

Die meteorologischen Bedingungen für den dynamischen Segelflug im Low Level Jet und im Polarfront-Strahlstrom

Dr. F. Weber, Inst. für Physik der Atmosphäre, DFVLR, Deutschland

Vortrag auf dem 14. OSTIV-Kongress in Waikerie, Australien (1974)

Zusammenfassung

Es wird zunächst über die Häufigkeit des Auftretens des Low Level Jet über München anhand eines funfjährigen Radiosondenmaterials berichtet. Weiter werden die Höhen des signifikanten Windmaximums angegeben sowie die Häufigkeit der verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen, der Scherbeträge und deren Schichtdicken. Charakteristische Einzelfälle sind zum besseren Verständnis beigefügt. Anschliessend folgen statistische Betrachtungen über die Scherbeträge an Unter- und Oberkante von Polarfront-Strahlströmen, deren Schichtdicken und die Höhen, in denen diese auftreten. Einige typische Windprofile ergänzen die Ausführungen. Alle Energiequellen für den statischen Segelflug sind erschlossen. Mit Hilfe von Hangaufwinden, Thermik bzw. Konvektion und Wellenaufwinden wurden Leistungen vollbracht, die man sich bei Beginn des motorlosen Fluges nie hätte erträumen lassen. Der dynamische Segelflug jedoch, auf den die Segelfluggenieure so grosse Hoffnungen gesetzt hatten, stellt nach wie vor ein ungelöstes Problem dar.

Beim dynamischen Segelflug sollen bekanntlich die Gradienten der Windgeschwindigkeit als Energiequelle erschlossen werden, und zwar einmal beim Auftreten von Turbulenzelementen und zum anderen beim Vorhandensein von Scherzonen des Windes. Energiegewinnung aus Böen ist in der Praxis nicht durchführbar. Erfolg verspricht dagegen der Energiegewinn aus Scherzonen des Windes in der Vertikalen. Wie nun Untersuchungen vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten gezeigt haben, treten in der untersten Troposphäre, speziell im Bereich der planetarischen Grenzschicht, bodennahe Strahlströme, sogenannte Low Level Jets mit beachtlichen Scherwerten auf. Weiter werden grosse vertikale Windgeschwindigkeitsänderungen in den hochtroposphärischen Strahlströmen angetroffen, deren Windmaxima im allgemeinen rund 1–2 km unterhalb der Tropopause zu finden sind. Diese hohen Strahlströme, die grossräumige Erscheinungen darstellen und sich dadurch gut mit routinemässigen aerologischen Methoden erfassen lassen, sind weitgehend erforscht und bekannt. Ihrer Ausnutzung in Hinblick

auf den dynamischen Segelflug stellen sich jedoch wegen ihrer Höhenlage noch beträchtliche technische Hindernisse in den Weg. Deshalb werden sich die vorliegenden Ausführungen in ihrem zweiten Teil nur relativ kurz mit hochtroposphärischen Strahlströmen, speziell dem Polarfront-Strahlstrom, befassen.

Erfolgsversprechend mit herkömmlichen Flugzeugen dagegen ist die Ausnutzung der Scherströmung für den dynamischen Segelflug im Bereich des Low Level Jet. Die niedertroposphärischen Jets treten bei speziellen atmosphärischen Bedingungen auf. Das Windmaximum findet man offensichtlich annähernd an der Obergrenze der Ekman-Schicht, also in rund 1000 m Höhe über Grund. Die bodennächste Schicht, die Prandtl- oder Surface-Layer mit extremen Scherwerten, die bis ca. 30 m Höhe reicht und schon seit längerer Zeit relativ gut erforscht ist, kann aus flugtechnischen Gründen jedoch nicht genutzt werden.

Die Vorstellungen über das Erscheinungsbild und die Entstehungsbedingungen des LLJ sind noch uneinheitlich.

A. Blackadar (1957) versteht unter dem Low Level Jet ein signifikantes Windmaximum in der untersten Troposphäre bis 1,5 km Höhe (5000 ft), verbunden mit einer sich darüber anschliessenden Windgeschwindigkeitsabnahme von 5 Knoten. Über die absolute Windgeschwindigkeit und die Grösse des Scherbetrages in der Vertikalen und Horizontalen wird keine Aussage getroffen.

W. Bonner (1968), der u.a. eine Klimatologie des LLJ für die Vereinigten Staaten erstellte, ging bei seinen Untersuchungen von der von A. Blackadar festgelegten Definition aus. Das signifikante Windmaximum konnte bei ihm jedoch ursprünglich bis zu einer Höhe von 2,5 km über dem Boden auftreten. Da er aber bei seinen Untersuchungen eine relativ hohe LLJ-Häufigkeit zwischen 1,0 und 1,5 km Höhe über Grund feststellte, wählte er 1500 m als das höchste Niveau, in dem ein Windmaximum noch als Low Level Jet zu bezeichnen ist.

S. Uhlig (1971) berichtete über die Häufigkeit des Auftretens des LLJ über Altenstadt im nördlichen Alpenvorland. Er benutzte ein ähnliches Kriterium:

«Der LLJ ist ein signifikantes Windmaximum innerhalb der untersten, vom Erdboden aus bedeutet im Wetterdienst 10 m über Grund bis zu 1500 m Höhe über Grund reichenden Schicht der Atmosphäre, oberhalb dessen die Windgeschwindigkeit bis zum nächsten Minimum oder bis zu 3000 m Höhe über Grund – je nachdem, welches Niveau tiefer liegt – um mindestens 5 Knoten (oder 3 m/s) abnimmt.» Ihm standen allerdings nur optische Pilotierungen zur Verfügung.

D. Podhorsky (1969) untersuchte den Low Level Jet über der Südwestslowakei. Er berücksichtigte nur Fälle mit Windgeschwindigkeiten ≥ 30 m/s, eine Bedingung also, wie man sie bei hochtroposphärischen und stratosphärischen Strahlströmen stellt. Welche Windmaxima in der unteren Troposphäre man nun wirklich als Low Level Jet bezeichnen darf, soll hier nicht entschieden werden. Das Ziel unserer Arbeit war die Untersuchung von niedertroposphärischen Windmaxima im Alpenvorland in Hinblick auf ihre Bedeutung für aeronautische Probleme, speziell für den dynamischen Segelflug. Dabei gingen wir im Prinzip von den Kriterien von Blackadar, Bonner und Uhlig aus. Eine Abweichung besteht darin, dass das signifikante Windmaximum unterhalb von 3000 m Höhe über Grund liegen muss. Zur Verfügung standen uns die Original-Aufstiegsdaten der Radiosondenstation München-Riem der Jahre 1968–1972, also mehr als 7000 Aufstiege. Diese Station wurde ausgewählt, da sie auf einem der verkehrsreichsten Flughäfen Deutschlands liegt und ausserdem angenommen werden musste, dass die west-östlich verlaufende Alpenkette einen wesentlichen Einfluss auf Richtung und Geschwindigkeit des LLJ ausüben würde.

Statistische Ergebnisse der LLJ-Untersuchungen

Bild 1 zeigt die mittlere Häufigkeit des Auftretens des LLJ über München zu den einzelnen Tageszeiten. Die Zahlen bedeuten, dass beispielsweise um 00.00 im Mittel an 131 Tagen eines Jahres mit dem Auftreten von LLJ zu rechnen ist, also ungefähr an jedem dritten Tag. Das Maximum von rund

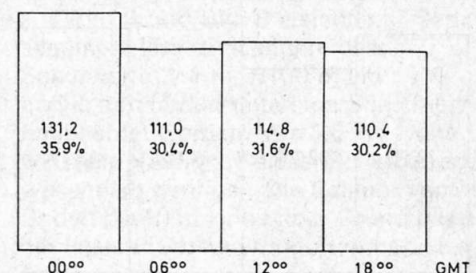


Bild 1
Mittlere Häufigkeit des Auftretens von LLJ über München zu den einzelnen Tageszeiten, 1968–1972

36% wird um Mitternacht erreicht, wohl zurückzuführen auf die nachts gehäuft auftretenden Inversionen und die mit ihnen verbundenen Windmaxima. Bereits A. Blackadar (1957) hat bei seinen Untersuchungen festgestellt, dass an der Obergrenze von nächtlichen Inversionen in den meisten Fällen Windmaxima anzutreffen sind. Überraschend ist das relativ häufige Auftreten von Low Level Jets zu allen Tageszeiten.

Im Jahresgang hat der Low Level Jet seine geringste Häufigkeit mit knapp 28% im Sommer. In den übrigen Jahreszeiten liegt die Häufigkeit zwischen 32,6% und 34,1%, mit Maximum im Herbst. (Bild 2).

In Bild 3 sind in Abhängigkeit von der Tageszeit die Höhen wiedergegeben, in denen das Maximum des LLJ über München aufzutreten pflegt. Um 00.00, 06.00 und 18.00 GMT liegen die Maxima in der Klasse > 0,5–1,0 km Höhe, um 12.00 in der Schicht zwischen > 1,0–1,5 km Höhe, also höher. Insgesamt lässt sich jedoch sagen, dass die Windmaxima ganz allgemein die Schichten > 0,5–2 km Höhe bevorzugen. W. Bonner (1968) hat, wie bereits angeführt wurde, eine relativ hohe Häufigkeit von Low Level Jets in den Höhen zwischen 1,0 und 1,5 km gefunden. D. Podhorsky (1969), der, wie eingangs erwähnt, das Auftreten des LLJ über der Südwestslowakei mit Hilfe von Radiosondierungen von Wien untersucht hat (1957–1966), stellte das Maximum der Geschwindigkeit im Niveau von 1500 bis 2000 m fest. Er setzte allerdings als notwendige Windgeschwindigkeit für einen «echten» LLJ ≥ 30 m/s voraus.

Wie aus Bild 4 hervorgeht, traten am häufigsten Windgeschwindigkeiten von 5 m/s bis < 15 m/s auf. Relativ häufig sind jedoch auch noch Windgeschwindigkeiten zwischen 15 und < 20 m/s.

Die maximalen Windgeschwindigkeiten, die im 5jährigen Zeitraum über München festgestellt wurden, lagen in der Klasse 40–< 45 m/s. Allerdings kamen diese hohen Windstärken nur

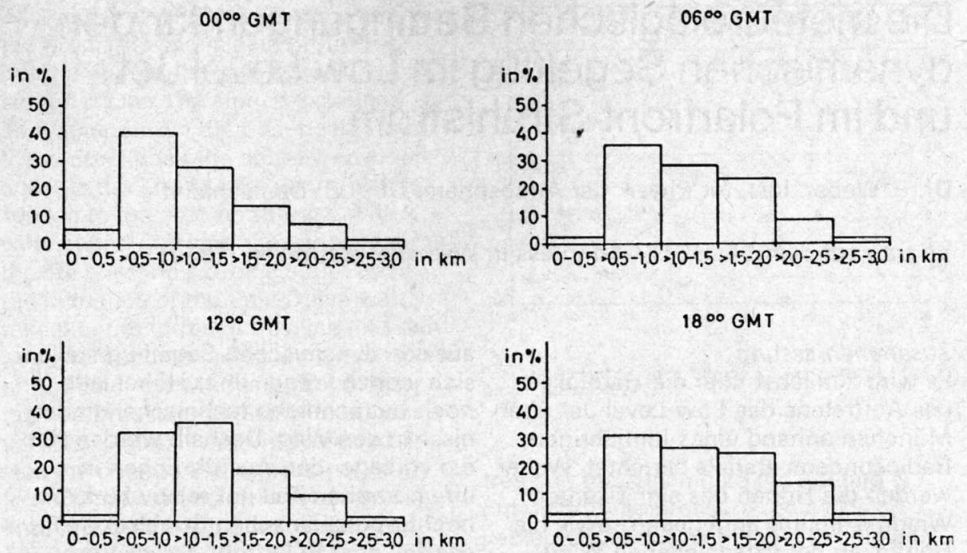


Bild 3
Mittlere Häufigkeit in % der Höhen der Windmaxima des LLJ über München, 1968–1972

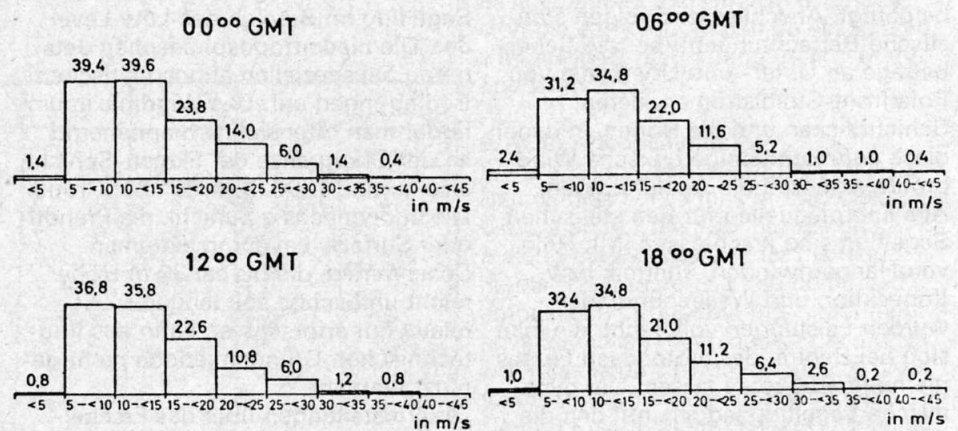


Bild 4
Mittlere Häufigkeit der Geschwindigkeiten beim Auftreten von LLJ über München, 1968–1972

	360°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
00° GMT	6	14	17	71	52	18	15	19	57	<u>268</u>	97	21
06° GMT	7	3	21	58	25	14	12	14	48	<u>257</u>	80	14
12° GMT	8	4	10	60	46	18	11	14	59	<u>242</u>	86	15
18° GMT	6	8	12	79	35	15	16	12	50	<u>207</u>	91	16

Tab. 1
Häufigkeit verschiedener Windrichtungen beim Auftreten von LLJ über München in Höhe des Windmaximums, 1968–1972

sehr selten vor, insgesamt nur an 6 Tagen. Die höchste Windgeschwindigkeit in einem LLJ im Untersuchungszeitraum wurde am 13.2.1970, 06.00 GMT, gemessen und betrug rund 43 m/s, also rund 155 km/h. Low Level Jets mit Geschwindigkeiten ≥ 30 m/s wurden an 37 Tagen beobachtet. Zum Vergleich hierzu die Werte von D. Podhorsky für Wien: 165 Fälle in 10 Jahren; das sind im Mittel rund dreimal mehr LLJ-Fälle ≥ 30 m/s über Wien als über München.

An Tagen mit LLJ ≥ 30 m/s über München herrschten im allgemeinen zyklonale Westwetterlagen. Tabelle 1 gibt die Häufigkeit der verschiedenen Windrichtungen beim Auftreten des LLJ in Höhe des Windmaximums zu den vier Aufstiegsterminen wieder. Bevorzugt werden ganz eindeutig die Richtungen 270 bzw. 300° und 90°. Etwas anschaulicher zeigt dieses Verhalten die folgende graphische Darstellung (Bild 5) für den 12.00-Aufstiegstermin. Der Low Level Jet über München ist

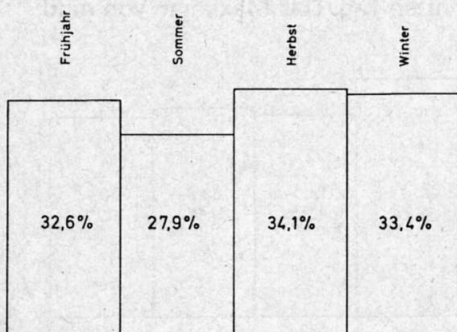


Bild 2
Mittlere Häufigkeit in % des LLJ über München für die einzelnen Jahreszeiten, 1968–1972

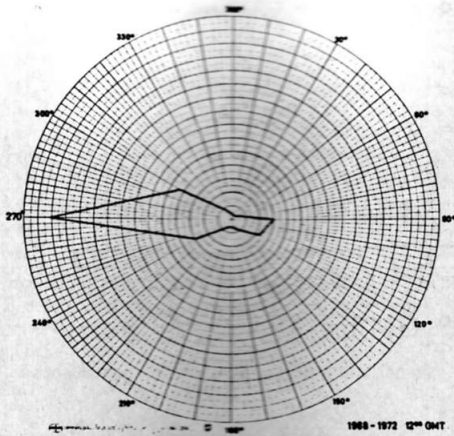


Bild 5
Graphische Darstellung über die Häufigkeit verschiedener Windrichtungen beim Auftreten von LLJ über München, 1968-1972, 12.00 GMT

also vorwiegend parallel zur Alpenkette orientiert. Bereits W. Bonner (1968) kam zu der Feststellung, dass die Windrichtung im LLJ mit der Streichrichtung der Gebirge zusammenfällt.

Auch D. Podhorsky (1969) fand, dass die LLJets über Wien am häufigsten mit westlichen Windrichtungen verbunden sind.

Diese Tatsache könnte von Bedeutung sein bei der Planung von Segelflügen auf dynamischer Basis.

Aus Tabelle 2 wird die Beziehung zwischen Windrichtung und Windgeschwindigkeit in Höhe des Windmaximums ersichtlich. Deutlich zeigt sich hier, dass bei zunehmender Windgeschwindigkeit der Low Level Jet sich immer mehr der West-Ost-Richtung der Alpen anpasst.

Auch S. Uhlig (1971) stellte fest: «Die West-Ost-Orientierung tritt um so deutlicher hervor, je stärker der Wind wird.»

Für den dynamischen Segelflug interessieren uns nun in erster Linie die Scherbeträge an der Unterkante des LLJ sowie die vertikale Mächtigkeit der Scherzonen und die Höhenbereiche, in denen sie auftreten. Hier die Ergebnisse, wieder für die Jahre 1968-1972.

Bild 6 und Bild 7 zeigen die mittlere Häufigkeit einzelner Scherwerte für Tage mit LLJ über München. Die Klasseneinteilung erfolgte von 0,5 zu 0,5 m/s/100 m. Alle Werte > 6 m/s/

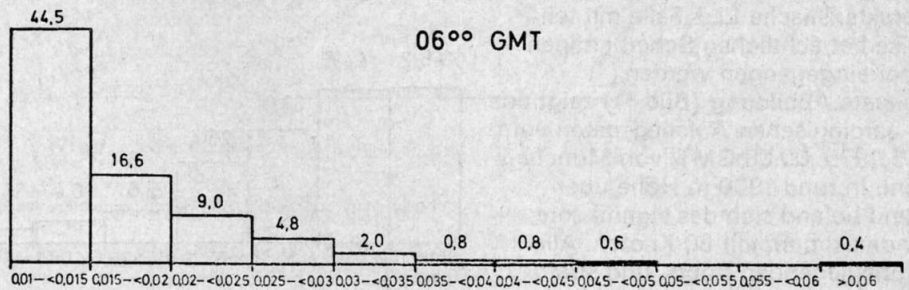
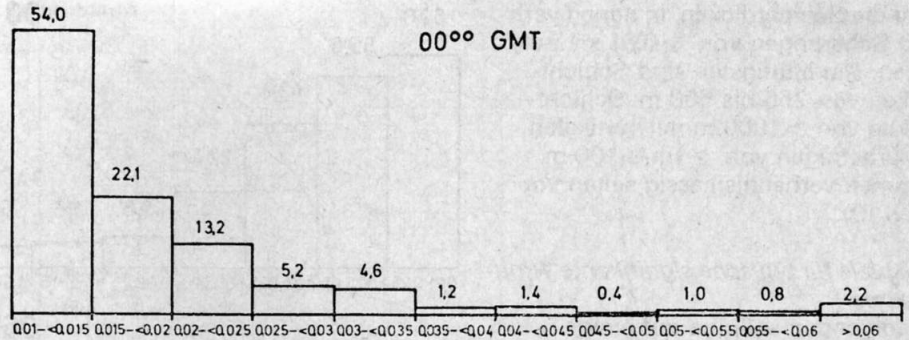


Bild 6
Mittlere Häufigkeit einzelner Scherwerte für Tage mit LLJ über München, 1968-1972, 00.00 und 06.00

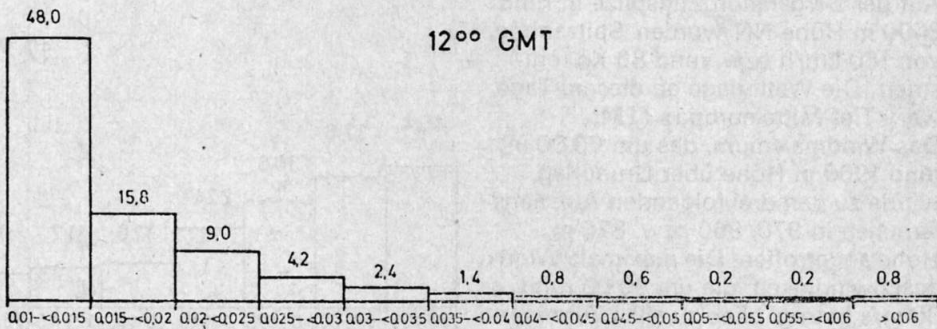


Bild 7
Mittlere Häufigkeit einzelner Scherwerte für Tage mit LLJ über München, 1968-1972, 12.00 und 18.00

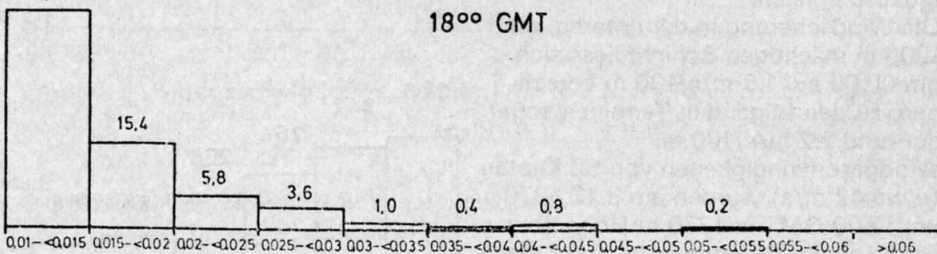


Bild 7
Mittlere Häufigkeit einzelner Scherwerte für Tage mit LLJ über München, 1968-1972, 12.00 und 18.00

100 m wurden zu einer Klasse zusammengefasst. Scherwerte von <1 m/s/100 m erschienen uns für den dynamischen Segelflug uninteressant, sie wurden hier nicht mitberücksichtigt. Am weitest häufigsten werden Scherwerte in der Klasse 1 m/s/100 m bis 1,5 m/s/100 m beobachtet. Scherwerte von 2,5 m/s/100 m und darüber sind schon eine relativ seltene Erscheinung. Allerdings treten gelegentlich auch noch Scherwerte über 5 m/s/100 m auf. Der höchste Scherwert lag bei rund 10 m/s/100 m (19.6.1969, 12.00 GMT). Hierzu muss noch bemerkt werden, dass die routinemässigen Winddaten im Minutenabstand mittels Radargerät ermittelt werden; sicher ergäben sich bei kontinuierlicher Messung weitaus grössere Scherbeträge, allerdings sind

die Schichtdicken in solchen Fällen geringer. Höchstwerte sind wohl an ausgeprägten Inversionen zu erwarten, wobei Windrichtungsänderungen von annähernd 180° keine Seltenheit sein dürften.

Die Höhenbereiche, in denen diese Scherbeträge angetroffen werden, sind aus Bild 8 und Bild 9 ersichtlich. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass Scherwerte ≥ 1 m/s/100 m am häufigsten in den untersten Schichten beobachtet werden. Von 1,0 km Höhe an ist die Häufigkeit dieser Scherbeträge wesentlich geringer. Die Schicht vom Boden bis 10 m Höhe über Grund blieb bei unseren Auswertungen unberücksichtigt.

Abschliessend zur Statistik des Low Level Jet noch einige Bemerkungen

	360°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	Summen
<5 m/s	—	3	3	5	4	2	2	4	7	7	1	1	39
5-<10 m/s	18	18	34	125	106	49	25	34	56	138	82	35	720
10-<15 m/s	9	7	18	107	45	15	22	15	58	270	136	21	723
15-<20 m/s	—	—	4	28	5	1	3	7	46	262	74	8	438
20-<25 m/s	—	—	—	—	—	—	—	1	23	178	38	—	241
25-<30 m/s	—	—	—	—	—	—	1	—	17	80	15	1	114
30-<35 m/s	—	—	—	—	—	—	—	—	2	25	3	—	30
35-<40 m/s	—	—	—	—	—	—	—	—	4	7	—	—	11
40-<45 m/s	—	—	—	—	—	—	—	—	1	5	—	—	6
Summen	27	29	59	265	160	67	53	61	214	972	349	66	2322

Tab. 2
Anzahl der Fälle von LLJ über München bei vier Aufstiegsterminen im Zeitraum 1968-1972: Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten in Höhe des Windmaximums

über die Schichtdicken, in denen vertikale Scherungen von $\geq 0,01 \text{ s}^{-1}$ auftreten. Am häufigsten sind Schichtdicken von 250 bis 500 m. Schichtdicken von $> 1000 \text{ m}$ mit vertikalen Scherbeträgen von $\geq 1 \text{ m/s/100 m}$ kommen verhältnismässig selten vor (Bild 10).

Beispiele für typische signifikante Windmaxima

Im folgenden soll nun auf einige charakteristische LLJ-Fälle mit teilweise beträchtlichen Scherbeträgen näher eingegangen werden.

Die erste Abbildung (Bild 11) zeigt uns die aerologische Aufstiegsdaten vom 12. 5. 1970, 00.00 GMT, von München-Riem. In rund 1900 m Höhe über Grund befand sich das signifikante Windmaximum mit 60 Knoten. Alle darüberliegenden tropo- und stratosphärischen Schichten weisen beträchtlich niedrigere Windwerte auf. Die Windrichtung in der unteren und mittleren Troposphäre lag bei 250° .

Auf der Bergstation Zugspitze in rund 3000 m Höhe NN wurden Spitzenböen von 160 km/h bzw. rund 86 Kn registriert. Die Wetterlage an diesem Tage war «Tief Mitteleuropa» (TM). Das Windmaximum, das um 00.00 in rund 1900 m Höhe über Grund lag, wurde zu den drei folgenden Aufstiegs-terminen in 970, 960 bzw. 870 m Höhe angetroffen. Die maximale Windgeschwindigkeit, die um 00.00 rund 30 m/s betrug, blieb zu allen Terminen praktisch gleich.

Die Windscherung in der unteren, rund 1000 m mächtigen Schicht liess sich um 00.00 auf $1,5 \text{ m/s/100 m}$ berechnen, zu den folgenden Terminen sogar auf rund $2,2 \text{ m/s/100 m}$.

Windgeschwindigkeiten von 82 Knoten (etwa 42 m/s) wurden am 3. 12. 1970 um 12.00 GMT in 1370 m Höhe über Grund an der Obergrenze einer schwach ausgeprägten Inversion gemessen (Bild 12). Die vertikale Windscherung errechnet sich für diese Schicht zu 3 m/s/100 m . Die Bodenwetterkarte zeigt einen kräftigen Sturmwirbel über dem nördlichen Ostdeutschland. Ein Hochdruckgebiet mit Kern über den SW-Alpen erstreckt sich bis nach Nordjugoslawien. Die Windrichtung in Höhe des Windmaximums betrug 280° . Die Grosswetterlage war Wz (zyklonale Westwetterlage).

Am 8. 11. 1969 wurde um 06.00 und 12.00 GMT ein LLJ in Höhe der planetarischen Grenzschicht in ca. 750 bzw. 900 m Höhe über Grund mit einer Windgeschwindigkeit von reichlich 37 bzw. 30 m/s beobachtet (Bild 13). Die vertikale Scherung betrug um 06.00 rund $4,3 \text{ m/s/100 m}$ in der rund 750 m mächtigen Schicht. Um 12.00 hatte sich die Windscherung auf $2,2 \text{ m/s/100 m}$ bei 900 m Schichtdicke verringert.

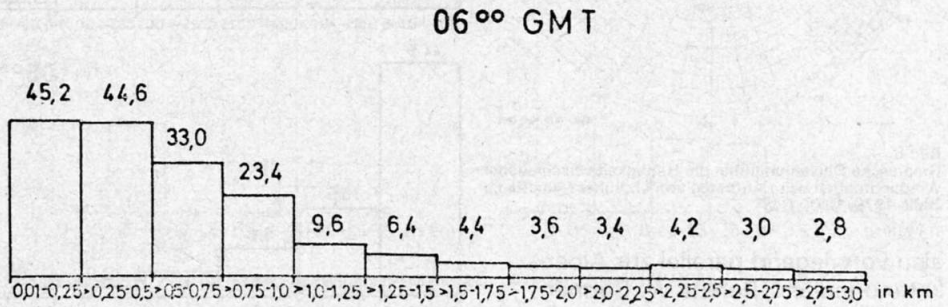
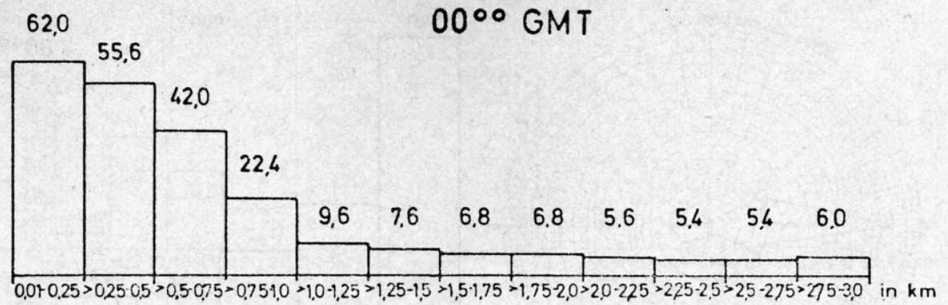


Bild 8
Mittlere Häufigkeit des Auftretens von Scherwerten $\frac{\Delta V}{\Delta Z} \geq 0,01 \text{ s}^{-1}$ in den einzelnen Höhenbereichen über München 1968-1972

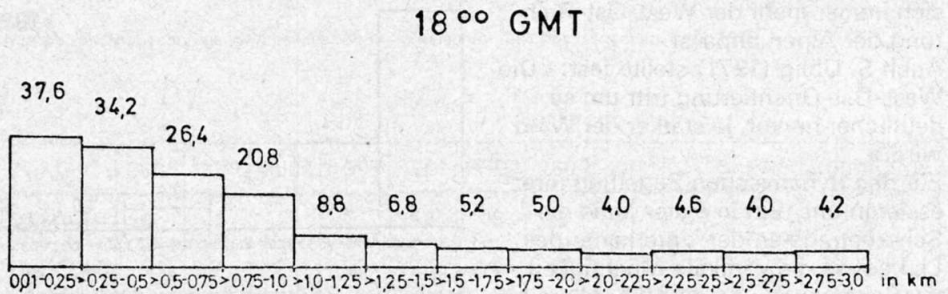
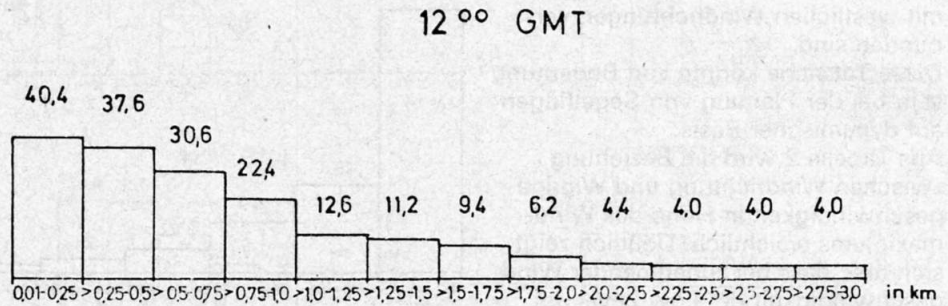


Bild 9
Mittlere Häufigkeit des Auftretens von Scherwerten $\frac{\Delta V}{\Delta Z} \geq 0,01 \text{ s}^{-1}$ in den einzelnen Höhenbereichen über München 1968-1972

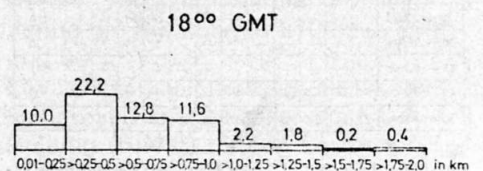
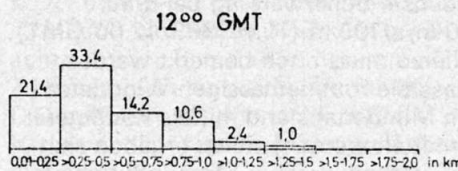
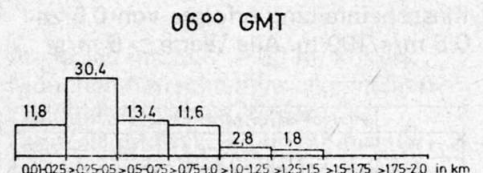
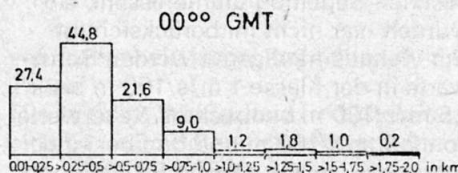


Bild 10
Mittlere Häufigkeit von Schichtdicken bei Scherbeträgen $\geq 0,01 \text{ s}^{-1}$ bei LLJ über München, 1968-1972

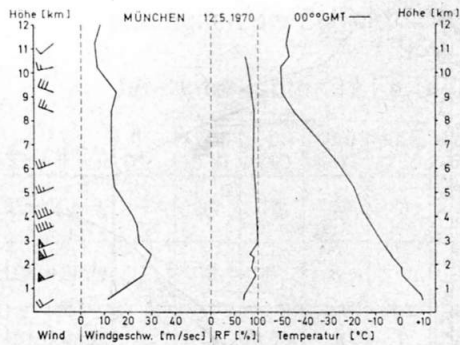


Bild 11
Radiosondierung von München vom 12.5.1970, 00.00 GMT

Besonders ausgeprägte niedertroposphärische Strahlströme wurden in der zweiten Dekade des Novembers 1972 über München beobachtet. Bei zyklonaler Westwetterlage bildeten sich besonders ab 13. November immer wieder LLJets mit hohen Windgeschwindigkeitsmaxima und entsprechenden Scherzonen aus.

Als Beispiel sollen die Radiosondierungen vom 17.11.1972, 12.00, und 18.11.1972, 00.00, angeführt werden. Am 17. November mittags liegt das signifikante Windmaximum mit 30 m/s in 800 m Höhe über Grund. Die Windrichtung in Bodennähe ist annähernd Ost. Bis zur Höhe des Windmaximums dreht der Wind praktisch auf West (Bild 14). Die vertikale Windscherung beträgt 4,5 m/s/100 m in der vom Boden bis 800 m Höhe reichenden Schicht. Hier wurde nur die skalare Scherung berechnet. Die Vektorscherung liegt um einiges höher.

Die Bodenwetterkarte zum gleichen Termin zeigt ein flaches Tiefdrucksystem mit Kern über NW-Frankreich. Eine von ihm ausgehende Warmfront erstreckt sich bis Wien. Nördlich der Warmfront herrschen Temperaturen von 1–4 °C, südlich davon 13–15 °C. Auch am 18. November 1972 ist der LLJ noch gut ausgeprägt (Bild 15). Rund 30 m/s werden um 00.00 in ca. 700 m Höhe über Grund beobachtet. Die vertikale Windscherung beträgt in dieser Schicht nach wie vor rund 4,5 m/s/100 m.

Die erwähnte Witterungsperiode vom November 1972 hat gezeigt, dass u.U. eine LLJ-Situation tagelang anhalten kann.

Abschliessend zu den Ausführungen über den LLJ soll bemerkt werden, dass diese Erscheinung u.a. bereits über den USA, Kanada, Peru, Tschad, Kenya, der UdSSR, dem Indischen Ozean und der Antarktis beobachtet und untersucht wurde.

Nun zu den meteorologischen Bedingungen für den dynamischen Segelflug im Bereich der hochtroposphärischen Strahlströme, speziell dem Polarfront-Jet.

Bei einem derartigen Jet-Stream handelt es sich gemäss einer Definition der WMO um eine starke und relativ

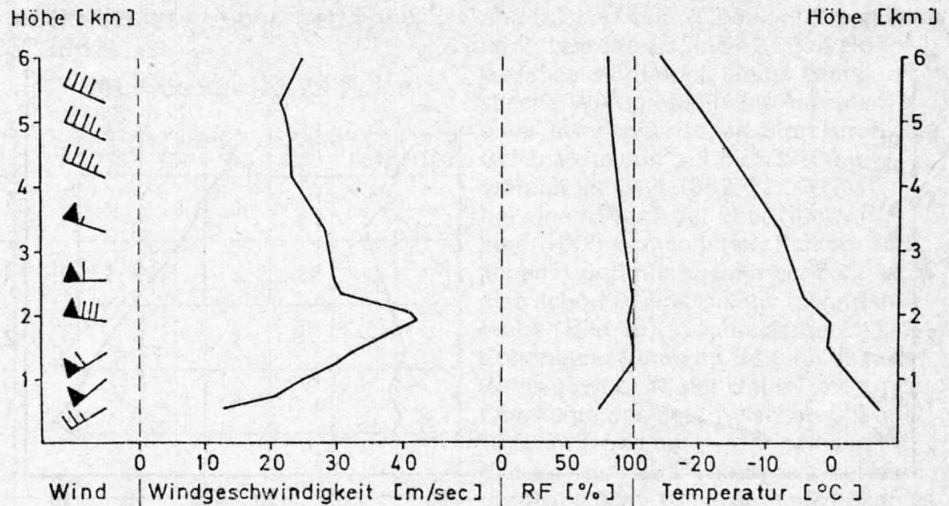


Bild 12
Radiosondierung von München vom 3.12.1970, 12.00 GMT

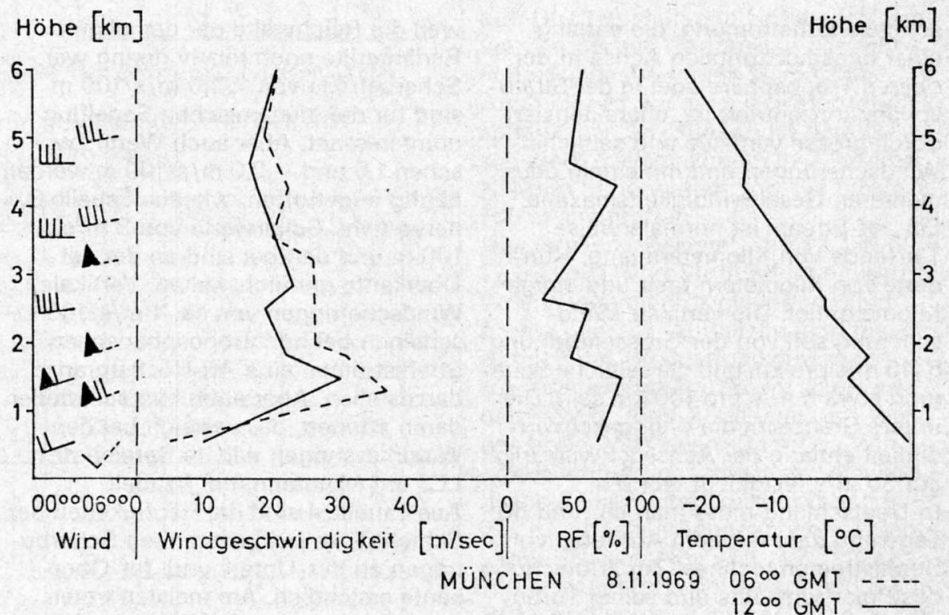


Bild 13
Radiosondierung von München vom 8.11.1969, 06.00 und 12.00 GMT

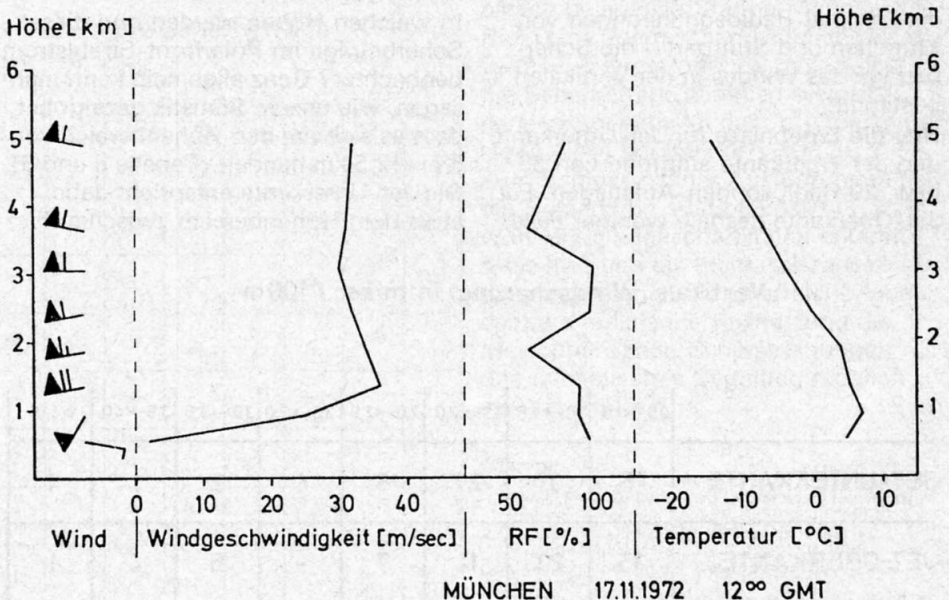


Bild 14
Radiosondierung von München vom 17.11.1972, 12.00 GMT

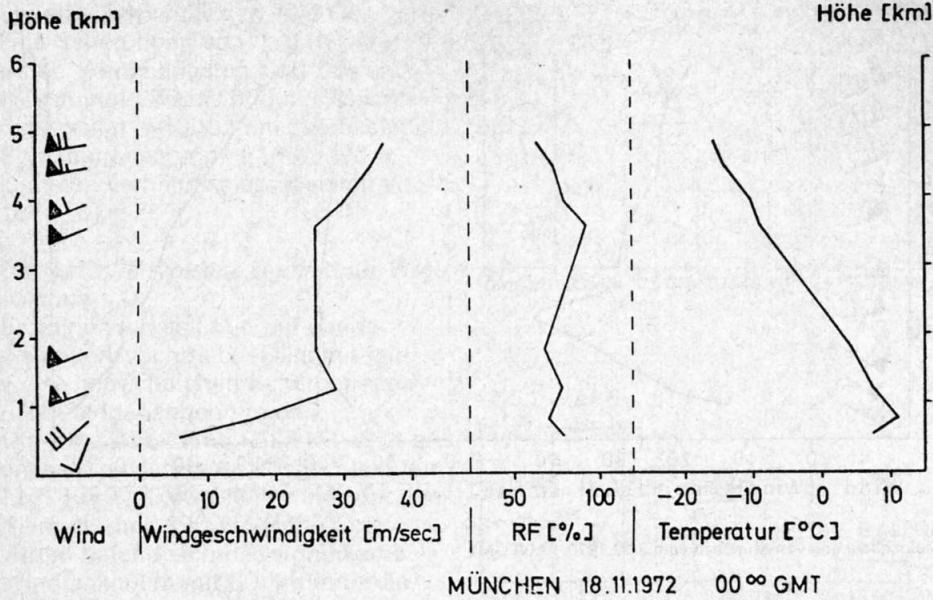


Bild 15
Radiosondierung von München vom 18.11.1972, 00.00 GMT

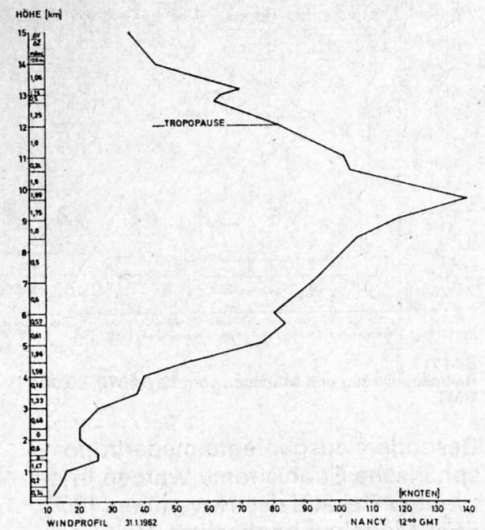


Bild 16
Windprofil von Nancy vom 31.1.1962, 12.00 GMT

schmale Luftströmung, die entlang einer quasihorizontalen Achse in der oberen Troposphäre oder in der Stratosphäre konzentriert ist, charakterisiert durch grosse vertikale und seitliche Windscherungen und mit einem oder mehreren Geschwindigkeitsmaxima. Ein Jet-Stream ist normalerweise Tausende von Kilometern lang, Hunderte von Kilometern breit und einige Kilometer tief. Die vertikale Windscherung soll von der Grössenordnung 5–10 m/s pro km und die seitliche Scherung etwa 5 m/s pro 100 km sein. Die untere Grenze für die Windgeschwindigkeit entlang der Achse ist willkürlich auf 30 m/s festgelegt worden.

In Deutschland muss man an rund 60 Tagen im Jahr mit dem Auftreten von Strahlströmen rechnen. Zur Erforschung des Polarfront-Jets und seiner Turbulenz hat der Vortragende in Verbindung mit der Bundesluftwaffe in den Jahren 1960–62 vor allem über Süddeutschland Messflüge durchgeführt. In allen Fällen wurden nun – meistens anhand der Original-Radiosondierungen von München und Stuttgart – die Scherbeträge des Windes in der Vertikalen bestimmt.

Hier die Ergebnisse für Jet-Unterkante und Jet-Oberkante aufgrund von 39 bzw. 29 Radiosonden-Aufstiegen. Für Jet-Oberkante deshalb weniger Fälle,

weil die Reichweite der damaligen Radargeräte noch relativ gering war. Scherbeträge von $< 1,0$ m/s/100 m sind für den dynamischen Segelflug uninteressant. Aber auch Werte zwischen 1,0 und $< 2,0$ m/s/100 m werden häufig angetroffen, wie aus Tabelle 3 hervorgeht. Scherwerte von 3 m/s/100 m und darüber sind an der Jet-Oberkante gar nicht selten. Vertikale Windscherungen von ca. 4 m/s/100 m scheinen bei hochtroposphärischen Strahlströmen eine Art Höchstgrenze darzustellen. Aber auch hier sei wieder daran erinnert, dass es sich bei den Windmessungen wie im Bereich des LLJ um Minutenmittel handelt.

Aus Tabelle 4 sind die Häufigkeiten der Schichtdicken bei bestimmten Scherbeträgen an Jet-Unter- und Jet-Oberkante ersichtlich. Am meisten treten Schichtdicken von > 250 bis 500 m Mächtigkeit auf. Ganz selten werden bei den hier interessierenden Scherwerten Schichten von > 1000 m Mächtigkeit angetroffen.

In welchen Höhen werden nun diese Scherbeträge im Polarfront-Strahlstrom beobachtet? Ganz allgemein kann man sagen, wie unsere Statistik gezeigt hat, dass es sich um den Höhenbereich von 5 bis 12,5 km handelt (Tabelle 5 und 6). Die Jet-Unterkante entspricht dabei etwa dem Höhenbereich zwischen 5

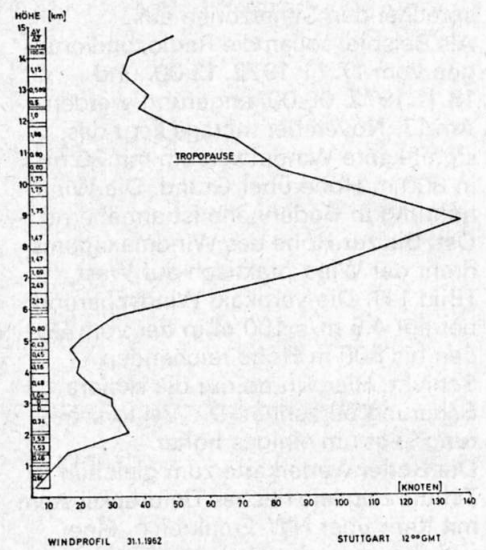


Bild 17
Windprofil von Stuttgart vom 31.1.1962, 12.00 GMT

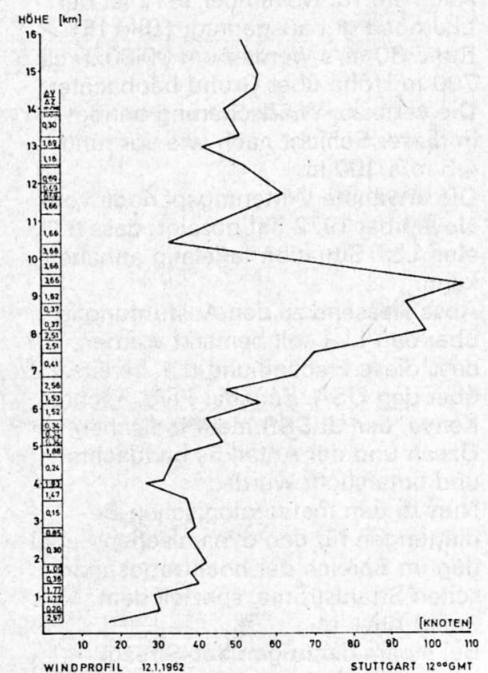


Bild 18
Windprofil von Stuttgart vom 12.1.1962, 12.00 GMT

Vertikale Windscherung in m/sec / 100m

	0,5- <1,0	1,0- <1,5	1,5- <2,0	2,0- <2,5	2,5- <3,0	3,0- <3,5	3,5- <4,0	≥ 4,0
JET-UNTERKANTE	75	31	27	8	4	2	1	1
JET-OBERKANTE	35	23	14	7	-	5	4	1

Tab. 3
Vertikale Windscherung in m/sec/100 m im Bereich von Polarfront-Strahlströmen

Häufigkeit der Schichtdicken bei bestimmten Scherbeträgen (1960, 1961, 1962)

Jet-Unterkante: 39 Fälle

Jet-Oberkante: 29 Fälle

$\frac{\Delta v}{\Delta z} / 100 \text{ m}$	0-250	>250-500	>500-750	>750-1000	>1000-1250	>1250-1500
0,5- <1,0 m/s	3	30	12	14	7	6
1,0- <1,5 m/s	1	16	6	6	-	1
1,5- <2,0 m/s	2	19	3	2	1	-
2,0- <2,5 m/s	2	6	-	1	-	-
2,5- <3,0 m/s	-	3	1	-	-	-
3,0- <3,5 m/s	1	1	-	-	-	-
3,5- <4,0 m/s	-	1	-	-	-	-
>4,0 m/s	-	1	-	-	-	-

Tab. 4 Häufigkeit der Schichtdicken bei bestimmten Scherbeträgen (1960, 1961, 1962) in Polarfront-Strahlströmen

Jet-Unterkante: Häufigkeit für bestimmte Scherbeträge (1960, 1961, 1962; 39 Fälle)

$\frac{\Delta v}{\Delta z} / 100 \text{ m}$	5000-5500	>5500-6000	>6000-6500	>6500-7000	>7000-7500	>7500-8000	>8000-8500	>8500-9000	>9000-9500	>9500-10000	>10000-10500	>10500-11000	>11000-11500	>11500-12000
0,5- <1,0 m/s	9	11	15	16	18	18	11	6	9	11	9	5	2	1
1,0- <1,5 m/s	4	4	4	3	3	5	7	6	3	3	5	3	1	-
1,5- <2,0 m/s	6	5	6	6	4	1	-	3	4	2	-	-	-	-
2,0- <2,5 m/s	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1	-	-	-	-
2,5- <3,0 m/s	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	1	1	-
3,0- <3,5 m/s	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
3,5- <4,0 m/s	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
>4,0 m/s	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 5 Jet-Unterkante: Häufigkeit für bestimmte Scherbeträge (1960, 1961, 1962; 39 Fälle) bei Polarfront-Strahlströmen

Jet-Oberkante: Häufigkeit für bestimmte Scherbeträge (1960, 1961, 1962; 29 Fälle)

$\frac{\Delta v}{\Delta z} / 100 \text{ m}$	7500-8000	>8000-8500	>8500-9000	>9000-9500	>9500-10000	>10000-10500	>10500-11000	>11000-11500	>11500-12000	>12000-12500	>12500-13000	>13000-13500	>13500-14000	>14000
0,5- <1,0 m/s	-	1	2	5	6	6	7	7	6	7	7	4	2	1
1,0- <1,5 m/s	-	1	2	2	4	5	5	7	9	9	3	1	-	-
1,5- <2,0 m/s	1	1	3	2	4	5	3	4	3	2	1	1	-	-
2,0- <2,5 m/s	1	1	1	1	1	-	-	2	2	1	1	-	-	-
2,5- <3,0 m/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0- <3,5 m/s	-	-	1	1	1	2	2	1	1	1	-	-	-	-
3,5- <4,0 m/s	-	-	-	1	2	3	2	1	-	-	-	-	-	-
>4,0 m/s	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 6 Jet-Oberkante: Häufigkeit für bestimmte Scherbeträge (1960, 1961, 1962; 29 Fälle) bei Polarfront-Strahlströmen

und 9 km, die Jet-Oberkante dem Bereich zwischen 9 und 12,5 km Höhe. Abschliessend noch einige charakteristische Windprofile beim Auftreten eines troposphärischen Strahlstromes. Scherwerte von $>1,5 \text{ m/s}/100 \text{ m}$ werden am 31.1.1962, 12.00 GMT, bei einem Nord-Jet über Nancy in einer 1000 m mächtigen Schicht zwischen 4 und 5 km Höhe beobachtet, also schon in einer relativ niedrigen Höhe (Bild 16). Nochmals beachtliche Scherwerte treten im Bereich des Jet-Kerns sowohl an der Unter- wie an der Oberkante des Jets zwischen 8,5 und 10,5 km Höhe auf. – Übrigens ist an diesem Tage über Nancy auch in der untersten Troposphäre ein signifikantes Windmaximum zu finden. Bild 17 zeigt für den gleichen Tag die Windverhältnisse über Stuttgart. Zwischen 6 und 7 km Höhe treten hier Scherbeträge von $>2,4 \text{ m/s}/100 \text{ m}$ auf. Doch auch in den Höhen darüber werden bis zur Tropopause beträchtliche Windscherungen festgestellt. – Auch hier ist wieder ein niedertroposphärischer Jet-Stream mit dem Geschwindigkeitsmaximum in 2 km über NN und Scherwerten von $>1,5 \text{ m/s}/100 \text{ m}$ anzutreffen.

Das folgende Beispiel vom 12.1.1962, 12.00 GMT, von Stuttgart ist typisch für ein sogenanntes gestörtes Windprofil (Bild 18). Auffallend sind hier im Bereich des Strahlstromkernes ein sekundäres Windmaximum sowie wiederholte Zu- und Abnahmen des Windes in der Vertikalen. Derartige Windprofile sind an ganz bestimmte synoptische Bedingungen geknüpft, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Scherbeträge von $>2,5 \text{ m/s}/100 \text{ m}$ werden zwischen 7,5 und 8 km Höhe und von $>3,6 \text{ m/s}/100 \text{ m}$ an der Jet-Oberkante in einer über 1000 m mächtigen Schicht beobachtet.

Erwähnenswert ist noch, dass zum gleichen Termin an der 200 km weiter östlich gelegenen Station München-Riem eine überraschend ähnliche Windverteilung angetroffen wurde. Selbst die Scherbeträge stimmen weitestgehend überein. An der Jet-Oberkante lagen diese bei $3,92 \text{ m/s}/100 \text{ m}$. Zum Schluss meiner Ausführungen sei die Bemerkung erlaubt, dass nun sowohl die wissenschaftlichen Erkenntnisse als auch die technischen Bedingungen einen Stand erreicht haben, der eine praktische Ausnützung der atmosphärischen Scherströmungen für den dynamischen Segelflug möglich erscheinen lässt.

Literatur

1. Blackadar, A.: Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. Bull. Amer. Meteor. Soc. 38, S. 283-290, 1957
2. Bonner, W.: Climatology of the Low Level Jet. Monthly Weather Rev. 96, S. 833-850, 1968.
3. Uhlig, S.: Annalen der Meteorologie, Neue Folge, Nr. 5, 1971.
4. Podhorsky, D.: Niedere Strahlströmung über der Südwestslowakei. Probleme der Wettervorhersage. Tagung in Kühlungsborn, DDR, 1969.