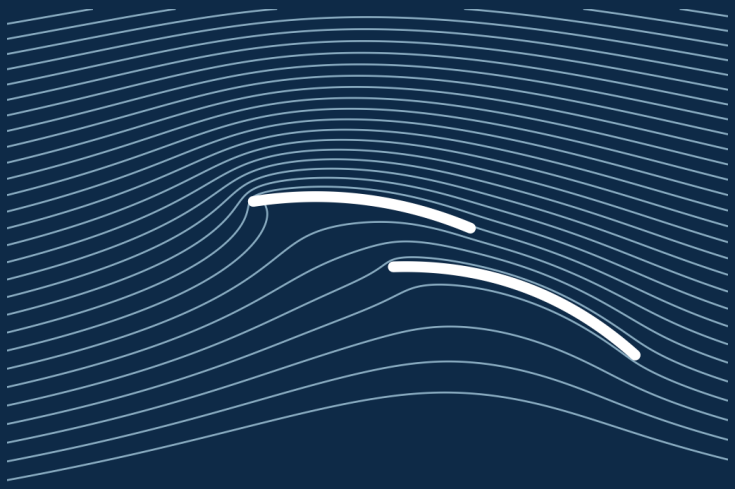
SEGELTHEORIE · AERODYNAMIK

# Wie ein Segel wirklich zieht

Auftrieb, Vorsegel und Großsegel nach dem heutigen Stand der Forschung



**Düseneffekt · Umlenkung · Killen und Abriss**

Ein Fachbeitrag der SegelnAG – Ergänzung zu Lektion 6, mit berechneten Strömungsbildern

**SegelnAG®**

Fachbeitrag · Stand November 2026

# Inhalt


1 Worum es geht ... 3

2 Was in älteren Unterlagen steht ... 3

3 Was am Segel tatsächlich passiert ... 4

4 Vorsegel und Groß: kein Düseneffekt ... 6

5 Segel und Flugzeugflügel: verwandt, aber nicht gleich ... 8

6 Killen, Abriss, Anstellwinkel ... 9

7 Fazit und neuer Text für Lektion 6 ... 10

8 Quellen und weiterführende Literatur ... 11


**AUF EINEN BLICK**

- Ein Segel zieht, weil es die Luft **umlenkt**. Der Druckunterschied zwischen Luv und Lee ist die Kraft, die dabei auf das Tuch wirkt.
- Das Vorsegel **bremst** die Luft im Spalt zum Groß – es gibt keine Düse. Genau das schützt das Groß vor dem Abriss.
- Das Groß verbessert umgekehrt die Anströmung der Fock und lässt die Luft an ihrem Achterliek schneller abfließen.
- **Killen** = Anstellwinkel zu klein. **Abriss** = Anstellwinkel zu groß. Zwei entgegengesetzte Fehler.

© SegelnAG® · Stand 2026

FACHBEITRAG

# Wie ein Segel wirklich zieht

Ein Fachbeitrag der SegelnAG – Ergänzung zu Lektion 6 „Stabilität und Aerodynamik“

## 1 Worum es geht

Wie ein Segel Vortrieb erzeugt, wird bis heute oft mit Bildern erklärt, die vor Jahrzehnten aus der Flugzeugliteratur übernommen wurden: der Düseneffekt zwischen Vorsegel und Groß, das Segel als senkrecht gestellter Flügel, das Papier-Experiment. Solche Formulierungen finden sich in vielen Segelbüchern und Kursunterlagen – auch in unserer Lektion 6.

Wir haben dazu die Fachliteratur gesichtet und verschiedene Darstellungen miteinander verglichen. Das Ergebnis: Einige dieser verbreiteten Erklärungen entsprechen nicht mehr dem Stand der Forschung.

Dieser Beitrag fasst den heutigen Kenntnisstand zusammen und ersetzt die betreffenden Passagen der Lektion. Er stützt sich auf die Arbeiten des Aerodynamikers Arvel Gentry, auf C. A. Marchaj und auf die heutige Lehrbuch-Aerodynamik.

## 2 Was in älteren Unterlagen steht

Die folgenden Aussagen standen so oder sinngemäß in Lektion 6. Sie finden sich in vielen Segelbüchern, Kursunterlagen und Videos.

| Alte Aussage | Was stimmt | Bewertung |
|---|---|---|
| Zwischen Vorsegel und Groß entsteht eine Düse, die die Luft beschleunigt und das Groß stärker ziehen lässt. | Das Vorsegel **bremst** die Luft auf der Leeseite des Großsegels. Genau das schützt das Groß vor dem Abriss. | Falsch |
| Ein Segel funktioniert wie ein Flugzeugflügel, nur senkrecht gestellt. | Beide erzeugen Kraft durch Umlenkung der Strömung. Ein Segel ist aber eine dünne, flexible Haut ohne Dicke und ohne Verdrängung; sein Verhalten unterscheidet sich deutlich. | Zu stark vereinfacht |
| Die Luft muss oben schneller strömen, weil sie einen längeren Weg hat. | Es gibt keine Regel, nach der beide Luftteilchen gleichzeitig an der Hinterkante ankommen. Beim Segel sind beide Wege praktisch gleich lang – trotzdem zieht es. | Falsch |
| Über ein Blatt Papier blasen zeigt den Bernoulli-Effekt. | Der Luftstrahl hat Umgebungsdruck. Das Blatt hebt sich, weil der Strahl an der gewölbten Fläche umgelenkt wird. Ein Segel wird außerdem immer **beidseitig** angeströmt. | Irreführend |
| Ideal ist eine laminare Strömung; Turbulenz lässt das Segel killen. | Am Segel ist die Grenzschicht überwiegend turbulent, und das ist normal. Entscheidend ist, ob die Strömung **anliegt** oder **abreißt**. Killen hat eine ganz andere Ursache. | Falsch |
| Zu großer Anstellwinkel → Abriss → Segel killt. | Zu **kleiner** Anstellwinkel → Druck beidseitig gleich → Segel killt. Zu **großer** Anstellwinkel → Abriss → Segel steht voll, zieht aber schlecht. | Vertauscht |

Die Ursache dieser Irrtümer ist bekannt. Gentry zeigt, dass die Düsen-Erklärung aus einer frühen Beschreibung des Vorflügels (Spaltflügel) an Flugzeugtragflächen übernommen wurde. Marchaj merkt fair an: Die Irrtümer gaben den Wissensstand ihrer Zeit getreu wieder. Sie sind heute aber widerlegt.

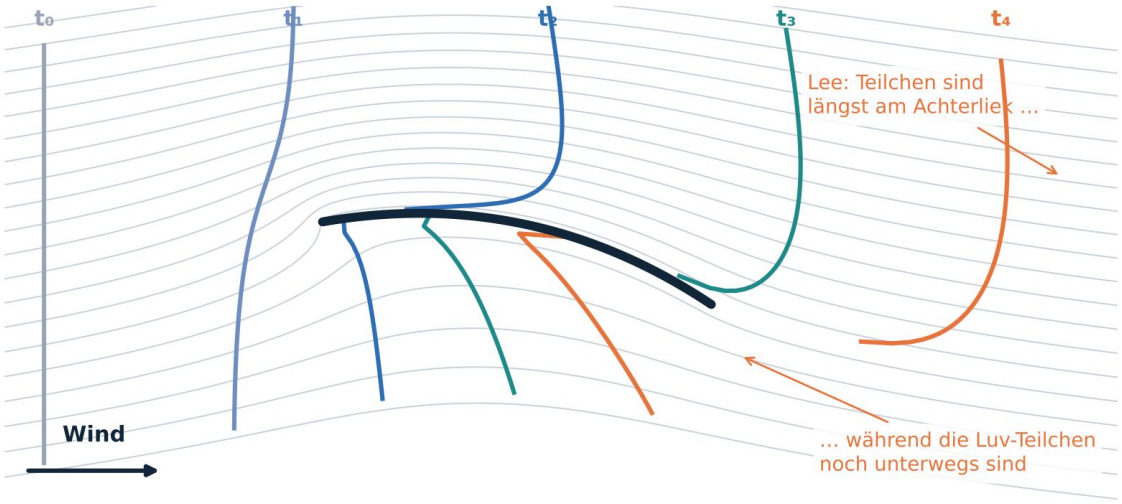



**Abb. 1** *Keine „gleiche Laufzeit". Luftteilchen werden zur Zeit $t_0$ auf einer Linie losgeschickt; die farbigen Linien zeigen, wo sie zu den Zeiten $t_1$ bis $t_4$ sind. Die Teilchen in Lee sind längst hinter dem Achterliek, wenn die Teilchen in Luv noch am Segel entlangziehen. Sie treffen sich nie wieder.*

## 3 Was am Segel tatsächlich passiert

**Das Segel lenkt die Luft um.** Die Luft kommt schräg von vorn und verlässt das Achterliek in einer anderen Richtung. Um sie umzulenken, muss das Segel eine Kraft auf die Luft ausüben. Die Luft drückt mit derselben Kraft zurück auf das Segel. Das ist Newtons drittes Gesetz, und es ist der Kern der Sache.

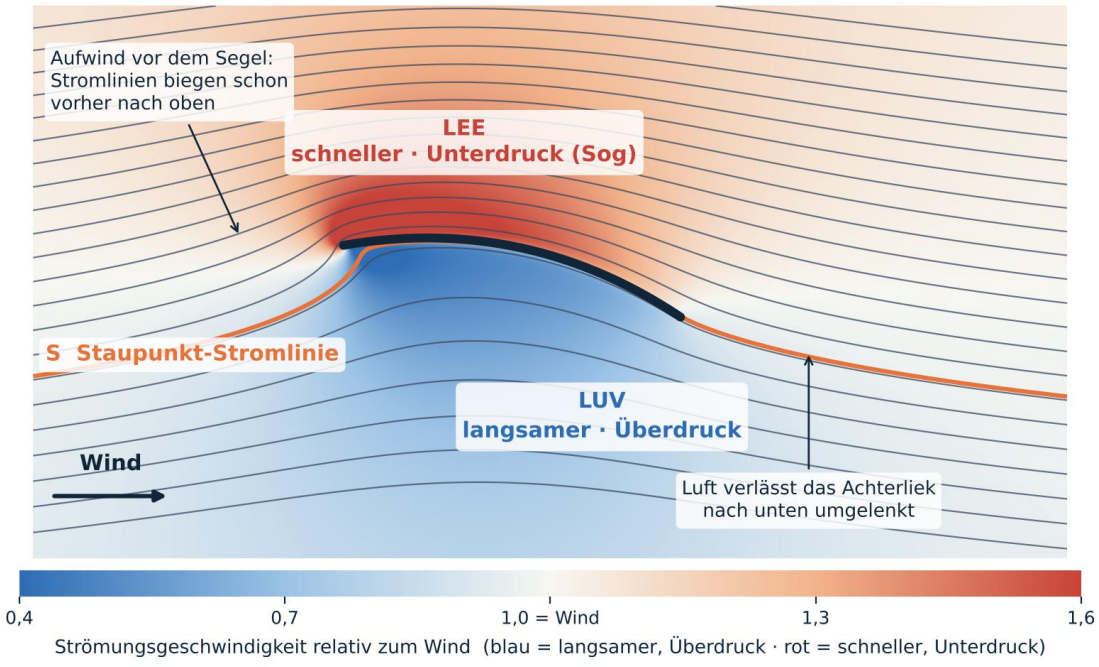



**Abb. 2** *Strömung um ein einzelnes Segel. Farbe = Geschwindigkeit relativ zum Wind. Die Luft wird schon vor dem Segel angehoben (Aufwind) und verlässt das Achterliek nach unten umgelenkt. Die orange Staupunkt-Stromlinie S trennt die Luft in Lee von der Luft in Luv. Alle Strömungsbilder in diesem Beitrag sind berechnet, nicht gezeichnet: mit einem Wirbel-Panelverfahren für reibungsfreie Strömung mit Kutta-Bedingung, demselben Verfahrenstyp, den Gentry verwendet hat.*

**Umlenkung erzeugt Druckunterschiede.** Eine Strömung läuft nur dann auf einer Kurve, wenn zur Innenseite der Kurve ein Druckgefälle wirkt. Auf der Leeseite biegt sich die Strömung um das gewölbte Segel, also herrscht dort

Unterdruck (Sog). Auf der Luvseite wird die Luft gestaut und umgelenkt, dort herrscht leichter Überdruck. Schon Manfred Curry hat 1925 gemessen, dass der Sog in Lee drei- bis viermal so stark ist wie der Druck in Luv.

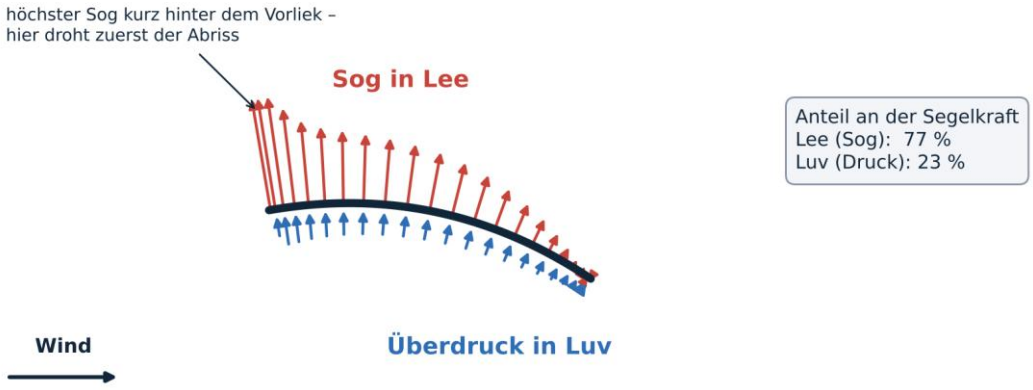



**Abb. 3** *Druckverteilung am selben Segel. Rote Pfeile: Sog in Lee, blaue Pfeile: Überdruck in Luv, Pfeillänge = Stärke. In dieser Rechnung liefert der Sog rund drei Viertel der Segelkraft – passend zu Currys Messung.*

**Das sind keine zwei Theorien, sondern zwei Seiten derselben Sache.** „Das Segel lenkt Luft um“ und „auf beiden Seiten herrscht unterschiedlicher Druck“ beschreiben denselben Vorgang. Die Kraft wirkt über den Druck auf das Tuch. Die Umlenkung der Luft ist die Gegenreaktion dazu.

> **MERKE**
>
> **Und Bernoulli?** Die Bernoulli-Gleichung gilt auch am Segel: Entlang einer Stromlinie gehören hohe Geschwindigkeit und niedriger Druck zusammen. Sie ist aber nur eine Buchhaltung zwischen Druck und Geschwindigkeit. Sie erklärt nicht, **warum** die Luft in Lee schneller ist. Die Ursache ist die Umlenkung. Wer mit Bernoulli anfängt und erfundene Stromlinienbilder zeichnet, landet schnell bei falschen Schlüssen – wie beim Düseneffekt.

**Warum ein flexibles Segel überhaupt Form hält.** Ein Flügel ist starr, ein Segel nicht. Das Tuch steht nur, solange der Druck in Luv höher ist als in Lee. Werden beide Drücke gleich, verliert das Segel seine Form und schlägt wie eine Fahne. Das ist Killen.

## Ein Wort zur Zirkulation

In Lehrbüchern wird die Strömung um ein Profil oft als Überlagerung zweier Anteile berechnet: die normale Anströmung plus eine kreisende Komponente, die „Zirkulation“. Daraus entsteht oft eine berechtigte Frage: Wohin soll bei einer Zirkulation die „zurückströmende“ Luft im Spalt verschwinden?

Die Antwort: Es strömt keine Luft zurück. Die Zirkulation ist ein Rechenanteil, kein eigener Luftwirbel um das Segel. Addiert man sie zur Anströmung, ergibt sich überall eine Strömung nach achtern – in Lee schneller, in Luv langsamer. Wir halten die Zirkulation für eine korrekte Rechenmethode, aber für ein schlechtes Unterrichtsbild. Für die Segelausbildung bleiben wir bei Umlenkung und Druck.




**Abb. 4** *Die Zirkulation ist ein Rechenanteil. ① gleichmäßige Anströmung, ② der kreisende Rechenanteil, ③ die Summe. Nur ③ existiert wirklich – und dort strömt die Luft überall nach achtern. Nirgends fließt Luft „zurück“.*

## 4 Vorsegel und Groß: kein Düseneffekt

Das Vorsegel beschleunigt die Luft im Spalt nicht, es bremst sie. Das hat Arvel Gentry ab 1971 mit Rechnungen und Strömungsversuchen gezeigt. Er arbeitete in der Gruppe von A. M. O. Smith, die mehrteilige Flugzeugtragflächen mit Klappen und Vorflügeln erforschte. Marchaj hat Gentrys Ergebnisse 1979 übernommen.

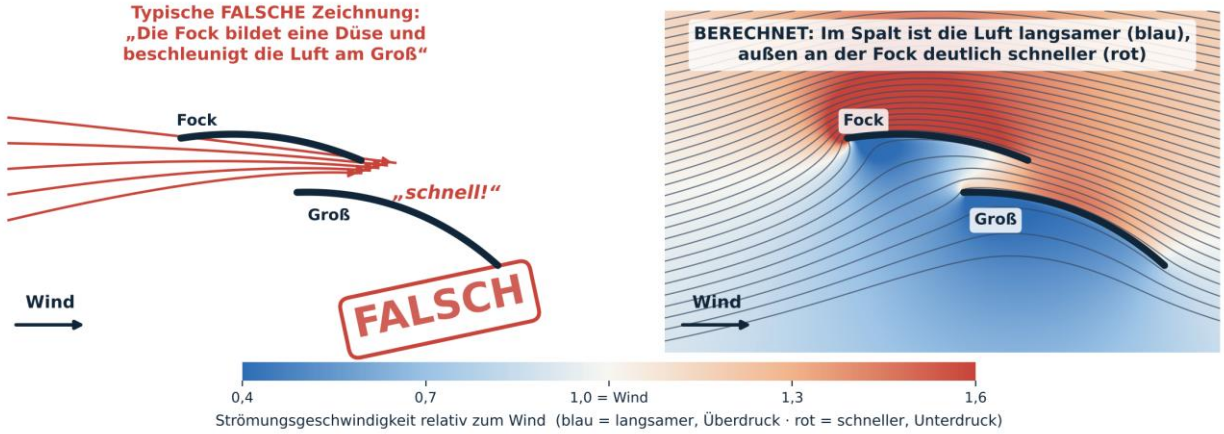



**Abb. 5** *Links die Düsen-Zeichnung, wie sie in vielen Büchern steht. Rechts die berechnete Strömung bei gleicher Segelstellung: Zwischen Fock und Groß ist die Luft langsamer als der Wind (blau). Schnell ist sie außen an der Leeseite der Fock (rot).*

### Was im Spalt passiert

1. Mit gesetztem Vorsegel strömt deutlich **weniger** Luft zwischen Vorstag und Mast als beim Groß allein. Ein großer Teil der Luft wird außen an der Leeseite des Vorsegels vorbeigelenkt.
2. Die Luft im Spalt wird dadurch **langsamer**, und der Druck an der Leeseite des Großsegels steigt etwas an.
3. Vorne am Groß sinkt deshalb der Spitzensog am Mast. Der Druck muss nach achtern weniger stark ansteigen. Die Grenzschicht kann leichter anliegen bleiben.
4. Das Groß kann so mit größerem Anstellwinkel fahren, ohne abzureißen.

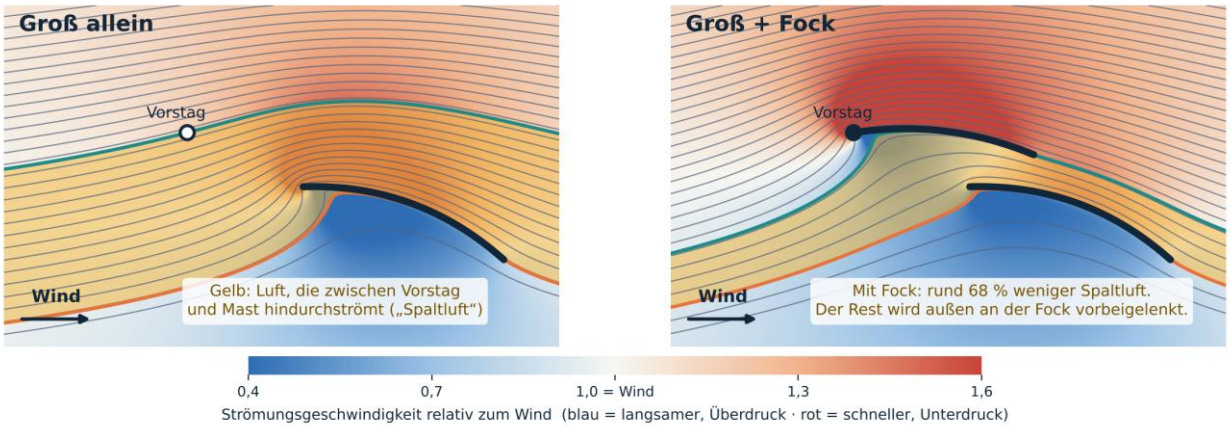



**Abb. 6** *Die gelbe Fläche ist die Luft, die zwischen Vorstag und Mast hindurchströmt. Mit gesetzter Fock schrumpft sie in dieser Beispielrechnung um rund zwei Drittel; Gentry fand je nach Segelstellung ähnliche Werte. Im Spalt weitet sich der schmale Luftstrom auf und wird langsamer – das Gegenteil einer Düse.*

## Was das Groß für das Vorsegel tut

Dieser Teil fehlt in fast allen alten Erklärungen, ist aber der wichtigere.

- Das Groß lenkt die Anströmung vor sich nach Luv um. Das Vorsegel bekommt dadurch einen günstigeren Wind und kann höher an den Wind gehen, ohne zu killen.
- Das Achterliek des Vorsegels liegt im schnell strömenden Bereich auf der Leeseite des Großsegels. Die Luft muss dort also nicht auf die normale Windgeschwindigkeit abbremsen. Das Vorsegel zieht dadurch stärker und reißt später ab.

Darum ist eine Genua im Verhältnis zu ihrer Fläche so wirksam. Und darum beeinflusst der Trimm des Großsegels die Leistung des Vorsegels direkt.

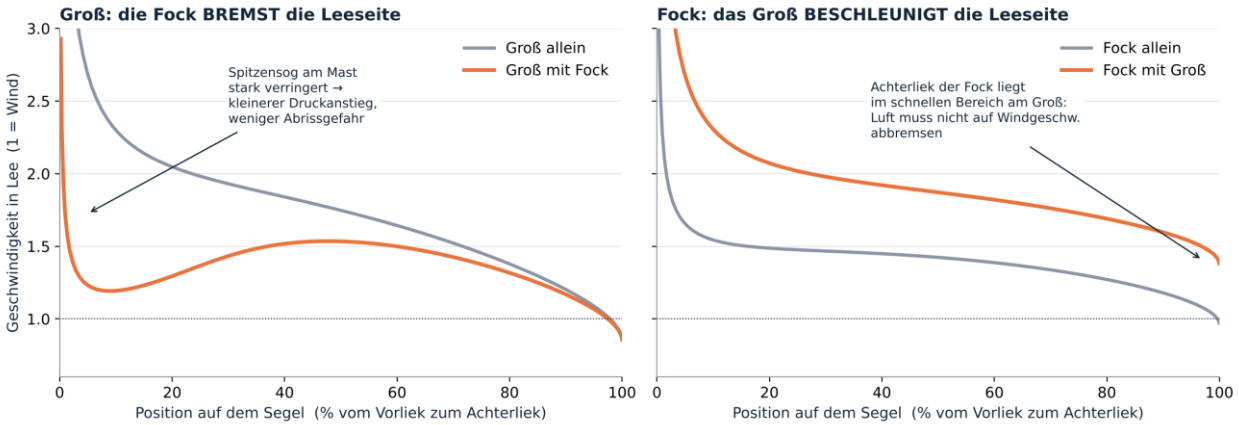



**Abb. 7** *Geschwindigkeit an der Leeseite, vom Vorliek (0 %) bis zum Achterliek (100 %). Links: Mit Fock fällt der Spitzensog am Vorliek des Großsegels stark ab. Rechts: Mit Groß strömt die Luft über die ganze Leeseite der Fock schneller, und am Achterliek bleibt sie deutlich über Windgeschwindigkeit.*

**PRAXISTIPP · DIE PROBE AM EIGENEN BOOT**

Wenn das Vorsegel zu dicht geholt ist, schlägt das Groß am Vorliek zurück (Backwinding). Gäbe es eine Düse, müsste ein engerer Spalt die Luft weiter beschleunigen und den Sog am Groß erhöhen – das Groß müsste noch besser stehen. Es passiert das Gegenteil: Die Luft im Spalt wird so langsam, dass der Druck in Lee den Druck in Luv erreicht. Das Groß verliert seine Form. Jeder Segler kennt diesen Effekt – er widerlegt die Düse an Bord.

Curry hat in den 1920er-Jahren mit stark durchgelatteten Großsegeln experimentiert. Ein durchgelattetes Segel verhält sich eher wie ein starres Profil und lässt sich nicht so leicht zurückdrücken. Das ändert aber nichts daran, dass das Vorsegel die Luft im Spalt bremst und nicht beschleunigt.

## 5 Segel und Flugzeugflügel: verwandt, aber nicht gleich

In Lektion 6 stand, Curry habe erkannt, ein Segel funktioniere „im Prinzip wie ein Flügel“. Diese Zuspitzung können wir in Currys Werk nicht belegen. Wir nehmen sie zurück. Curry hat Segel im Göttinger Windkanal vermessen und die Druckverteilung untersucht. Dass er Segel und Flügel unterschieden hat, passt zu seinen Messungen.

Auf eine griffige Formel gebracht: Ein Flugzeugprofil arbeitet mit Verdrängung, ein Segel mit Umlenkung. Daran ist viel Richtiges. Ein dickes Profil verdrängt Luft, die deshalb an ihm schneller vorbeiströmt. Diese Verdrängung allein erzeugt aber keinen Auftrieb, sie wirkt auf beiden Seiten gleich. Ein Segel hat keine Dicke und verdrängt praktisch nichts. Bei ihm bleibt nur die Umlenkung. Auftrieb entsteht auch am Flügel aus der Umlenkung – aber nur am Segel ist sie der ganze Mechanismus.

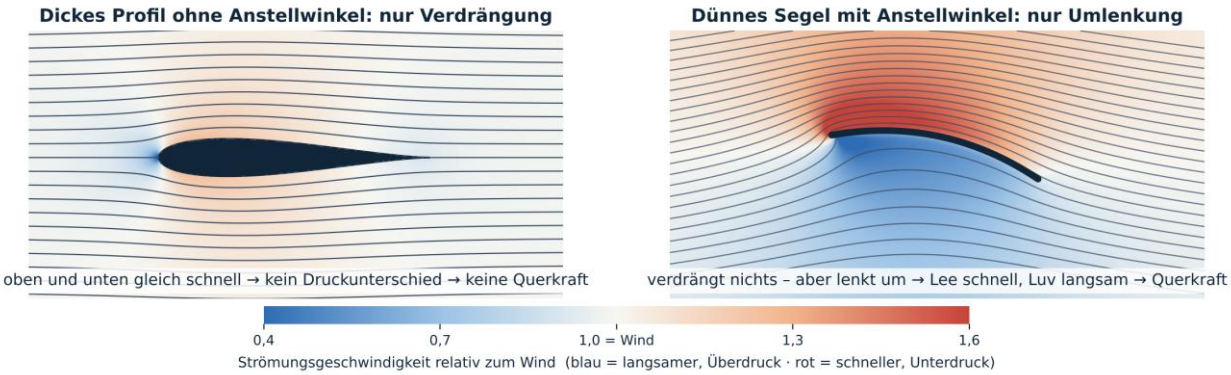



**Abb. 8** *Verdrängung und Umlenkung getrennt betrachtet. Links verdrängt ein dickes Profil die Luft: Sie strömt oben und unten gleich schnell vorbei, es entsteht keine Querkraft. Rechts verdrängt ein Segel nichts, lenkt die Luft aber um: Lee schnell, Luv langsam – das ergibt die Querkraft.*

| Merkmal | Flugzeugflügel | Segel |
|---|---|---|
| **Dicke** | 10–15 % der Profiltiefe, verdrängt Luft | praktisch null, keine Verdrängung |
| **Form** | starr, vom Konstrukteur festgelegt | flexibel, entsteht erst durch den Druckunterschied |
| **Vorderkante** | abgerundet, Strömung folgt ihr in einem Bereich von Anstellwinkeln | scharf; schon bei kleinen Fehlwinkeln Ablöseblase am Vorliek |
| **Vor dem Profil** | freie Anströmung | Mast (beim Groß) oder Aufwind des Groß (beim Vorsegel) |
| **Druck beidseitig gleich** | Flügel bleibt in Form, erzeugt nur keinen Auftrieb | Segel verliert die Form und killt |
| **Anströmung über die Höhe** | weitgehend gleich | Wind nimmt nach oben zu und dreht; Segel braucht Twist |
| **Zusammenspiel** | Klappen und Vorflügel, starr | Vorsegel und Groß, jeweils flexibel und gegenseitig wirksam |

Die Lehre für den Unterricht: Den Flügel als Bild für „ein umströmtes Profil erzeugt eine Querkraft“ dürfen wir nutzen. Wir sollten aber nicht so tun, als sei ein Segel ein senkrecht gestellter Flügel. Maßgeblich für das Verständnis des Segelns sind Gentry und Marchaj, nicht die Flugzeugliteratur.

# 6 Killen, Abriss, Anstellwinkel

Killen und Abriss sind entgegengesetzte Fehler. In Lektion 6 waren sie vermischt. Richtig ist:

| Zustand | Anstellwinkel | Was passiert | Woran man es erkennt | Abhilfe |
|---|---|---|---|---|
| **Killen** | zu klein | Luv- und Leeseite werden gleich angeströmt, kein Druckunterschied, das Tuch schlägt wie eine Fahne | Vorliek beult ein, Luv-Trimmfaden steigt oder dreht | dichter holen oder abfallen |
| **Optimal** | richtig | Strömung liegt auf beiden Seiten an | Luv- und Lee-Trimmfaden wehen parallel nach achtern | halten |
| **Abriss** | zu groß | Strömung löst sich auf der Leeseite ab, Sog bricht ein, Widerstand steigt | Segel steht voll und ruhig, Lee-Trimmfaden hängt oder kreiselt | fieren oder anluven |




**Abb. 9** *Die drei Zustände am Trimmfaden. Killen und Abriss liegen auf entgegengesetzten Seiten des richtigen Anstellwinkels.*

Der tückische Fall ist der Abriss. Das Segel sieht gut aus, steht prall und ruhig – und bremst. Darum gehören Trimmfäden auf jedes Segel. Gentry empfiehlt zusätzlich eine Reihe kurzer Fäden direkt am Vorliek. Sie zeigen früh, ob sich am Vorliek eine Ablöseblase bildet und wie schnell man sich dem Abriss nähert.

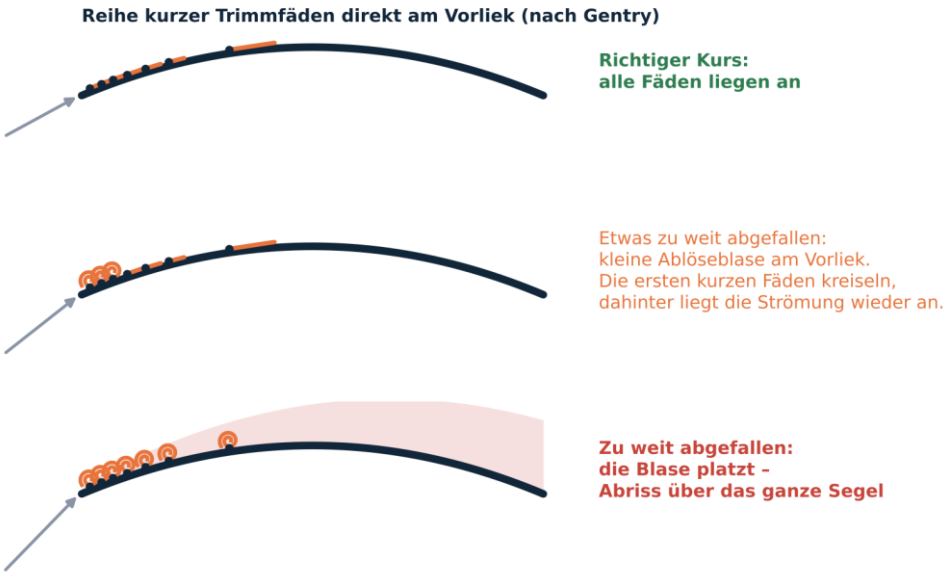



**Abb. 10** *Kurze Fäden direkt am Vorliek nach Gentry. Sie zeigen die kleine Ablöseblase, bevor der übliche lange Faden weiter hinten reagiert. So sieht man, wie nah man am Abriss segelt.*

MERKE

**Laminar oder turbulent?** Diese Frage ist für den Segler zweitrangig. Die Grenzschicht – die dünne, gebremste Luftschicht direkt am Tuch – ist am Segel überwiegend turbulent. Eine turbulente Grenzschicht liegt sogar besser an als eine laminare. Entscheidend ist nur: **anliegend oder abgerissen**. Die Grenzschicht reißt ab, wenn der Druck entlang des Segels nach achtern zu stark ansteigt – bei zu großem Anstellwinkel, zu viel Bauch oder einem geschlossenen Achterliek.

**Vortrieb durch Widerstand** auf Raumschots- und Vorwindkursen bleibt richtig beschrieben. Das Papier-Beispiel „von unten hineinblasen“ streichen wir aber. Es zeigt das Prinzip nicht sauber.

## 7 Fazit und neuer Text für Lektion 6

Ein Segel zieht, weil es die Luft umlenkt. Der Druckunterschied zwischen Luv und Lee ist die Kraft, die dabei auf das Tuch wirkt. Das Vorsegel bremst die Luft im Spalt und schützt so das Groß vor dem Abriss. Das Groß verbessert umgekehrt die Anströmung des Vorsegels. Eine Düse gibt es nicht.

Unser Lektionstext in „Aerodynamik – Vortrieb beim Segeln“ ab „Vortrieb durch Auftrieb“ sollte ersetzt werden durch:

NEUER TEXT FÜR LEKTION 6

### Vortrieb durch Auftrieb

Am Wind wird das Segel schräg angeströmt. Die gewölbte Segelfläche lenkt die Luft um. Damit die Luft der Krümmung folgt, entsteht in Lee ein Unterdruck (Sog) und in Luv ein leichter Überdruck. Der Sog in Lee ist der größere Anteil. Der Druckunterschied ergibt eine Gesamtkraft, die schräg nach vorn-lee wirkt. Wir zerlegen sie in Vortrieb und Querkraft; die Querkraft fängt Kiel oder Schwert auf.

Ein Segel ist kein Flugzeugflügel. Es hat keine Dicke, ist flexibel und hält seine Form nur, solange der Druck in Luv höher ist als in Lee.

### Zusammenspiel von Vorsegel und Groß

Das Vorsegel bremst die Luft zwischen beiden Segeln. Am Vorliek des Großsegels sinkt dadurch der Spitzensog, und die Strömung reißt später ab. Das Groß wiederum lenkt den Wind vor dem Vorsegel günstig um und lässt Luft am Achterliek des Vorsegels schneller abfließen. Beide Segel zusammen erlauben mehr Höhe und mehr Vortrieb als jedes allein. Ist das Vorsegel zu dicht, schlägt das Groß am Vorliek zurück.

### Anstellwinkel, Killen und Abriss

Ist der Anstellwinkel zu klein, wird das Segel beidseitig gleich angeströmt und killt: dichter holen oder abfallen. Ist er zu groß, reißt die Strömung in Lee ab. Das Segel steht dann voll, zieht aber schlecht: fieren oder anluven. Trimmfäden in Luv und Lee zeigen den richtigen Winkel an, wenn beide parallel nach achtern wehen.

In der Zusammenfassung von Lektion 6 entfallen die Punkte „Düseneffekt“ und „laminare Strömung“. An ihre Stelle treten: „Das Vorsegel bremst die Luft im Spalt und verhindert den Abriss am Groß“ und „Entscheidend ist, dass die Strömung anliegt“.

## 8 Quellen und weiterführende Literatur


- Arvel E. Gentry: *A Review of Modern Sail Theory*; *The Aerodynamics of Sail Interaction*, AIAA Ancient Interface III, 1971
- Arvel E. Gentry: Another Look at Slot Effect, SAIL-Artikelserie ab 1973, gesammelt in *The Best of SAIL Trim*, 1975
- C. A. Marchaj: *Aero-Hydrodynamics of Sailing*, 1979; *Sail Performance*, 1996
- Manfred Curry: *Die Aerodynamik des Segels und die Kunst des Regattasegelns*, 1925
- Holger Babinsky: How do wings work?, Physics Education 38 (2003)
- A. M. O. Smith: *High-Lift Aerodynamics*, AIAA Paper 74-939, 1974


HINWEIS ZU DEN ABBILDUNGEN

Die Strömungsbilder (Abb. 1–8) wurden für diesen Beitrag mit einem Wirbel-Panelverfahren für reibungsfreie Strömung mit Kutta-Bedingung berechnet. Sie zeigen das Prinzip; Reibung, Ablösung und die dreidimensionale Form echter Segel sind darin nicht enthalten. Abb. 9 und 10 sind schematisch, in Anlehnung an Gentry.