Dichte besitzt wie Kerosin.

Ein quantitativer Vergleich der Reichweitenunterschiede in den Punkten 2 bis 4 von HVO bzw. dem 50/50 Gemisch in Relation zu Kerosin ist in Tabelle 4 angegeben:

| Distanzklasse    | R in | HVO [%] | 50/50 [%] |
|------------------|------|---------|-----------|
| Kontinental      | P2   | 3,15    | 1,87      |
|                  | P3   | -7,42   | -1,63     |
|                  | P4   | -4,47   | -0,60     |
| Interkontinental | P2   | 3,15    | 1,87      |
|                  | P3   | -8,57   | -2,04     |
|                  | P4   | -3,79   | -0,37     |
| A380             | P2   | 3,15    | 1,87      |
|                  | P3   | -8,95   | -2,18     |
|                  | P4   | -3,60   | -0,31     |

TAB 4. Reichweitendifferenz in Relation zu Kerosin

Die obigen Ergebnisse für Kerosin, HVO und 50/50 Gemisch beruhen auf Durchschnittswerten der Dichte und des Heizwertes. Werden diese Werte variiert, so können sich die Ergebnisse durchaus anders darstellen.

Allgemein kann gesagt werden, dass eine Erhöhung des Heizwertes die Kurve zwischen Punkt 2 und Punkt 4 zu größeren Reichweiten verschiebt. Dies liegt an der linearen Beziehung zwischen Heizwert und Reichweite (s. Formel 1 und 2). Wird der Heizwert also um 5% erhöht, steigt die Reichweite ebenfalls um 5%.

Die Dichte hat nur einen Einfluss auf die Punkte 3 und 4. Wird die Dichte erhöht, so hat dies einen positiven Effekt auf die volumetrische Energiedichte, wodurch sich die Punkte 3 und 4 zu größeren Reichweiten verschieben. Zudem steigt auch die Kraftstoffmasse, weshalb bei vollen Tanks und maximalem Startgewicht weniger Nutzlast mitgenommen werden kann. Dies wird im Nutzlast-Reichweiten-Diagramm durch eine Verschiebung des Punktes 3 zu kleineren Nutzlasten deutlich. Abbildung 3 veranschaulicht dieses Prinzip.

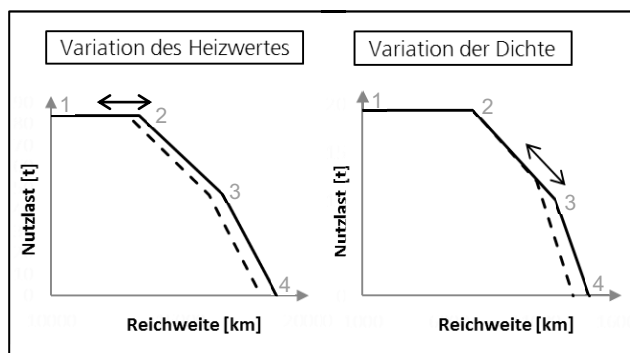


BILD 3. Variation von Heizwert und Dichte

Tabelle 5 zeigt beispielhaft die quantitative Veränderung der Nutzlast (PL) und der Reichweite (R) in Punkt 3 (P3) und Punkt 4 (P4) bei einer Erhöhung der Dichte um 5%:

| Distanz          |        | Kerosin [%] | HVO [%] | 50/50 [%] |
|------------------|--------|-------------|---------|-----------|
| Kontinental      | PL(P3) | -11,10      | -8,47   | -10,12    |
|                  | R(P3)  | 5,99        | 5,87    | 5,95      |
|                  | R(P4)  | 4,11        | 4,17    | 4,13      |
| Interkontinental | PL(P3) | -31,45      | -18,47  | -25,81    |
|                  | R(P3)  | 6,80        | 6,55    | 6,71      |
|                  | R(P4)  | 3,71        | 3,78    | 3,73      |
| A380             | PL(P3) | -41,54      | -21,90  | -32,48    |
|                  | R(P3)  | 7,08        | 6,78    | 6,97      |
|                  | R(P4)  | 3,60        | 3,67    | 3,62      |

TAB 5. Nutzlast- und Reichweitenveränderung bei einer Erhöhung der Dichte um 5%

Ein Vergleich der prozentualen Reichweitenänderung bei Variation des Heizwertes und der Dichte lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Wahl der zu verändernden Ausgangsgröße abhängig ist von dem Punkt, an dem die Reichweite erhöht werden soll. Ist das Ziel, die Reichweite in Punkt 2 zu vergrößern, so sollte der Heizwert erhöht werden, da die Dichte auf diesen Punkt keinen Einfluss hat. Soll aber die Reichweite in Punkt 3 gesteigert werden, ist es sinnvoller eine höhere Dichte zu wählen, da diese

auf Punkt 3 einen größeren Einfluss hat als der Heizwert.

Werden die Ausgangswerte nur innerhalb des zugelassenen Wertebereichs (Kerosin, 50/50 Gemisch) bzw. innerhalb der bislang erforschten Kraftstoffeigenschaften (HVO) variiert, zeigt sich, dass die Ergebnisse hauptsächlich durch die Dichte des Kraftstoffes beeinflusst werden. Die Variation des Heizwertes zeigt kaum einen Effekt. Dies liegt vor allem daran, dass die Spannweite der Dichte größer ist als die des Heizwertes. So schwanken beispielsweise die Dichteigenschaften von HVO bis zu 2,24% um den Mittelwert, wohingegen der Heizwert nur eine Schwankung von 0,34% aufweist.

Insgesamt lässt sich schließen, dass sowohl ein hoher Heizwert als auch eine hohe Dichte die Nutzlast-Reichweiten-Performance eines Flugzeugs verbessern.

Nimmt man also bei der Berechnung der Nutzlast-Reichweiten-Diagramme statt den Durchschnittswerten Extremwerte an, wie z.B. die minimale Dichte für Kerosin sowie die maximale Dichte und den maximalen Heizwert für HVO, so zeigt sich, dass HVO Kraftstoffe auch eine durchweg (Punkt 1 bis 4) bessere Performance bieten können als Kerosin (Abbildung 4).

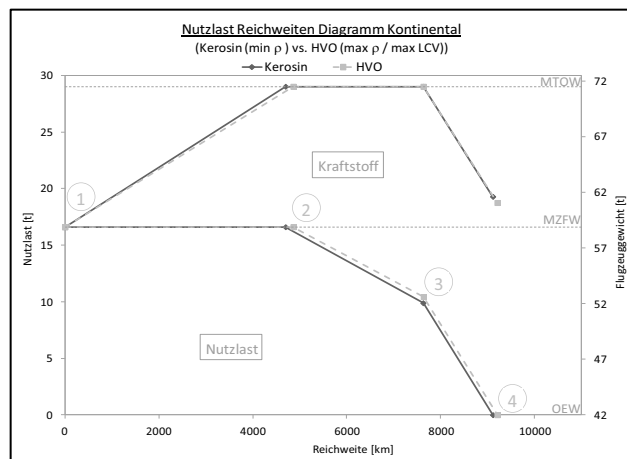


BILD 4. Vgl. der Nutzlast-Reichweiten-Diagramme (Extremwerte)

Die Reichweitenunterschiede zwischen Kerosin und HVO in den Punkten 2, 3 und 4 betragen 3,5%, 0,05% und 1,06%.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung hat gezeigt, dass für Flüge, bei denen keine vollen Kraftstofftanks benötigt werden (Punkt 1 bis 3 im Nutzlast-Reichweiten-Diagramm), ein hoher Heizwert besonders vorteilhaft ist. Aus diesem Grund bieten HVO Kraftstoffe in diesem Bereich eine bessere Performance gegenüber Kerosin. Dieser Vorteil äußert sich durch einen geringeren Kraftstoffverbrauch bei gleicher Reichweite und Nutzlast im Vergleich zu Kerosin. Das heißt auch, dass bei gleicher Reichweite und gleicher Masse an Kraftstoff mehr Nutzlast mitgenommen werden kann bzw. bei gleicher Nutzlast und gleicher Kraftstoffmasse, eine höhere Reichweite erreicht werden kann.

Sind die Tanks voll und soll eine sehr hohe Reichweite geflogen werden, ist auf Kerosin zurückzugreifen, da

dieser Kraftstoff eine höhere Dichte aufweist als HVO.

In der kommerziellen Luftfahrt wird jedoch in der Regel nicht mit vollen Tanks operiert. Bei den betrachteten Flugzeugen der Distanzklasse „Kontinental“ liegen beispielsweise 99,91% aller im Juni 2011 geflogenen Flugstrecken im ersten Segment des Nutzlast-Reichweiten-Diagramms (Abbildung 5).

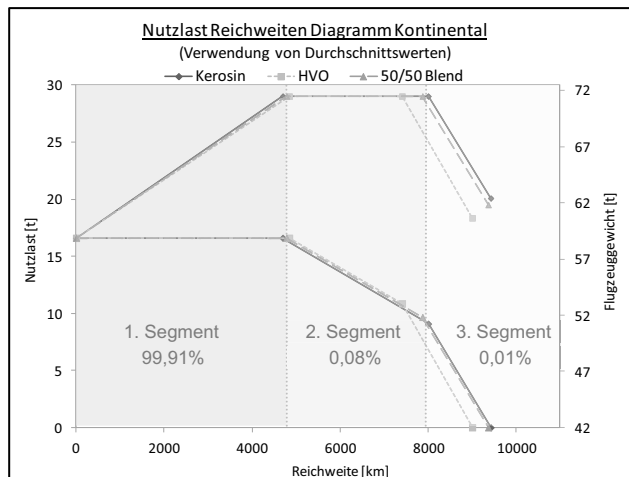


BILD 5. Anteil der Flüge in einem Reichweitensegment

Für die Distanzklassen „Interkontinental“ und „A380“ zeigt sich ein ähnliches Bild. Dort werden 91,23% bzw. 93,12% aller im Juni 2011 durchgeführten Flüge im ersten Segment des Nutzlast-Reichweiten-Diagramms (Punkt 1 bis 2) geflogen [11]. Aus dem Grund stellt nicht eine Erhöhung der Dichte sondern eine Erhöhung des Heizwertes in diesem Zusammenhang den relevanteren Wert dar.

Das Gemisch aus 50% Kerosin und 50% HVO bietet eine gute Allzwecklösung. Es besitzt sowohl einen hohen Heizwert als auch eine hohe Dichte, weshalb große Reichweiten erlangt werden können bei gleichzeitig geringerem Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu Kerosin. Zudem wurde das 50/50 Gemisch im Gegensatz zu reinem HVO bereits durch die ASTM zertifiziert und für den Luftverkehr zugelassen [3][4].

## 7. AUSBLICK

Insgesamt lassen die Ergebnisse vermuten, dass es für jeden operativen Anwendungsfall ein optimales Gemisch aus Kerosin und HVO Kraftstoff gibt. Die sich daraus ergebene Bedarfsmenge an HVO lässt sich auf Basis der Nutzlast-Reichweiten-Untersuchung abschätzen. Aufgrund der großen Anzahl an Missionen, die im ersten Segment des Nutzlast-Reichweiten-Diagramms liegen, ist von einem hohen Anteil von HVO am Gesamtreibstoffbedarf auszugehen.

Diesem Bedarf steht jedoch die Frage der Verfügbarkeit von HVO gegenüber. Die wesentlichen Einschränkungen für die zukünftige Verwendung von HVO und weiterer alternativer Kraftstoffe liegen nicht im operativen Flugbetrieb, sondern vielmehr in der ausreichenden Verfügbarkeit nachhaltiger Rohstoffe, der Skalierung der Produktion und der damit zu erreichenden ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit gegenüber herkömmlichen Jet A-1 [12]. Des Weiteren sind logistische und regulatorische

Aspekte zu berücksichtigen, beispielsweise bei der Einspeisung von HVO in die vorhandene Kraftstoffinfrastruktur sowie der Anrechnung im EU ETS-System.

Der zukünftige Forschungsschwerpunkt im Anschluss an diese Untersuchung wird darin liegen, auf der einen Seite den Bedarf der Fluggesellschaften abzuschätzen, sowie andererseits die quantitative, preisliche und zeitliche Verfügbarkeit verschiedener Biokraftstoffe und Rohstoffe unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien zu untersuchen.

Anschließend sollte eine Aussage darüber getroffen werden können, in welchem Zeitraum und Umfang eine Einführung für die Fluggesellschaften ökonomisch machbar ist.

Diese Forschungsansätze werden bereits durch verschiedene Organisationen aufgegriffen, beispielhaft seien hier die CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative), sowie die AIREG (Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany) genannt.

## 8. REFERENZEN

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Weltklimakonferenz in Cancún, 2010
- [2] International Civil Aviation Organization  
»ICAO Medium-Term Forecast Points to Continued Industry Growth through 2013«  
ICAO News Release, 2011
- [3] ASTM International  
ASTM D7566 - 11a Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, 2011
- [4] ASTM International  
ASTM D1655 - 11b Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, 2011
- [5] Kinder, J. D.; Rahmes, T.  
»Evaluation of Bio-Derived Synthetic Paraffinic Kerosene (Bio-SPK)«, SAFUG, 2009
- [6] Buse, J.  
»Biokraftstoffe im Luftverkehr – Aktivitäten der Lufthansa«, Vortrag an der TUHH, Hamburg, 2011
- [7] Blakey, S. et al.  
»Fuel effects on range versus payload for modern jet aircraft«, The Aeronautical Journal, 2011
- [8] Airbus S. A. S.  
<http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/>
- [9] Boeing Company  
<http://www.boeing.com/commercial/products.html>
- [10] Raymer, D.P.  
»Aircraft Design: A Conceptual Approach«  
4th edition, AIAA, Virginia, USA, 2006
- [11] Sabre Inc.  
Sabre Airline Solutions - Airport Data Intelligence
- [12] European Commission  
»2 million tons per year: A performing biofuels supply chain for EU aviation«, Technical Paper, 2011