

Fluggeschwindigkeit

In der Aviatik sind verschiedene Bezugssysteme relevant für die Fluggeschwindigkeit. Daher werden die folgenden Fluggeschwindigkeiten unterschieden: IAS, CAS, EAS, TAS, GS, Mach Number.

Geschwindigkeiten beziehen sich immer auf etwas. Wenn nicht explizit ein Bezugssystem angegeben wird, ist meist die Erdoberfläche als Bezugssystem gemeint (z.B. Geschwindigkeit eines Fahrzeugs bezüglich der Erdoberfläche). Weil in der Aviatik verschiedene Bezugssysteme relevant sind, werden auch verschiedene Fluggeschwindigkeiten unterschieden. Für Piloten sind die folgenden Fluggeschwindigkeiten von Bedeutung:

- IAS/CAS** **Indicated/Calibrated Air Speed:** Geschwindigkeit bezogen auf den Staudruck
- Mach** **Mach Speed:** Geschwindigkeit bezüglich der Schallgeschwindigkeit
- TAS** **True Air Speed:** (echte) Geschwindigkeit bezüglich der umgebenden Luft
- GS** **Ground Speed:** Geschwindigkeit bezüglich der Erdoberfläche



Geschwindigkeiten auf dem PFD und dem ND

Bei Flugzeugen ohne Bordcomputer wird zwischen IAS und CAS unterschieden. IAS ist die direkt mit einem Staurohr gemessene Fluggeschwindigkeit, die mit Einbau- und Instrumentenfehlern behaftet ist und je nach Fluglage und Konfiguration z.T. erhebliche Messfehler aufweisen kann. Bordcomputer von Airlines kennen diese Fehler genau und können die Messwerte vor der Anzeige entsprechend korrigieren. Bei Airlines wird also immer die Calibrated Air Speed CAS angezeigt. Man spricht aber trotzdem oft von Indicated Air Speed IAS. Bei Airlines gilt: IAS = CAS.

Die bei Flugzeugkonstruktoren noch verwendete **Equivalent Air Speed (EAS)** hat für Piloten keine Bedeutung und soll an dieser Stelle nur kurz erwähnt werden. EAS ist die Geschwindigkeit bezogen auf einen idealisierten Staudruck, wie er in einer nicht komprimierbaren Atmosphäre entstehen

würde.

Bei Kenntnis der Parameter wie Luftdichte, Temperatur, Kompressibilität der Luft, Windgeschwindigkeit und Windrichtung können die verschiedenen Geschwindigkeiten in einander umgerechnet werden. Auf diese Weise können die Bordcomputer aus Staudruck, statischem Luftdruck, Temperatur und Ground Speed (via Navigation ermittelt) die Geschwindigkeiten IAS/CAS, Mach, TAS und Wind ausrechnen und anzeigen.

Eigentlich könnte man erwarten, dass die True Airspeed (TAS) die einzige oder wichtigste Geschwindigkeit ist. Diese Geschwindigkeit wird schliesslich in physikalischen Berechnungen hauptsächlich verwendet. Nun ist es aber so, dass Auftrieb und Strukturbelastung nicht nur von der TAS abhängig sind, sondern auch von der Luftdichte, die mit der Höhe abnimmt, von der Kompressibilität der Luft, die sich bei hohen Geschwindigkeiten bemerkbar macht und von Eigenschaften der Luft, die sich bei Schallgeschwindigkeiten zeigen. Die kritischen Geschwindigkeiten für Stall (Strömungsabriss = Auftriebsverlust) und Strukturüberlastung würden sich bei einer TAS-Anzeige je nach Flughöhe ständig ändern.

Daher eignet sich als Haupt-Geschwindigkeitswert die Indicated bzw. Calibrated Air Speed (IAS/CAS) besser, die sich auf den Staudruck bezieht. Vor dem fliegenden Flugzeug wird die Luft gestaut und verdrängt. Mit einer Pitot-Sonde kann dieser Staudruck gemessen werden. Dieser Staudruck hängt von der Geschwindigkeit bezüglich der Luft (TAS), der Luftdichte und der Kompressibilität der Luft ab. Der Staudruck ist ein direktes Mass für die aerodynamischen Kräfte wie Auftrieb, Luftwiderstand und Strukturbelastung. Daher werden die kritischen Geschwindigkeiten in IAS bzw. CAS angegeben. Die kritischen Geschwindigkeiten in IAS/CAS ausgedrückt bleiben über den ganzen Flugbereich konstant und sind nicht abhängig von der Flughöhe oder Eigenschaften der Luft.

Die IAS Geschwindigkeitsanzeige ist also ein Staudruck-Messgerät. Die Anzeige wird aber so beschriftet (geeicht), dass nicht der Staudruck angezeigt wird, sondern jene Geschwindigkeit, bei welcher der entsprechende Staudruck auf Meereshöhe und Standardatmosphäre entsteht. So ist die angezeigte Geschwindigkeit IAS ein Mass für die aerodynamischen Kräfte und stimmt zudem auf Meereshöhe und Standardatmosphäre (und nur dort) genau mit der True Air Speed TAS überein.

Je höher das Flugzeug steigt, umso dünner wird die Luft. Staudruck, IAS und Auftrieb würden daher bei gleichbleibender TAS kleiner. Um das zu kompensieren, muss das Flugzeug die TAS mit der Flughöhe entsprechend erhöhen. Und zwar genau so viel, dass eine bestimmte IAS eingehalten wird und somit der Auftrieb bei gleicher Fluglage konstant bleibt.

Der Auftrieb ist auch vom Anstellwinkel (Angle of Attack AOA) und den Flaps abhängig. Je mehr das Flugzeug die Nase hebt oder je mehr die Flaps ausgefahren werden, umso stärker wird der Auftrieb. Bei einem bestimmten Setting (Winkel, Flaps) ist der Auftrieb jedoch nur von der IAS abhängig, nicht jedoch von der Flughöhe: Konstante IAS bei gleichem Setting = konstanter Auftrieb.

Fassen wir nochmal zusammen:

Die angezeigte Geschwindigkeit IAS wird über den Staudruck gemessen. Der Staudruck ist

ein Mass für den Auftrieb. Somit ist auch die IAS ein Mass für den Auftrieb. Bei einer bestimmten angezeigten IAS und einer bestimmten Fluglage (Anstellwinkel, Flaps) hat also das Flugzeug immer den selben Auftrieb, egal in welcher Höhe! Daher werden kritische Geschwindigkeiten immer in IAS (bzw. CAS) angegeben. Der Pilot muss nur darauf achten, dass die angezeigte Geschwindigkeit IAS nie unter einen bestimmten kritischen Wert fällt, dann kann er sicher sein, dass das Flugzeug genügend Auftrieb hat, egal in welcher Höhe er fliegt und egal wie schnell sich das Flugzeug effektiv durch die Luft fortbewegt!

Geschwindigkeits-Grenzwerte

Es gibt drei Grenzggeschwindigkeiten, die im Fluge nicht über- oder unterschritten werden dürfen:

Stall-Speed V_S

minimale IAS-Geschwindigkeit für sicheren Flug mit ausreichend Auftrieb und Reserve für gute Manövrierbarkeit auch bei Triebwerksausfällen (z.B. Stall-Speed = 140 kts).

IAS-Limit V_{MO}

maximale IAS-Geschwindigkeit, damit keine strukturelle Überlastung entsteht (z.B. IAS-Limit = 340 kts).

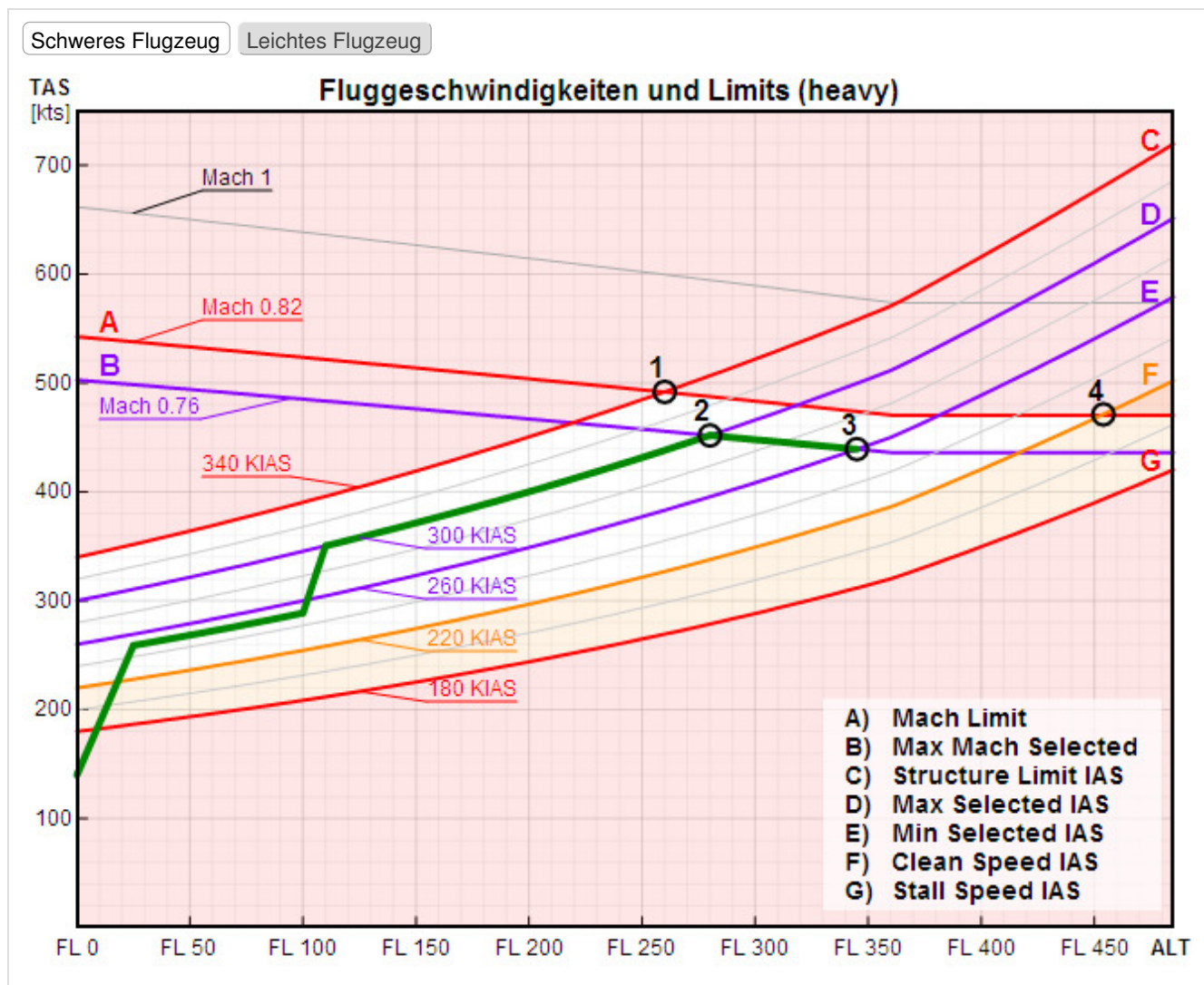
Mach-Limit M_{MO}

maximale Fluggeschwindigkeit bezogen auf die Schallgeschwindigkeit, bei der die Strömung auf der Flügeloberseite noch unterhalb der Schallgeschwindigkeit bleibt. Erreicht die Strömung über dem Flügel Schallgeschwindigkeit, entstehen Stosswellen und die Strömung beginnt sich vom Flügel abzulösen, was zu einem Auftriebsverlust und einer Verschiebung des Auftriebsschwerpunktes führt. Da die Strömungsgeschwindigkeit auf der Flügeloberseite deutlich grösser ist als die Fluggeschwindigkeit, muss die Mach-Limit entsprechend unterhalb der Schallgeschwindigkeit angesetzt werden, damit die Strömung über dem Flügel in einem ungefährlichen Bereich bleibt (z.B. M_{MO} = Mach 0.8).

Die IAS-Limits sind nicht von der Flughöhe abhängig, jedoch die Mach-Limit schon. Der benötigte Auftrieb wird durch das Gewicht des Flugzeugs vorgegeben und kann sowohl durch die Geschwindigkeit als auch durch den Anstellwinkel beeinflusst werden. Ein maximaler Anstellwinkel kann jedoch nicht überschritten werden, weil sonst die Strömung abreisst (Stall). Für genügend Auftrieb in diesem Grenzfall darf die Stall-Speed nicht unterschritten werden. Diese Stall-Speed ist also vom Gewicht des Flugzeugs abhängig. Je höher das Gewicht, umso höher die Stall-Speed. Auch die anderen Limits sind vom Gewicht abhängig, jedoch nur wenig.

Diese Limits werden automatisch vom Flight Management System (FMS) aufgrund des aktuellen Gewichtes und der Settings (Flaps, Gears, AOA) laufend berechnet und als deutlich sichtbare Markierungen auf der IAS-Anzeige angezeigt (in Glas-Cockpits). Bei modernen Flugzeugen wie dem Airbus verhindert das FMS, dass der Pilot diese Limits überschreiten kann, indem das System die Steuereingaben des Piloten überwacht und notfalls korrigiert.

Die folgende Grafik macht den Zusammenhang der verschiedenen Geschwindigkeiten TAS, IAS und Mach und der Limits deutlich. Grün eingezeichnet ist ein typischer Geschwindigkeits-Verlauf eines Fluges:



- Punkt (1) und (2): Cross-Over Speed: ab dieser Höhe (ca. 27'000 Fuss) wird von Knoten auf Mach Geschwindigkeit umgeschaltet, weil oberhalb dieser Höhe die Mach-Limit zum relevanten Grenzwert wird.
- Punkt (3): optimale Flughöhe
- Punkt (4): Coffin-Corner (Sarg-Ecke): Dies ist ein tödlicher Flugbereich. Wird man nur etwas zu schnell reist die Strömung ab, weil sich die Luft oberhalb des Flügels wegen Überschalleffekten ablöst. Wird man nur etwas zu langsam reicht der Auftrieb nicht mehr zum Fliegen.

Geschwindigkeiten für die Navigation

Für das sichere Fliegen sind also vor allem die IAS- und Mach-Geschwindigkeiten von Bedeutung. Für die Navigation hingegen muss man wissen, wie schnell man sich gegenüber dem Boden bewegt (Ground Speed GS). Diese wird per Funknavigation (z.B. GPS) und Trägheitsnavigation vom Bordcomputer ermittelt. Durch das Messen des Staudrucks, des Luftdrucks und der Temperatur kann

man neben IAS auch die True Airspeed TAS berechnen, also wie schnell sich das Flugzeug effektiv durch die Luft bewegt.

Bei Windstille entspricht die TAS gerade der Ground Speed GS. Mit Rückenwind vergrößert sich bei gleicher TAS die zurückgelegte Strecke pro Zeit über dem Boden, die GS nimmt zu. Umgekehrt bei Gegenwind. Kennt man die TAS und die GS lassen sich daraus auch die Windstärke und Windrichtung berechnen. Diese Angaben sind bei Start und Landung wichtig.

In modernen Flugzeugen werden alle diese Geschwindigkeiten angezeigt (IAS, Mach, TAS, GS, Wind). Für das sichere Fliegen ist unterhalb ca. 27'000 Fuss nur die IAS von Bedeutung, oberhalb 27'000 Fuss muss die Mach-Limite beachtet werden. Für die Navigation ist die GS wichtig. Bei Start und Landung muss man zudem den Wind berücksichtigen.

FAR Regeln

Die Federal Aviation Regulation (FAR 25) schreiben folgende Geschwindigkeiten und Höhen bei Start und Landung vor:

- V_{lof} : Das Flugzeug sollte abheben (lift off) bei 10% der Stall Speed oder darüber.
- V_2 : Die anfängliche Steiggeschwindigkeit (initially climb) sollte 20% über der Stall Speed liegen.
- V_{app} : Die Geschwindigkeit bei einem normalen Anflug (regular approach) sollte 30% über der Stall Speed liegen.
- Beim Takeoff sollte das Flugzeug ein imaginäres Hindernis von 11 m; 35 ft Höhe am Ende der Startbahn überfliegen können.
- Bei der Landung sollte das Flugzeug die Schwelle der Landebahn in einer Höhe von 15 m; 50 ft überfliegen.

Diese Vorschriften sind nötig um korrekte Start- und Landedistanzen abschätzen zu können und damit die mindestens nötige Länge der Piste zu bestimmen.