Blindlandungen und die Einführung des ILS

HISTORISCHES ZUR GESCHICHTE DES INSTRUMENTENFLUGES
VON FLUGKAPITÄN PETER KLANT
Teil 2

n diesem zweiten Artikel über den Beginn des Instrumentenfluges werde ich der Suche nach dem elektronischen Gleitweg östlich und westlich des Atlantischen Ozeans nachgehen, der endlich zur "Blindlandung" führen sollte. Die heraufziehenden Kriegswolken Ende der 1930er-Jahre beschleunigten die Entwicklungen. Am Ende blieben zwei Systeme in der Endausscheidung: das ILS und der Ground Controlled Approach GCA. Welches System die Welt erobern würde, blieb bis Ende der 1940er-Jahre offen. Die neue United States Air Force feierte 1947 schon mal den Gewinner mit einem vollautomatischen Flug über den Atlantik ...

Was bisher geschah

Im September 1929 machte Jimmy Doolittle in den USA im Rahmen des Forschungsprojekts "Full Flight Laboratory" den ersten Start ohne Sicht aus dem Cockpit sowie die erste Blindlandung ausschließlich nach Instrumenten. Seine Arbeit ebnete den Weg zu den ersten Instrumentenanflügen.

Die Fähigkeit, Blindlandungen durchzuführen, ging aber in den 1930er-Jahren schnell verloren. Grund dafür war zum einen die Ent-



Einer der modernsten künstlichen Horizonte von 1925: Der Gyrorector der gleichnamigen Firma aus Berlin. Ein Monstrum mit 5,8 kg Lebendgewicht. Mit dem durch Fahrtwind betriebenen 110V Stromgenerator und Verkabelung 15 kg schwer wurde er 1929 von Doolittle getestet und für zu schwer und zu instabil für Instrumentenanflüge befunden. Außerdem funktionierte er – mangels Fahrtwind – nicht am Boden für den Start.

https://digital.deutsches-museum.de/item/79762/

wicklung schwererer und schnellerer Flugzeuge. So flog Doolittle die Consolidated NY-2 der Blindflugversuche im Endanflug mit 60 MPH¹, also fast 30 MPH langsamer als meine Piper Arrow von 1973. Mit schnelleren Flugzeugen konnten zudem im Linienverkehr keine "No-Flare"-Landungen, also ohne abzufangen, gemacht werden.

¹⁾ MPH - Miles per Hour (Statute Miles). 60 MPH sind ca. 52 kts.

Zum Zweiten benötigten die schwereren neuen Flugzeuge befestigte Start- und Landebahnen, die ab Anfang der 1930er-Jahre eingeführt wurden. Für diese schmalen Bahnen reichte – im Gegensatz zu den Landungen auf den großen, runden Grasplätzen – die Präzision von Radio Ranges, Radio Direction Finder und Funkpeilungen für Blindlandungen nicht mehr aus. Ewas Neues, Genaueres musste her ...

Wie wir uns den Instrumentenflug zu Beginn der 1930er-Jahre vorstellen müssen

Heutzutage ist der künstliche Horizont das Hauptinstrument für den Instrumentenflug. Für eine IFR-Lizenz muss man eine gründliche Ausbildung machen, die einen mit allen Aspekten der Instrumentenfliegerei bekannt macht, bevor man sich damit in den Wolken wiederfindet. Das war früher anders.

Im Deutschland zu Beginn der 1930er-Jahre gab es zwar schon Verkehrsfliegerei, aber noch keine klare Unterscheidung zwischen Sichtflug und Instrumentenflug. Die Piloten flogen los und vermieden die Wolken so gut es ging. War wohl auch besser so, denn eine Blindflugausbildung wurde z.B. bei der Deutschen Luft Hansa erst später eingeführt. Obwohl die Luft Hansa zwischen 1925 und 1929 insgesamt 50 künstliche Horizonte vom

1929 insgesamt 50 künstliche Horizonte vom Typ Gyrorector in ihren "Großflugzeugen" einsetzte, hatten die Besatzungen anfangs nur rudimentäre Einweisungen in den Blindflug erhalten. Das spiegelt sich auch in einer zeitgenössischen Werbeschrift der Firma Gyrorector G.m.b.H. von 1929 wider, in der es über die Luft Hansa heißt:

"Ein Pilot, der vor dem Zielflugplatz plötzlich in Nebel geriet, merkte, daß die Maschine abzustürzen drohte. Der GYRORECTOR zeigte, obgleich der Pilot es nicht für möglich hielt, eine erhebliche Schräglage und Schieben der Maschine an. In dieser gefährlichen Situation legte der Pilot die Maschine genau nach dem GYRORECTOR in die Horizontallage und gab Höhensteuer. Über dem Nebel zeigte sich, daß das Flugzeug die richtige Lage hatte, und der GYRORECTOR das Leben der Passagiere und Besatzung gerettet hatte ..."

Blindfluginstrumente wurden oft erst eingeschaltet, wenn man sie "wirklich" brauchte. Noch 1936, als die Lufthansa längst Blindflugkurse für ihre Piloten durchführte, war das Fliegen in den Wolken immer noch nicht Routine. Dass die Wolken vermieden werden sollten, spiegelte sich auch in den Vorschriften wider. So hieß noch 1936 in den "Sondervorschriften für die Durchführung von Schlechtwetterflügen und Schlechtwetterlandungen"2:

"4. Allgemeine Flugvorschriften
Das Durchfliegen einzelner Wolkenstücke
und Wolkenfetzen am unteren und oberen Rand geschlossener Wolkendecken
ist verboten. Ueber den Wolken ist das
Durchfliegen von Wolkentürmen, die auf
dem Kurs liegen und leicht umflogen
werden können, zu vermeiden.
Ist das Durchstoßen einer Wolkendecke
erforderlich, so muß dies auf dem kürzesten Wege geschehen.

Blindflüge zu Uebungszwecken sind auf das notwendige Maß zu beschränken, soweit sie außerhalb der vom R.d.L.³

²⁾ Die Fernmeldebetriebsordnung für die Verkehrsflugsicherung (FBO) in Frage und Antwort, Berlin 1936

³⁾ R.d.L. - Reichsminister der Luftfahrt

genehmigten Blindfluglehrgänge stattfinden."

Das Vermeiden von Wolkenflug hatte sicher auch seine Ursachen im fehlendem Vereisungsschutz für die Flugzeuge, der nach wie vor mangelhaften Blindflugausrüstung und der mangelnden Flugsicherung. Ein künstlicher Horizont war in Deutschland expressis verbis 1936 immer noch nicht vorgeschrieben. Als Blindflugausrüstung wurde – neben einem Funkgerät – lediglich gefordert:

"Bordinstrumente, die die Erhaltung der der normalen Fluglage des Luftfahrzeuges im Raum ohne äußere Sicht (Blindflüge) in beliebig langer Zeit gestatten." Und dazu musste oft ein Wendezeiger als einziges "Blindfluginstrument" herhalten.

In den USA war es nicht viel besser. Im ersten Teil des Artikels habe ich beschrieben, wie während des Luftpost-Desasters von 1934 in kürzester Zeit 13 Army-Air-Corps-Piloten starben, weil sie keine Ahnung vom Instrumentenflug hatten.

Jimmy Doolittle kehrte 1940 nach elf Jahren in der Privatwirtschaft in den aktiven Militärdienst zurück. Er war erstaunt, festzustellen, wie sehr das Air Corps mit der Instrumentenfliegerei hinterherhinkte. Mit seinem Dienstflugzeug, einer P-40, durfte er nur mit einer Ausnahmegenehmigung nach Instrumenten fliegen. Er schrieb dazu in seiner Autobiographie:

"Existing regulations and instructions prohibit intentional flight under instrument conditions in pursuit-type aircraft."⁴ Erst nach Doolittles Intervention erhielten die Jagdflieger zusätzliches Instrumentenflug-Training, und die Beschränkung wurde aufgehoben. Allerdings hatte sich der Nutzen

4) Pursuit-type aircraft - Jagdflugzeug

des künstlichen Horizonts – mehr als zehn Jahre nach Doolittles erster Blindlandung – immer noch nicht rumgesprochen. Noch 1942 gehörte er zu den "Secondary Flight Instruments". Primary Flight Instruments waren damals noch: Fahrtmesser, Wendezeiger und Variometer.



Die Primary Flight Instruments von 1942, hier von Pioneer⁵



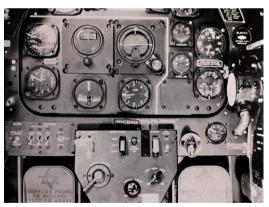
Der künstliche Horizont, hier von Sperry, gehörte noch 1942 zu den Secondary Flight Instruments. Er war mitunter irgendwo im Cockpit eingebaut, wo sich noch etwas Platz fand, nicht immer prominent im Blickfeld des Piloten.

Wie lange es gedauert hat, bis sich die Piloten vom Wendezeiger gelöst haben und den künstlichen Horizont als das Blindfluginstrument schlechthin akzeptiert haben, beschreibt der amerikanische Jagdflieger Leonhard "Kit" Carson, der 1942 ausgebil-

⁵⁾ Abbildungen aus: "Aircraft Instruments", New York 1942

det wurde und 1944 auf P51 Mustang Langstrecken-Begleiteinsätze zwischen England und Deutschland flog:

"The weather is mostly bad over this country. [...] There are a hundred days out of the year when you can't see one mile, but we fly anyway. It's not as hard as it sounds and the P-51 is a good weather airplane with gyro instruments. Forget the needle-ball-airspeed routine that they pounded into you in cadet training, or put it aside for the moment. The needle-ball routine is now a secondary backup to the gyros. The primary weather instruments on the panel are boxed in with yellow tape for emphasis; get familiar with using the artificial horizon and the gyro compass. With a little practice you can fly this airplane down to a frog's hair on instruments."6



Cockpit einer P51 Mustang 1944: eingerahmt mit heller Line das "Six-Pack" der Blindfluginstrumente. Inzwischen flogen die Piloten nach dem künstlichen Horizont.

Erst die systematische Ausbildung der Piloten im Instrumentenflug ab dem Beginn der 1930er-Jahre sowie die Ausrüstung der

Cockpits mit künstlichen Horizonten und Kurskreiseln ermöglichten es, Instrumentenanflüge einzuführen. In den USA waren das ab 1931 Radio-Range-Anflüge für die Zivilluftfahrt, Radio-Direction-Finder-Anflüge für das Militär. In Europa waren es die verschiedenen Funkpeilanflüge, wie das im ersten Teil des Artikels beschriebene ZZ-Verfahren, das erstmals 1933 routinemäßig eingesetzt wurde. Für Blindlandungen auf festen Runways reichte das nicht. Es fehlte nun noch etwas mehr Präzision und vor allem ein elektronischer Gleitpfad.

Die Lorenz-UKW-Funkbake – erster Gleitpfad in Europa

Im Europa der 1930er-Jahre wurde die Berliner C. Lorenz AG bald das führende Unternehmen für Funknavigation. Lorenz war an der Entwicklung der Funkpeilverfahren beteiligt gewesen, auch am ZZ-Anflugverfahren. Das ZZ-Verfahren hatte seine Nachteile: So waren die Peilungen durch atmosphärische Störungen nicht immer zuverlässig und der Peilflugleiter konnte nur ein einziges Flugzeug zur Landung führen. Ein Anflug, der den vorherigen Überflug des Flugplatzes erforderte, dauerte gut 20 Minuten. Kamen nun zwei oder drei Maschinen gleichzeitig in den Kontrollbezirk, gab es Verzögerungen und Umleitungen zu anderen Flughäfen.

Aufbauend auf dem ZZ-Verfahren wollte C. Lorenz⁷ unter der Leitung von Ernst Ludwig Kramar etwas Neues schaffen: Ein Funkleitstrahl sollte die Peil-Navigation in der Peilflugschneise ersetzen. Die Anzeigen sollten ins Cockpit. Das Vor- und das Haupteinflug-

⁶⁾ Zitat und Foto P51 Cockpit aus: "Pursue & Destroy" von Leonard "Kit" Carson, Granada Hills, California 1978

⁷⁾ Interessant ist, wem die deutsche C. Lorenz AG eigentlich gehörte: 1930 übernahm die US-amerikanische International Telephone and Telegraph Corporation (ITT) die Aktienmehrheit.

zeichen – vorher durch akustische Wahrnehmung vom Boden aus bestimmt – wurden durch Marker-Funkfeuer ersetzt. Der Leitstrahl ähnelte dem einer Low Frequency Radio Range mit einem "Punkt" und einem "Strich"-Sektor, dazwischen ein feiner Dauerton-Endanflug. Allerdings verwendete Lorenz eine Senderfrequenz im UKW-Bereich, die weniger wetteranfällig war. Außerdem wurde der Leitstrahl nicht akustisch, sondern mit einer Cockpitanzeige erflogen. Komplettiert wurde die vollständige Anlage durch eine Art Gleitpfad-Anzeige.



"Lorenzbake", das Lande-Funkfeuer (LFF) in Heston bei London. Heston war ein wichtiger "commercial diversionary airport", der oft angeflogen wurde, wenn Croydon wegen Nebel dicht war.⁸

Man kann sich das Ganze – vom Gleitpfad abgesehen – wie einen Vorläufer des Localizer-Anflugs vorstellen. Und genau so wurde der Anflug auch geflogen: Mit Step-Down-Höhen auf dem Endanflug, alles exakt wie schon beim ZZ-Anflug, nur dass die Navigation nun ganz beim Piloten lag. ZZ-Anflug und Lorenz-Anflug waren daher auch auf ein und derselben Karte eingezeichnet.

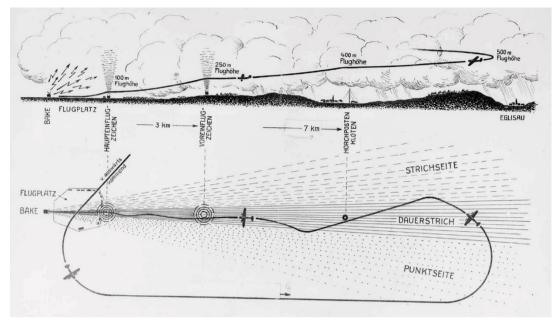
Das Lorenz-System wurde schnell akzeptiert, gekauft und aufgebaut. Sogar in England wurden Lorenz-Systeme in Lizenz gebaut und später an vielen Flugplätzen installiert. Auch in den USA wurde das System getestet.

Der Glideslope des Lorenz-Systems war der erste, der in der Luftfahrt eingeführt wurde. Aber er war alles andere als perfekt. Wie auch bei Versuchen mit ähnlichen Systemen in den USA dieser Zeit war der Gleitweg nicht gerade, sondern nach oben gebogen. Das bedeutete, je weiter man vom Flughafen weg war, umso steiler war der Gleitweg, bis er irgendwann nicht mehr fliegbar war. Um dem Gleitweg folgen zu können, musste er nahe am Flughafen intercepted werden, also in niedriger Höhe. Das bedingte einen nur kurzen, tiefen Endanflug. Nicht nur, dass der Gleitweg weiter draußen immer steiler wurde: Je näher man an den Platz kam, umso flacher wurde er. Daher konnte die Lorenz-UKW-Funkbake mit Gleitweg nur an Plätzen mit ausreichender Hindernisfreiheit eingesetzt werden. Wie flach man mit dem Lorenz-Gleitweg reinkam, illustriert eine Warnung für den Lorenz-Anflug auf Heston, bei London:

"Pilots are reminded that there is a fence 7 ft. high along the eastern boundary of the aerodrome."

Die erste Installation eines Lorenz-Lande-Funkfeuers wurde in Berlin-Tempelhof aufgebaut, wo auch der Sitz der Firma C. Lorenz war und der Sitz des Hauptnutzers, der Lufthansa. Die ersten Tests begannen 1932. Vermarktet wurde das System ab 1935. Der zweite Airport, an dem das Lorenz-System aufgebaut wurde, war der Flugplatz Düben-

⁸⁾ Abbildung aus "Aircraft Radio", London 1938



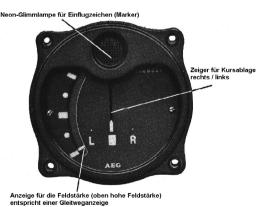
Lorenz-Funkbaken-Anflug auf Dübendorf bei Zürich. Man beachte, dass es neben den beiden Marker Beacons noch einen Horchposten bei Kloten gab. Das erlaubte drei Step-down-Höhen im Endanflug. Abbildung mit freundlicher Genehmigung des Autors aus: "Ein Beitrag zur Flugsicherungs-Geschichte" von Hans H. Jucker, Juli 2014.

dorf bei Zürich. Dübendorf war damals die Basis der Swissair bis zu deren Umzug auf den neuen Flughafen Zürich-Kloten 1948. Das Lorenz-System in Dübendorf wurde offenbar wegen dem hügeligen Gelände ohne den Gleitweg genutzt. Der Anflug war also das, was man heute als Localizer Approach bezeichnet.

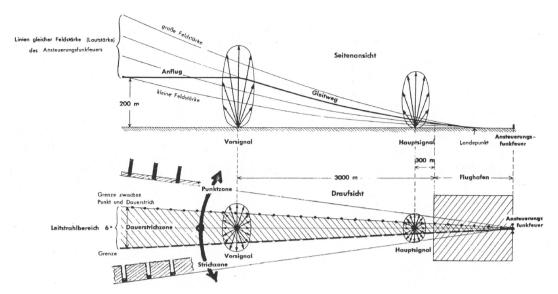
Nach einer Untersuchung des US Army Signal Corps von 1936 gab es in jenem Jahr bereits Lorenz-Systeme an 13 deutschen Flughäfen sowie in Zürich (Dübendorf), in Wien, in Paris (Le Bourget) und in London (Heston). Pläne für Lorenz-Anlagen gab es für Prag und Moskau, ein System war nach Japan verkauft worden.

Das Lorenz-System verwendete Frequenzen, die damals schon in internationalen Verträgen festgelegt waren: Das Lorenz-Lande-Funkfeuer arbeitete auf einer festen Frequenz von 33,33 MHz (militärische Anlagen verstell-

bar zwischen 30 bis 31,5 MHz). Die Marker Beacons sendeten auf 38 MHz und waren wie folgt moduliert: Das Voreinflugzeichen (später: Outer Marker) stand 3 km vom Flugplatz entfernt und sendete strichförmige Morsezeichen, moduliert mit einem tiefen



Cockpit-Anzeige AFN 1 für das Lorenz-System (AFN bedeutet: "Anzeigegerät für Funknavigation"). Anders als bei heutigen Localizer-Anzeigen bedeutet ein Zeigerauschlag in den linken Bereich: das Flugzeug ist zu weit links. Abbildung aus "Funklandegerät Fu BI 1", Deutsche Luftwaffe 1942.



Für den Gleitweg des Lorenz-Systems sollte das Feldstärke-Signal des Landekurssenders genutzt werden. Schon ein Jahr nach Einführung wurde der Gleitweg nicht mehr verwendet.

400 Hz Ton. Das Haupteinflugzeichen (später: Inner Marker) stand 300 m vom Flugplatz entfernt und sendete punktförmige Morsezeichen, moduliert mit einem hohen 1.700 Hz Ton. Zwar hatte man auch in Amerika die Vorteile der höheren Frequenzen für die Lande-Funknavigation erkannt. Nur sendete das Lorenz-System dummerweise in einem Band, das in den USA noch für andere Nutzer reserviert war.

Beim Blick auf die Antennenanlage der "Lorenzbake" am Flugplatz in Heston bei London stellt sich die Frage: Wo ist die Gleitweg-Antenne? Die Antwort ist einfach: Das Lorenz-System hatte keinen Gleitwegsender. Die Gleitweg-Anzeige im Cockpit wurde aus der empfangenen Feldstärke des Lande-Funkfeuers erzeugt.

Der Gleitweg beim Lorenz-System war eine Linie konstanter Feldstärke des Lande-Funkfeuers. So hatte man sich das jedenfalls gedacht. Die obige Zeichnung zeigt, wie das gemeint war. Der Anflug mit dem Lorenz-Gleitpfad war ursprünglich so vorgesehen: Kurz vor dem Vorsignal sollte die Maschine im Horizontalflug dem Landekurssignal folgen. Dabei wanderte die vertikale Nadel in der Anzeige langsam nach oben (Feldstärke erhöht sich). Wenn das Vorsignal überflogen wird (optisch und akustisch angezeigt), merkt sich der Pilot die Zeigerstellung der vertikalen Nadel. Egal, wo die dann steht: Das ist die Feldstärke für den richtigen Gleitweg. Der Sinkflug beginnt und der Pilot sollte die Nadel an dieser Position halten. Aus heutiger Sicht absolut verwirrend: Ging die Nadel nach oben, musste der Pilot nach unten korrigieren. Die Anzeige sowohl für die Kurs- als auch für die Gleitwegablage war also genau anders herum, als wir das heute vom ILS her kennen.

Es gab keine Möglichkeit, das Signal so zu kalibrieren, dass die horizontale Nadel am Vorsignal genau in der Mitte anzeigte. Die Feldstärke war sehr wetterabhängig, so wurde sie z.B. durch Regen gedämpft. Die Piloten vertrauten der Gleitweganzeige nicht, es war beängstigend, wie flach man am Ende vor dem Platz rauskam. Der Lorenz-Gleitweg war bereits eine halbe Meile vor dem Flughafen auf einen 1-Grad Gleitweg abgeflacht. Testpiloten, die den ähnlichen Glideslope des weiter unten beschrieben NBS-Systems erprobten, nannten das einen "mental hazzard". 1937 wurde von IT&T ein Lorenz-System in die USA importiert und in Indianapolis getestet und mit amerikanischen Installationen verglichen. Insbesondere das US Militär kritisierte, dass mit dem Lorenz-Gleitweg kein stabilisierter Endanflug geflogen werden konnte. Der immer flacher werdende Anflug erforderte stattdessen eine ständige Änderung von Fluglage und Power. Sehr bald wurde der Lorenz-Gleitweg überhaupt nicht mehr genutzt weder von der Lufthansa noch von anderen Airlines, Und auch nicht vom Militär.

Dennoch fand sich eine Verwendung für die vertikale Nadel, wie alte Handbücher des Lorenz-Systems zeigten: Da die vertikale Nadel die Ausgangsspannung des Empfänger anzeigte, konnte man daran – und nur daran – den Ausfall des Systems erkennen. Das war wichtig, denn es gab keine "OFF-Flagge". Im Gegenteil, bei Ausfall zeigte die Kursanzeige ein falsches On-course-Signal an und blieb in der Mitte.

Außerdem – so ein späteres Handbuch von 1943 – lasse die Anzeige "einen erfahrungsmäßigen Rückschluß auf die ungefähre Entfernung bis zum Flughafen zu."

Auch wenn sich die Gleitweganzeige der Lorenz-Empfänger im Alltag als unbrauchbar erwiesen hatte, so war die Lorenz-Funkbake dennoch ein Erfolg. Es war das erste System, mit dem in Europa in vielen Ländern routinemäßig Instrumentenanflüge ohne Fremdpeilungen möglich wurden. Weitere Anwendungen ergaben sich in der Strecken-Navigation: Das Alpenfunkfeuer (1938) hatte ich bereits im erste Teil des Artikels erwähnt. In Australien wurden Lorenz-Funkbaken für die Airway Navigation eingesetzt.

Im Zweiten Weltkrieg war die Lorenz-Landebake die Standard-Landehilfe für alle mehrmotorigen Flugzeuge der Deutschen Luftwaffe. Auch die Engländer nutzten ihre in Lizenz gebauten Lorenz-Anlagen unter dem Namen "Standard Beam Approach (SBA)" für ihre schweren Bomber, darunter die Lancaster⁹.

National Bureau of Standards (NBS) Glideslope

Das National Bureau of Standards hatte in den USA die Low Frequency Radio Ranges entwickelt und das System so modifiziert, dass es als Leitstrahl für die Landung verwendet werden konnte. Das war die NBS Radio Range, mit der Doolittle 1929 seine Blindlandeversuche durchführte. Ebenso wie die Lorenzbake verwendete das NBS-System Marker Beacons im Endanflug, Ein Wissenschaftler des NBS, Francis Dunmore, schlug vor, einen separaten Leitstrahl, den er "landing beam" nannte, zu verwenden, der eine vertikale Führung ermöglichen sollte. Der Glideslope war erfunden. Das komplette NBS-System mit Leitstrahl, Glideslope und Marker Beacons wurde 1930 erstmals beschrieben und bis 1934 getestet, u.a. in Newark, New Jersey. Die Idee war

⁹⁾ Der Grund, warum die Anlagen nur von mehrmotorigen schweren Flugzeugen verwendet wurden, war die schwere, klobige Röhren-Empfangsanlage, die nicht in die Jagdflugzeuge eingebaut werden konnte.

gut, aber das System floppte: Durch die niedrigen verwendeten Frequenzen war der Landekurs unstabil, wurde leicht durch Gebäude und das Gelände gestört, hatte Nebenkeulen und war wetterabhängig. Der Glideslope litt am selben Problem wie die Gleitweganzeige im Lorenz-Empfänger: Er war umso steiler, je weiter man vom Airport weg war. Das war vor allem ein No-go Item für das Militär. Für die neuen schwereren Kampfflugzeuge – der B-17 Bomber war in der Entwicklung (er flog erstmals 1935) wollte man einen längeren Endanflug haben. der einen geraden Glideslope erforderte. Die Airlines zeigten sich interessiert, wünschten aber Verbesserungen am Glideslope.

Das Bureau of Air Commerce verwarf das NBS-System 1934, die US Navy erprobte es unter der Bezeichnung YB weiter. Die Navy versuchte sogar, ihre portable Version in versiegelten Containern für zivile Anwendungen unter dem Namen "Air-Track" auf den Markt zu bringen. Aber wer kauft schon ein Landesystem, das man bei Fehlern nicht reparieren kann, weil man die Kisten nicht aufmachen darf? 1943 erlag das militärische YB-System seinen angeborenen Fehlern.

Neuer Versuch: United Air Lines & Bendix

Nicht nur staatliche Stellen arbeiten in den USA an der Entwicklung von Landehilfen. United Air Lines arbeitete eine Zeit lang mit Bendix an einem neuen System. Die Zusammenarbeit begann bereits 1934, nachdem United die Arbeit am eliminierten NBS-System übernommen hatte. Eine der ersten Aktionen war, den Landkurssender auf das UHF-Frequenzband umzubauen. Höhere Frequenzen, das hatte man bereits erkannt,

würden weniger Störungen des Signals bedeuten. Außerdem wollte man die Kosten reduzieren, indem man nur einen Sender sowohl für den Landekurs als auch für den Gleitweg benutzte.

Die wichtigste Innovation während der Zusammenarbeit mit Bendix war der Wechsel zu zwei unterschiedlich modulierten Gleitweg-Signalen ("Keulen"), auf dem Gleitweg hatten beide Signale die gleiche Stärke. Ganz so, wie heute ein grader Gleitweg erzeugt wird. Das System scheiterte jedoch. Es wurde nur an acht Flughäfen installiert. Die anderen Airports wollten mit Investitionen warten, bis sich die Regierung auf einen einheitlichen Standard geeinigt hatte. Das United-Bendix-System konnte sich nicht durchsetzen.

United hatte aber noch etwas anderes erkannt: Echtes Blindlandewetter gab es nur während 1 % der Zeit. Wolkenuntergrenzen unter 500 Fuß aber - dem damaligen Minimum - gab es während 5 bis 10 % der Zeit. Gelang es mit einem neuen System, dieses Minimum von 500 Fuß zu halbieren, könnten mehr als 50 % der wetterbedingten Delays vermieden werden. United Air Lines verabschiedete sich also als erste Airline vom Traum der "Blindlandung". Man kam zu einer pragmatischen Lösung: Das Instrumentenlandesystem sollte nur zu einem niedrigeren Minimum hinunterführen, die Landung selbst würde der Pilot nach Sicht machen. Eine weitsichtige Erkenntnis, die auch heute noch die Grundlage für manuelle ILS-Anflüge ist.

Nächster Versuch: ein VHF-System

Die Airlines machten Druck beim Bureau of Air Commerce (ab 1938 in der CAA aufgegangen, der Civil Aeronautics Administration). Sie wollten endlich ein einheitliches System für Instrumentenanflüge, das funktionierte. Anfang 1938 wurde ein Auftrag an die International Telephone Development Corporation (ITD) vergeben. ITD entwickelte für die CAA unter Verwendung eigener Patente ein System mit Localizer und Glideslope im VHF-Frequenzbereich. Der Glideslope war zwar immer noch gekrümmt, aber nicht mehr so störanfällig wie beim NBS System. ITD baute Testanlagen in Indianapolis auf. Alle vier Landerichtungen konnten so angeflogen werden ...

Microwave Landing System (MLS)

Die Idee, Mikrowellen für ein Landesystem zu verwenden, kam 1936 auf. Am Ende des Jahrzehnts arbeitete eine breite Allianz aus Civil Aeronautics Authority (CAA), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Air Corps, Stanford University und Sperry Gyroscope an dem neuen System, dem Microwave Landing System (MLS). Alles war neu. Zuerst einmal mussten geeignete Antennenanlagen entwickelt werden. Dann konnte 1938 das System erstmals getestet werden. Es stellte sich aber heraus, dass die mit der bestehenden Technologie mögliche Sendeleistung von nur drei Watt nur eine nutzbare Reichweite von einer Meile ermöglichte. Glücklicherweise gab es aber Neuentwicklungen in der Hochfrequenz-Technik. Am vielversprechendsten war eine neue Vakuum-Röhre mit dem Namen Klystron. Das Klystron wurde ab 1937 an der Stanford University entwickelt. Als die MLS-Leute das Klystron verwenden wollten, war das noch sündhaft teure Experimental-Physik. Von einem Serienprodukt war die Röhre noch weit entfernt. Immer wieder musste das

wertvolle Klystron zwischen dem Labor in Kalifornien, dem MIT und dem Flugplatz, an dem es getestet wurde, für Reparaturen hinund hergeflogen werden. 1938 ging man davon aus, dass das MLS noch mindestens drei Jahre von der Serienreife entfernt war.

Die Blindlandungen sind tot – aber es gibt eine Entscheidung

Weder mit dem Lorenz- noch mit dem NBSund auch nicht mit dem United-Bendix-System waren Blindlandungen auf Runways möglich. Eine große Enttäuschung für die Entwickler.

Auch der A1 Approach (mit zwei NDBs) des US Army Air Corps mit dem Radio Direction Finder war nicht wirklich für Blindlandungen geeignet. Nachdem das Platz-NDB in 150 ft überflogen worden war, wurde der Sinkflug mit 400 ft/min fortgesetzt. Bei Tests konnte so in 37 von 91 Versuchen eine sichere Landung erreicht werden. Der ganze Anflug dauerte locker 20 Minuten. Die Airlines lehnten dieses System ab.

Und zum NBS-System meinte ein Testpilot, der an der Erprobung beteiligt war, für eine sichere Blindlandung mit diesem System sei eine 500 Fuß breite Runway erforderlich. Die breiteste Runway der USA 1934 war 400 Fuß breit, es war die in Newark. Heute sind die breitesten Runways in der Regel nur 60 Meter breit (200 Fuß).

Dennoch war der Traum von der Blindlandung nicht ausgeträumt. Sowohl das Army Air Corps als auch das Bureau of Air Commerce wollten nicht aufgeben. Während die Airlines inzwischen forderten, schnell eines der bisher getesteten Systeme einzuführen, wollte das U.S. Army Air Corps unbedingt

einen graden Gleitweg. Für das US-Militär war es zudem sehr wichtig, dass ein gemeinsames, zivil/militärisch verwendetes System der Standard für Instrumentenlandesysteme wurde.

General Henry "Hap" Arnold¹o, der am liebsten auf das MLS gewartet hätte, verlangte 1939 eine unabhängige Untersuchung der bestehenden Landesysteme. Präsident Roosevelt beauftragte am 30. November 1939 die National Academy of Sciences (NAS) mit der Aufgabe, einen einheitlichen Standard für ein Instrumenten-Landesystem zu entwickeln. Die NAS stützte sich bei ihrer Arbeit auf Empfehlungen des Radio Technical Committee on Aeronautics (RTCA), das sich seit 1936 mit dem Thema befasst hatte. Am 13. April 1940 genehmigte Präsident Roosevelt den Bericht der National Academy of Sciences:

Danach sollte die CAA in einem ersten Schritt verbesserte Systeme mit einem 6 Meilen langen, graden Glideslope an zehn Airports installieren. Die Forderung von Piloten, den Gleitweg über der Runway für eine Blindlandung abflachen zu lassen, wurde fallengelassen. Gleichzeitig sollte das MLS weiterentwickelt werden. Später würde man weitersehen.

Die CAA lag schon in den Startlöchern und hatte über die Empfehlungen der NAS hinaus schon ein Budget für 25 Anlagen in 1940 und 1941 in der Tasche. Dann stellte sich heraus, das die CAA die Kosten für das System drastisch unterschätzt hatte: Das Geld für 1940 würde statt für die ersten zehn nur für vier Anlagen ausreichen. Die Airlines

10) General "Hap" Arnold, von 1938 bis 1941 Chef des United States Army Air Corps und anschließend bis 1946 Oberbefehlshaber der United States Army Air Forces lehnten das ab und weigerten sich, Empfänger zu kaufen. Erst bei mindestens sechs Anlagen würde sich diese Investition lohnen. Das Projekt war auf Grund gelaufen. Aber dann änderte sich alles ...

Die USAAF braucht einen Glideslope – sofort!

Am 7. Dezember 1941 überfielen japanische Trägerflugzeuge Pearl Harbour. Amerika war im Krieg. Die Erfordernisse der U.S. Army Air Forces nach dem Kriegseintritt der USA machten nahezu unbegrenzte Mittel frei. Die USAAF förderte vier Programme gleichzeitig. Man hoffte, eines davon würde schnell einen brauchbaren Gleitweg zustande bringen:

- Aufbauend auf dem finanziell gescheiterten CAA-System von 1940 sollte ein grader VHF Equi-Signal Glideslope entwickelt werden.
- Ein 10 cm Continuous Wave (CW) Mikrowellen System. Der Auftrag ging an die Sperry Gyroscope Company.
- Ein 10 cm Pulsed Glide Path (PGP), an dessen Entwicklung das MIT Radiation Lab bereits von sich aus begonnen hatte.
- Und als letzten Strohhalm suchte man nach einer radar-basierten Lösung. Mit diesem Projekt wurde ebenfalls das MIT Radiation Lab beauftragt.

In die Röhre geschaut – die beiden Mikrowellen-Projekte

Man kann es drehen, wie man will, die Entwicklung der Mikrowellen-Landesysteme der 1940er Jahre scheiterte an den Röhren. Um die hohen Mikrowellen-Frequenzen mit aus-

reichender Leistung zu erzeugen, hatte man sich - wie bereits erwähnt - auf das an der Stanford University entwickelte Klystron eingeschossen. Damals war das noch ein hochkomplexes, anfälliges Bauteil, das nur in den Labors zu finden war. Bei den Tests blieb des Öfteren beim Ausfall des Klystrons die ganze Anlage lange außer Betrieb. Auf die Schnelle gab es keine Ersatzteile. Das Mikrowellen-Landesystem selbst funktionierte zumindest in ersten Tests. Während an der Stanford University die Röhre entwickelt worden war, machte das MIT daraus den ersten Gleitweg-Sender. Im Wiki der "Engineering and Technology History" findet sich zum Klystrons u.a. folgende Notiz:

"On February 29, 1939, the equipment was set up at the Boston airport and a plane successfully blind-landed before a group of top military officials."



Die Forscher und Erfinder Varian und Russell (o.l. und u.l.) mit dem für die Blindlande-Versuche 1939 verwendeten Klystron [Wiki]

Eine andere evtl. für ein MLS geeignete Hochfrequenz-Röhre war das britische Magnetron, das den Amerikanern im Technologieaustausch angeboten wurde. Das streng geheime Magnetron war das Rückgrat der britischen Radar-Technologie im Zweiten Weltkrieg. Das von den Engländern

gewünschte Technologie-Austauschprogramm wurde voll umgesetzt. Die Engländer erhielten das leichte Klystron und verbauten es später in den Radar-Empfängern ihrer Bomber. Die Amerikaner stürzten sich auf das Magnetron, ein essentielles Bauteil der ersten Radaranlagen.

Tolle Röhren oder nicht - die US Army Air Forces entschieden sich am Ende gegen das Mikrowellen-Landesystem. Man wollte schnelle Resultate für die Landeproblematik und vor allem ein System, das sich im Feld einfach und unkompliziert mit den gängigen Röhren reparieren ließ. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Entwicklung weitergeführt. 1978 erreichte das MLS den Status eines ICAO-Landesystems, es sollte ab 2010 die ILS-Anlagen ersetzten. Noch 1979 mussten wir an der Verkehrsfliegerschule die Grundlagen des MLS lernen. Aber eingeführt wurde es niemals. 1994 verabschiedete sich die FAA vom MLS zugunsten des Wide Area Augmentation Systems (WAAS), das mit dem GPS arbeitet. Die letzte MLS-Anlage der FAA wurde 2008 deaktiviert, die letzte Anlage in Europa - eine Testinstallation in London Heathrow - wurde 2017 außer Betrieb aenommen.

AN/SCS-51 – die Mutter aller ILS-Anlagen

Hinter dem Kürzel AN/SCS-51 versteckt sich eine modifizierte militärische Version des CAA-Instrumenten-Landesystem von 1940. Als eines der vier Projekte, schnell zu einem elektronischen Gleitweg zu kommen, sammelten die US Army Air Forces die Reste des finanziell gescheiterten Systems der CAA ein. Man wollte den CAA Localizer sowie die Marker Beacons verwenden, die in Indiana-

polis getestet worden waren. Dazu sollte noch ein neuer VHF-Glideslope-Sender entwickelt werden, der einen graden Gleitweg mit ausreichend großer Reichweite ausstrahlte. Es gab eine Ausschreibung, an der sich True-Track, Bendix und die International Telephone Development Company (ITD) beteiligte. Die ITD erhielt am Ende den Auftrag, das System fertig zu entwickeln. Das Unternehmen hatte schon für die CAA daran gearbeitet.

Der Plan war, ein vollständig mobiles und modulares Instrumenten-Landesystem zu entwickeln. Alle Sender, Generatoren und Antennen sollten auf Standard US Army LKWs integriert werden. Das System sollte im Layout so vereinfacht werden, dass es einfach zu bauen und vor allem auch einfach zu reparieren sein würde.

Die ersten Probleme gab es bei der Inspektion der Testanlagen in Indianapolis. Die Antennenanlagen und die Sender passten überhaupt nicht mehr mit der vorhandenen Dokumentation zusammen. Wie häufig bei solchen Test-Projekten war das System ständigen, leider nicht dokumentierten Änderungen unterworfen gewesen. Mittels "Reverse-Engineering" musste erst mal herausgefunden werden, wie die Anlage überhaupt ausgelegt war. Dann musste das Layout nochmal für schnelle Produktion und Mobilität modifiziert werden. Als wichtiger Schritt wurden alle Spezialteile und -röhren der Elektronik eliminiert und die Geräte so umkonstruiert, dass ausschließlich Standard-Radio-Röhren verwendet werden konnten. Um einen speziellen Gleitwegsender und damit Röhren einzusparen, verwendete man einen Frequency Multiplyer, der die Localizer Frequenz von 110 MHz auf 330 MHz brachte. Diese Frequenz wurde

dann in die Gleitweg-Antenne eingespeist. Das SCS-51 hatte nur ganz wenige feste Frequenzpaare. Da die Flugplätze weit genug auseinanderlagen, war das damals noch kein Problem.



Der portable Localizer-Sender AN/MRN-1, montiert auf einem Standard Army Truck, war Teil des AN/SCS-51 Instrument Landing Systems.¹¹

Man wusste gleich zu Beginn des Projekts, dass das Schwierigste die Entwicklung des Glideslopes sein würde. Daher sollten zuerst alle anderen Bestandteile des Systems, wie Localizer und Marker Beacons, unmittelbar nach Produktion an einer ganzen Kette von Flughäfen installiert werden, die von den USA über Kanada, Grönland und Island nach England führte. Die Luftbrücke, auf der die Kampfflugzeuge nach Europa geflogen wurden, war schon in vollem Betrieb. Den Piloten standen bis zur Einführung des SCS-51 lediglich ein paar Radio Beacons zur Verfügung. Die CAA erhielt Ende 1941 eine Million Dollar, um schon mal Localizer und Marker Beacons auf der amerikanischen Seite der Luftbrücke zu installieren. Diese Fest-Installationen, die natürlich auch zivil genutzt werden sollten, kamen aber nicht in die Gänge,

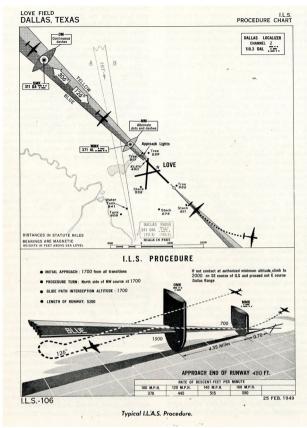
¹¹⁾ M. E. Montgomery, "Latest Type AAF Blind Landing Equipment," Electronic Industries (January 1945)

weil zivile Projekte kriegsbedingt ganz unten auf der Prioritätenliste standen. So kam es, dass auch in den USA anfangs keine Festinstallation des neuen Instrument Landing Systems ILS verbaut wurden, sondern später überall die portablen SCS-51 Geräte der Army Air Froces standen.

Ende 1942 war der neue Gleitwegsender soweit, im Test gegen die beiden Mikrowellen-Landesysteme anzutreten. Das VHF-Svstem überzeugte, und die Army Air Forces bestellten auf der Stelle 350 Einheiten, die fortan - zusammen mit dem Localizer-Sender und den beiden Marker Beacons - die Bezeichnung "AN/SCS-51" trugen. Die Mikrowellen-Leute waren draußen und das erste Instrumenten-Lande-System der Welt, das ILS, ging in Serienproduktion. Ein Jahr später, Ende 1943, war die gesamte Ferry-Strecke von New York (Newark und Mitchel Field) bis nach Neufundland mit SCS-51-Systemen ausgestattet. Nadelöhr der ganzen Idee war aber die Mas-

senproduktion der Bordempfänger. Die Bomber, die die USA Richtung England verließen, kamen ja nicht wieder zurück. Die Verluste in Europa waren sehr hoch und es dauerte viele Monate, bis die Empfänger-Produktion ausreichend für die meisten neu gebauten Bomber war.

Etwas anderes, ebenfalls Neues, musste zusammen mit dem ILS eingeführt werden: Sowohl der militärische und auch der zivile Flugverkehr – gerade im Nahbereich von New York – hatte so stark zugenommen, dass es zu chaotischen Situationen gekom-



Früher ILS-Anflug auf Dallas Love Field von 1949. Man beachte die niedrige Initial Approach Altitude von nur 1.700 Fuß. Unter der Karte steht "Typical I.L.A.S. Procedure". Frustriert von der fehlenden Möglichkeit einer "Blindlandung" wurden die ILS-Anflüge anfangs auch häufig mit ILAS bezeichnet: Instrument Low Approach Procedure.

men war. 1942 wurde daher eine gemeinsame Kommission der CAA und der Army Air Forces eingesetzt, die erstmals standardisierte Instrumenten-Anflugverfahren entwickeln sollte. Bis 1942 gab es zwar schon standardisierte Verfahren für die Enroute-Navigation, aber die Anflugverfahren waren an jedem Flugplatz anders. Da zudem der neue Glideslope mehrere (steilere) Nebenkeulen aufwies, musste der Anflug sowieso streng nach festen Verfahren erfolgen. Der Glideslope musste in einer immer noch relativ niedrigen Höhe in Horizontalflug angeflogen werden. Nur so konnte man sicher sein,

dass man den richtigen – den flachsten – Glideslope erwischt hatte.

Die Einführung des ILS in den USA ging also einher mit der Einführung von den ersten Standard Instrument Approach Procedures.

Die Situation in England Anfang der 1940er-Jahre

Europa war seit 1939 im Krieg. Deutschland war natürlich der größte Feind der Royal Air Force und später auch der der US Army Air Forces. Aber der zweite Feind war das europäische Wetter. Man schätzt, dass im schlimmsten Kriegswinter 1944/45 nahezu die Hälfte der Verluste der eingesetzten Bomber erst bei den Landeversuchen in England erlitten wurde. Nicht nur, dass die Bomber im vernebelten England ihre Flugplätze wiederfinden mussten, manche Angriffe wurden mit über 1.000 Bombern geflogen. Nach der Rückkehr mussten hunderte Bomber in kürzester Zeit landen. Kollisionen in den Wolken oder Flüge in Hindernisse oder Hügel bei der Rückkehr waren an der Tagesordnung. Zur Landung nahmen die Bomberpiloten alles, was sie hatten, um zurückzufinden: Den Standard Beacon Approach, wenn verfügbar, das GEE-Flächennavigationssystem und die ganz Glücklichen das Bordradar, mit dem sie in Deutschland ihre Ziele gefunden hatten. Am untersten Ende der Nahrungskette waren die Begleitjäger, die über keine Navigationsausrüstung zur Landung verfügten. Der bereits erwähnte P51 Mustang Pilot und Jagdflieger Leonhard "Kit" Carson beschrieb die Navigation bei der Rückkehr nach England so:

"Britain is 600 miles long, you can't miss it. If I'm alone on the return flight I always climb to nearly maximum altitude, about 38,000 feet, for many reasons. [...] ...it puts you high enough that as you approach the channel coast you can see any holes in the overcast for great distances.

When you've crossed the enemy coast coming out you've got to start letting down. If it's really socked in down to the water be cautious about your rate of descent in the last 500 feet. The barometric pressure has probably changed a little so your altimeter might be a couple of hundred feet off. Reduce your rate of descent to 50 feet per minute but I wouldn't go below 300 feet indicated altitude. If you don't see the water or ground by then pull back up to a thousand feet, relax for a couple of minutes and try again. These fog patches are spotty and you'll probably make contact on the second or third try. Fortunately, England is flat, at least in the south and east, and once over land the ceiling and visibility usually improve a bit so you'll be able to get in ..."

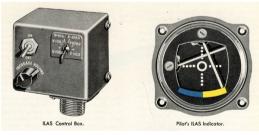
Die Bomber der Royal Air Force benutzen hauptsächlich den Standard Beacon Approach SBA, also das lizenzierte deutsche Lorenz-System ohne Gleitweg. Auch die Stützpunkte der USAAF-12Bomber waren mit dem SBA ausgerüstet. Unglücklicherweise standen den amerikanischen Bombern aber nur wenige SBA-Empfänger zur Verfügung. Auch bei den Engländern sah es bald schlecht aus: Ab 1943 verabschiedet sich die RAF weitestgehend vom Standard Beacon Approach, weil mehr Bomber ver-

¹²⁾ Am 20. Juni 1941 wurde aus dem "US Army Air Corps" die "United States Army Air Forces" USAAF.

lorengingen, als SBA-Empfänger gebaut werden konnten.

Um die Abstürze trotz Kriegsbedingungen zu minimieren, wurden Bombenangriffe abgesagt, wenn die Wolkenuntergrenze zur Landung unter 500 Fuß (USAAF, Tageinsätze) bzw. unter 1.000 Fuß (RAF, Nachteinsätze) vorhergesagt waren.

Nachdem 1943 die Ferry Route über den Atlantik mit SCS-51 ausgerüstet war, kam im Januar 1944 das erste SCS-51-System nach England. Zwei Wochen lang wurde es in Defford getestet und den USAAF- und RAF-Generälen demonstriert. Unmittelbar darauf wurde beschlossen, die RAF und die USAAF-Flugplätze mit SCS-51 auszurüsten. Erst mal wurden 30 Systeme bestellt und – auf der US-Seite – auch genug Empfänger für die gesamte amerikanische Bomber- und Transportflieger-Flotte.



Frühe ILS-Bordinstrumente. Die SCS-51 und die ersten zivilen ILS-Anlagen verfügten nur über sechs Frequenzen.

Mit ausschlaggebend für die Entscheidung, das SCS-51 sofort in Europa einzuführen, war eine Demonstration eines ehemaligen Sperry-Gyroscope-Mitarbeiters. Der hatte einen Converter gezeigt, der die Ausgangsignale des Localizer-Empfängers in den Autopiloten einspeisen konnte. Die Idee zu diesem sog. Approach Coupler wurde von der US-Army-Air-Forces-Führung sofort aufgenommen. Ein Crashprogramm wurde aufgelegt, Approach Coupler für die verschie-

denen verwendeten Autopilot-Systeme zu entwickeln. Der Approach Coupler sollte die Piloten entlasten, aber auch die Trainingsanforderungen an die Piloten reduzieren. Denn eine Ausbildung im Fliegen nach den ILS-Anzeigen hatten die jungen Bomberpiloten nie erhalten. Es gab auch noch keine Simulatoren, obwohl die ersten Link-Trainer schnell auf SCS-51-Anzeigen umgerüstet wurden. Die Bombercrews erhielten die Einweisung auf das System in ihren Flugzeugen an den Einsatz-Flugplätzen.

Die Entwicklung der Glideslope-Sender war 1943 abgeschlossen. Dennoch dauerte es bis Anfang 1945, bis die SCS-51-Anlagen in Europa damit ausgerüstet werden konnten. Danach verbreitete sich das System sehr schnell überall auf der Welt, wo die USAAF mit ihren Bombern und Transportfliegern im Finsatz war.

GCA – Ground Controlled Approach

Das vierte Programm, das das US Army Air Corps unterstützte, war die Suche nach einem irgendwie gearteten radar-basierten Gleitweg. Mit dem Programm wurde das MIT Radiation Lab beauftragt. Die Wissenschaftler, die sich das Labor für die schwierige Aufgabe holten, waren keine Leute aus der üblichen Radio-Ecke. Es waren Nuklear-Physiker, die sich mit Hochfrequenz beschäftigt hatten und an den Zyklotron¹³-Experimenten beteiligt waren. Diese "Zyklotronisten", wie ein Historiker sie nannte, hatten keine Angst vor großen Projekten und ließen sich auch nicht vom Protokoll aufhalten. Die idealen Typen für ein Crash-Programm.

Zwei von den Leuten, die später das GCA-System entwickelten und testeten, kennt

¹³⁾ Ein Zyklotron ist ein Teilchenbeschleuniger.

man heute noch: Von dem einen kennt keiner den Namen, aber es weiß jeder, was er später herausgefunden hat. Von dem anderen kennt jeder den Namen, weiß aber nicht, was er mit dem GCA zu tun hatte:

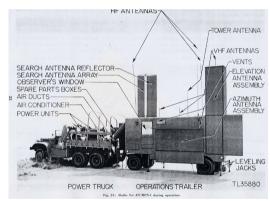
Die erste Person war der Nuklear-Physiker, Pilot, Erfinder und spätere Nobelpreisträger Luis Alvarez, der die Idee zum GCA hatte. Später ist er bekannt geworden, weil er 1980 zusammen mit seinem Sohn Walter – einem Paläontologen – herausgefunden hatte, dass die Dinosaurier durch einen Asteroideneinschlag ausgerottet worden waren (da haben wir noch mal Glück gehabt).

Die zweite Person war der Science Fiction Autor Arthur C. Clarke, der später "2001: Odyssee im Weltraum" geschrieben hat. Von Clarke weiß man heute sicher nicht mehr, dass er auch Physiker war und im 2. Weltkrieg als Offizier und Radartechniker an der Erprobung des GCA beteiligt war. Ihm wurde die Erprobung des GCA und die Ausbildung der (meist weiblichen) Operators übertragen. Über diese Tätigkeit in England veröffentlichte Arthur C. Clarke 1963 seinen einzigen Nicht-Science-Fiction Roman "Glide Path".



Der Atom-Physiker, Pilot und Erfinder Luis Alvarez vor dem B-29 Bomber "The Great Artiste". Nachdem Alvarez den GCA erfunden hatte, arbeitete er in Los Alamos mit an der Atombombe. Als wissenschaftlicher Beobachter begleitete Alvarez mit dieser Maschine die "Enola Gay" beim Abwurf der Atombombe über Hiroshima. [Wikipedia]

Die Idee zum Ground Controlled Approach kam Alvarez im August 1941. Auf einem Dach war er bei einer streng geheimen Demonstration des XT-1 Radars zugegen. Das XT-1 Radar war ein experimentelles Leitradar für eine Flugabwehrkanone. Wenn dieses Radar ein anfliegendes feindliches Flugzeug in allen drei Dimensionen erfassen konnte, so dachte sich Alvarez, dann könnte es auch ein landendes Flugzeug erfassen. Und nach den Radardaten könnte man den Piloten vom Boden aus "heruntersprechen". Diese Transferleistung legte den Grundstein zur Entwicklung des Ground Controlled Approach GCA, wie er noch heute - 79 Jahre später - immer noch geflogen werden kann.



Nicht schön, aber genial: Das portable "Mark 1" AN/MPN-1 System 1944. Die erste Anlage, mit der der Ground Controlled Approach GCA möglich wurde. [Wikipedia]

Alvarez erhielt für die ersten Versuche zu seinem neuen System den Prototypen des XT-1 Radars. Damit kam man aber nicht weiter, weil sich zeigte, dass das Gerät Boden-Spiegelungen des Flugzeugs erfasste. Das System musste von Grund auf geändert werden. Erst nachdem man statt nur einer drei Radarantennen verwendete, gab es Fortschritte. Eine Antenne erzeugte ein Rundum-Radarbild (entsprach dem heutigen SRE-Surveillance Radar Equipment). Eine weitere

Antenne bewegte sich rasch hoch und runter und erzeugte so einen Querschnitt des Gleitwegs. Die dritte Antenne bewegte sich in einem schmalen horizontalen Sektor rasch hin und her und erzeugte ein Bild um die Anfluggrundlinie. Das komplette System wurde in und auf einem Trailer installiert, der aussah wie ein Möbelwagen. Oben drauf und an der Seite waren die Antennen, drinnen die Radar-Elektronik und die Operator-Arbeitsplätze. In der Zugmaschine waren der Generator und die Klimaanlage untergebracht. Nach erfolgreichen Tests in den USA wurden zügig nahezu hundert Einheiten des Geräts bestellt, das nun die Bezeichnung AN/MPN-1 erhielt. Die Auslieferung verzögerte sich aber bis 1945.

Es gab viele Gründe für die Verzögerung. Einer davon war, dass Alvarez mit der ersten Version "Mark 1" unzufrieden war und das Ganze noch mal umbauen ließ. Es gab mechanische Probleme mit den Zahnrädern für die Antennen, Arthur C. Clarke beschrieb in seinem Roman "Glide Path", wie ein Getriebeschaden den "Mark 1" unbrauchbar machte. Das ist auch tatsächlich 1944 in England so passiert. Die Produktion wurde auch dadurch erschwert, dass der "Mark 1" für die Entwicklung des Serienmodells in den USA nicht zur Verfügung stand. Alvarez hatte das Gerät – nach schweren wetterbedingten Verlusten von RAF und USAAF – nach England verschiffen lassen, um es dort weiter zu testen und zu demonstrieren.

Warum machte man überhaupt mit der Entwicklung des GCA weiter, wo man doch mit dem ILS ein praktikables System für Schlechtwetterlandungen gefunden hatte? Der Grund dafür war, dass die schweren Röhrenempfänger des ILS ebenso wie die

des Lorenz- oder SBA-Systems nicht in die einmotorigen Jagdflugzeuge eingebaut werden konnten. Der Ground Controlled Approach würde, wenn er denn endlich da wäre, auch Schlechtwetterlandungen von Fightern ermöglichen.

Arthur C. Clarke schilderte in "Glide Path" sehr anschaulich,14 wie das System funktionierte: Die Anlage wurde neben der Runway aufgebaut und mithilfe von festen Radar-Reflektoren am Flugplatz kalibriert. Die Crew im Trailer bestand aus mehreren Personen, die reibungslos in "Echtzeit" als Team funktionieren mussten. Ein "Traffic Director" führte das Flugzeug nach dem Rundumsichtgerät über Funk an den Endanflug. Drei sog. Tracker verfolgten das Radarecho auf dem Final und führten mit jeweils einem Cursor die drei Rohdaten Höhe. Richtung und Entfernung ins System. Die Ergebnisse der Tracker wurden dem Approach-Controller, der die Maschine über Funk runtersprach, auf drei Anzeigen mit Zeigern als Ablagen bzw. Entfernung angezeigt.

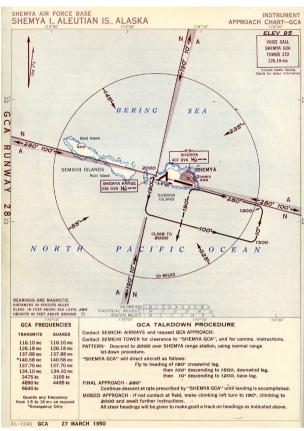
Der Ground Controlled Approach fand schnell weite Verbreitung in aller Welt. Den weltweit bedeutendsten Einsatz des GCA gab es während der Berliner Luftbrücke (1948–1949), wo das System als die Hauptlandehilfe der "Rosinenbomber" eingesetzt wurde. Mit dem GCA war endlich auch eine Landehilfe für Jagdflugzeugen vorhanden. Noch bis in die 1960er-Jahre waren viele Militärpiloten vom GCA abhängig, weil sie im Cockpit keine ILS-Empfänger hatten. Früher gab es GCA-Anlagen auch auf Verkehrsflug-

¹⁴⁾ Arthur C. Clakes Buch ist ein Roman. Clarke versäumte nicht, darauf hinzuweisen, dass alle handelnden Personen "frei erfunden" seien. Im Gegensatz dazu war die technische Beschreibung des GCA-Systems erstaunlich präzise und korrekt.

häfen. So überwachte bis in die 1990er-Jahre ein GCA-System den Endanflug auf die Bahn 31 in Kai Tak, Hongkong, der wie der Abflug von der Bahn 13 durch das enge "Lei Yue Mun gap" führte. Man wollte keine Flugzeugwracks mehr an den Hängen von Hongkong Island haben. Beim nächtlichen Abflug von der 13 mussten wir auf Boeing 747 vor dem Start den GCA-Controller rufen, der den Abflug auf dem Back-Course des ILS überwachte. Meine letzten beiden GCA-Anflüge habe ich 1992 auf Boeing 747 in Hongkong gemacht (Kai Tak Runway 31) und 1996 mit der Boeing 737 in Rostock-Laage geflogen. Auch heute noch gibt es die Möglichkeit, zur Übung mal einen GCA-Approach an einem Militärflugplatz zu fliegen. Lohnt sich! Wer seinen Heading und seine Rate of Descent stabil fliegen kann, kann auch ein GCA fliegen. Man braucht keine Anflugkarte.

FIDO – Fog, Intensive Dispersal of

Im ersten Teil meines Berichts habe ich über die ersten Versuche berichtet, die 1929 im Rahmen des "Full Flight Laboratory" gemacht wurden, um den Nebel zu vertreiben. Mit Beginn der britischen Bomber-Offensiven gegen Deutschland wurde die Idee in England wieder aufgenommen. Leider sprengt die Beschreibung des spektakulären FIDO-Systems den Rahmen dieses Artikels. Ich hoffe, dass ich später noch einmal darüber berichten kann.



1950: Fünf Jahre nach der Einführung des GCA sind schon viele Flugplätze der US Air Force damit ausgerüstet, wie hier am Ende der Welt auf Shemya Island im äußersten Westen der Aleuten. Für einen GCA-Approach sind eigentlich keine Karten erforderlich. Der Controller übermittelt alle relevanten Daten über Funk.

Ein Streit bricht aus: ILS oder GCA?

Weder ILS noch GCA spielten durch ihre späte Serienreife eine entscheidende Rolle im Zweiten Weltkrieg. Dennoch fanden beide Systeme entlang sämtlicher weltweiter Routen und Flugplätze der USAAF-Transportflieger, -Bomber und -Jagdflieger eine weite Verbreitung. Nach Ende des Krieges waren die ehemals führenden Navigationssysteme des besiegten Deutschlands verschwunden. Die Transportflieger und die Verkehrsflieger der frühen Nachkriegszeit nutzen überall die vorhandenen portablen AN/SCS-51-Instru-

menten-Landessysteme. Und natürlich auch die GCA-Anflüge.

Wie sollte nun das große Netz der zivilen Flughäfen – vor allem in den USA – ausgebaut werden? Heute wissen wir, wie es ausging: Das ILS würde das Rennen machen. Aber damals gab es unerwartet Streit: Die amerikanische AOPA (Aircraft Owners and Pilots Association), die auch heute noch sehr wirkungsvoll die Interessen der Allgemeinen Luftfahrt vertritt, wehrte sich heftig gegen die Einführung des ILS. Es gelang der AOPA mit einer unglaublich effektiven Kampagne. auch die Medien auf ihre Seite zu ziehen: Das GCA sei das System der Zukunft, es solle an allen zivilen Flughäfen installiert werden. Heute erscheint der Streit unverständlich. Warum sollte sich ausgerechnet eine Piloten-Vertretung gegen die Einführung des II S wehren?

Die Bedenken der AOPA waren damals durchaus nachvollziehbar: Mit einer Einführung des ILS wäre die gesamte Allgemeine Luftfahrt aus dem zivilen Instrumenten-Flug-System der USA ausgesperrt gewesen. Ein Einbau der damaligen schweren Röhrenempfänger in einmotorige Flugzeuge war nicht möglich.

Der Streit begann eigentlich schon 1945, unmittelbar nach Kriegsende. Die US Navy nutzte GCA, die USAAF auf dem Papier ebenfalls. Trotzdem hatte die USAAF überall auf dem Kontinent das portable AN/CSC-51-System und feste ILS-Anlagen installiert. Viele GCA-Geräte waren eingelagert, weil geschultes Personal fehlte. Auch die CAA bevorzugte damals das ILS.

Der Streit um das ILS führte letztendlich zu einer aufwendigen Anhörung vor dem U.S. Congress vom Januar bis zum Mai 1947. Die Hearings "On Safety in Air Navigation" wurden gut protokolliert, so dass man heute noch alles genau nachlesen kann. Allein die Protokolle von den Anhörungen im Januar 1947 umfassen ca. 1.500 Seiten, wobei das Thema GCA-ILS nur eines unter vielen dieser Anhörung war.

Die US Navy behauptete, das GCA sei billiger, obwohl eine GCA-Installation an Land ungefähr doppelt so viel kostete, wie ein ILS. Außerdem – so die Navy – seien die Trainingskosten viel niedriger. Man müsse nicht tausende Piloten für das GCA ausbilden, sondern nur wenige GCA-Operator.

Die USAAF dagegen betonte, GCA und ILS würden sich gegenseitig ergänzen. Ein vernünftiger Standpunkt, der auch den damaligen Flugbetriebsanforderungen des Militärs entsprach.

Die CAA als zivile Luftfahrtbehörde machte sich für das ILS stark, sie hatte viele der militärischen ILS-Anlagen übernommen und wollte sie nun für den zivilen Luftverkehr nutzen.

Egal, wie das Hearing ausgehen würde, eines war der CAA ganz klar: Das ILS würde als nationaler Standard kommen. Niemals würde der Congress die Mittel genehmigen, die die CAA für die Einführung des GCA als Standard benötigen würde. Die Kosten und technischen Probleme des GCA waren es letztlich auch, was die CAA in den Hearings anführte: Das ILS und seine Installationskosten waren durch den Congress bereits abgesegnet. Geld für das GCA war in den Gesetzen überhaupt nicht vorgesehen.

Während beim militärischen GCA die Anlagen nur kurz in Betrieb waren – beim Abflug der Kampfflugzeuge und später, wenn der Pulk zurückkam – müsste eine zivile GCA-Anlage u.U. rund um die Uhr verfügbar sein. Wie das mit der zu erwartenden technischen

Einsatzbereitschaft zu vereinbaren sei, das konnte man sich nicht erklären: Die CAA hatte 1946 ein AN/MPN-1 für Tests zur Verfügung. Die Anlage benötigte in 1.600 Betriebsstunden 900 Stunden Wartung. Bei 600 verbauten Radioröhren und tausenden manuellen Lötstellen im System kein Wunder. Außerdem hatte man der CAA gerade erst das Geld fürs Personal gekürzt. Für jede GCA-Anlage müsste die CAA mindestens sieben Operators einstellen und ausbilden. Die AOPA brachte nochmal vor. es sei momentan unmöglich, einen ILS-Empfänger in kleine Flugzeuge einzubauen. Außerdem würde ein einziger ILS-Empfänger 750 US Dollar kosten, während ein Neuflugzeug damals etwa 1.500 US Dollar kostete. Die ALPA¹⁵ ging mit Safety-Argumenten gegen den GCA los. 1946 schrieb deren Präsident:

"GCA' requires complete and precise coordination of five operators on the ground and the pilot in the airplane in order to effect a safe landing. Think this over for a minute and realize the possibility of human error involved plus the possibility of malfunctioning equipment."

Die Anhörung vor dem Congress ging ohne Entscheidung zu Ende. Was hätte der Congress auch entscheiden können? Ende 1947 gab es in den USA bereits 39 ILS-Anlagen, die von den Airlines genutzt wurden. Geld für zivile GCA-Geräte und vor allem deren Personal war nicht vorgesehen. Also startete das ILS durch: Bis 1998 wurden allein in den USA mehr als 1.500 ILS-Anlagen installiert.

Auch international gab es Gerangel um das ILS. Und auch hier schafften die Fakten klare Verhältnisse. Die nahezu weltweit vorhandenen AN/SCS-51 ILS-Systeme waren da und wurden auch zivil genutzt. Ein anderes System einzuführen ergab für die anderen Nationen keinen ökonomischen Sinn. 1949 erhob die International Civil Aviation Organization (ICAO) das ILS in den Spezifikationen der US Air Force zum internationalen Standard für Landesysteme.

1947 – ein vollautomatischer Flug über den Atlantik

Die USAAF erprobte – auch über das Kriegsende hinaus - ständig neue Autopiloten und Möglichkeiten, diese mit den SCS-51-Signalen sowie denen der Radio Ranges zu koppeln. Das Ziel war immer noch, mit einem modernen, schnellen Flugzeug auf einer befestigten Runway Blindlandungen durchzuführen. Nur diesmal nicht von Hand, sondern automatisch. Inzwischen waren etliche der Komponenten für eine solche Anlage vorhanden: Es gab bereits eine Reihe leistungsfähiger Autopiloten. Es war gelungen, diese mit den Signalen der Funknavigation zu koppeln. Bendix hatte eine automatische Gas-Regelung (Auto-Throttle) für große Kolbenmotoren entwickelt.

Getestet wurden diese Geräte von der US Air Force All-Weather Flying Division, die unter der Leitung von Col. James M. Gillespie stand. Gillespie war es auch, der für die erste automatische Atlantiküberquerung verantwortlich war. In dem Jahr vor dem Flug hatte die All-Weather Flying Division insgesamt 600 Flüge ausschließlich nach Instrumenten vom Start bis zur Landung erfolgreich durchgeführt. Der Atlantikflug war

¹⁵⁾ ALPA - Air Line Pilots Association, gegründet 1931

sozusagen die Spitze eines Eisbergs, der ultimative Test, der zeigen sollte, was in Zukunft möglich sein würde.



Eine C-54 Skymaster der US Air Force wie diese flog 1947 automatisch über den Nordatlantik. [Wikipedia]

Am Abend des 21. September 1947 stand die C-54¹⁶ Skymaster "Robert E. Lee" der United Air Force¹⁷ All-Weather Flying Division auf der Runway von Stephenville, Neufundland, zum Start bereit. Zielflugplatz war die RAF Station Brize Norton in England, heute die größte Basis der RAF. Die Distanz zwischen beiden Plätzen ist 2.151 NM. Für die Crew an Bord würde es wenig zu tun geben, denn fliegen würde eine Maschine. Die Air Force nannte den Flieger für die Presse das "Ein-Knopf-Flugzeug". Denn der Pilot drückte auf der Runway nur einen einzigen Knopf – und das Flugzeug setzte sich in Bewegung. Das nächste Mal, dass der Pilot irgendetwas anfassen würde, wäre nach dem Aufsetzen der Maschine auf der Landebahn in England.

"Wie haben die über dem Atlantik navigiert?" Eine gute Frage, die Quellen sind dünn. Nur wenige Details konnte ich herausfinden. Der Flug wurde größtenteils Dead Reckoning mit vorprogrammierten Headings geflogen, bis die Radiosignale von Wetterschiffen der US Coast Guard auf der Route empfangen werden konnten. An diesen Stationen entlang hangelte sich der Flieger über den Großen Teich. Selbsttätig.

Die Skymaster war ausgerüstet mit einem Sperry-Autopiloten mit Approach Coupler sowie mit einem Auto-Throttle-System von Bendix. Aber damit alleine wäre so ein Flug natürlich nicht möglich gewesen. Mit "automatischem Flug" verbinden wir heute immer den Begriff "Computer", nur gab es so etwas 1947 noch gar nicht. Wie haben die es also gemacht?

Herzstück der automatischen Steuerung war eine schwere elektromechanische Maschine (etwa so groß wie ein Schreibtisch), der "Automatic Flight Controller". Der Flight Controller wurde vor dem Flug über Lochkarten "programmiert" und bekam so alle geplanten Daten des Fluges. Der Knopf, mit dem der Start kommandiert wurde, setzte den "Master Sequence Selector" in Gang, der wiederum über mehrere Kanäle gleichzeitig (multi-channel) elektrische Schaltungen. Timer und Relais steuerte. Jeder Kanal sendete ein Feedback, wenn die befohlene Aktion beendet war. Außerdem gab es weitere Trigger zum Umschalten in die nächste Phase, z.B. Höhensignale vom Radar Altimeter oder das Umschwenken der Nadel im Direction Finder (Station Passage). Erst danach schaltete der Master Sequence Selector in die nächste Position um. Es gab für diesen Flug zwölf Phasen bzw. Sequences. Der Flight Controller hatte Zugriff auf alle Autopilot-Kanäle und das Auto-Throttle-System. Er konnte Kurse vorwählen und Ablagen korrigieren, Steigraten und die Höhe

¹⁶⁾ Die C-54 war die militärische Version der viermotorigen Douglas DC-6.

¹⁷⁾ Die eigenständige United States Air Force wurde am 18. September 1947 aus der Taufe gehoben, ihre Vorgängerorganisation war die USAAF, die United States Army Air Force.

halten. Auch Fahrwerk und Landeklappen wurden vom Flight Controller gesteuert. In vielen Texten im Internet steht, dass das Flugzeug nach der Landung automatisch gebremst worden sei. Das stimmt aber nicht: In einem Artikel von Col. Gillespie für die "Popular Science" vom Dezember 1947 findet sich folgender Text zur Sequence 12 (Microswitch in main gear activated):

"The ghost [Automatic Flight Controller] cuts the engine to idle speed, as the human pilot applies brakes [...] Operation now returns to manual ..."



In der "Popular Science" vom Dezember 1947 erschien ein erster Bericht von Col. Gillespie über den Flug.

Wenn man will, war der "Automatic Flight Controller" nichts anderes als eine etwas kompliziertere elektromechanische Waschmaschinen-Programmsteuerung. Damals eine wichtige technische Innovation. Solche elektromechanischen Programmsteuerungen waren auch schon im Krieg auf beiden Seiten verwendet worden. Sie wurden später in der frühen Raumfahrt eingesetzt. Die ersten bemannten Raumflüge (Projekt Mercury) wurden ausschließlich mit solchen "Flight Sequencern" gesteuert.

Der Nachteil dieser Steuerungs-Technologie: Bei unvorhergesehenen Ereignissen wie Engine Failure, Treibstoff- oder Hydraulikleckage, Sensorausfall etc. wäre der "Automatic Flight Controller" mit seinem Latein am Ende gewesen. Dafür war eine siebenköpfige Flight Test Crew an Bord (plus fünf Beobachter). Eines der Wunder dieses Fluges von 1947 war also auch, dass es keine größeren Störungen gegeben hat und die C-54 nach zehn Stunden und 15 Minuten sicher, wenn auch etwas ruppig, automatisch in England aufsetzte. Nicht alles jedoch war auf diesem Flug automatisiert. Mixture und Cowl Flaps wurden noch manuell betätigt, wahrscheinlich auch das Fuel System. Col. Gillespie wurde für seine Arbeit an der automatischen Landung und diesem Flug (auch der Rückflug wurde vollautomatisch geflogen) das Distinguished Flying Cross verliehen. Gillespie betonte nach dem Flug, dass diese Tests nur erste notwendige Schritte hin zu sicheren Blindlandungen seien. Ihm war auch wichtig, anzumerken, dass die Entwicklung in diese Richtung von großer Bedeutung für die Zivilluftfahrt werden würde. Er konnte nicht wissen, wie lange man darauf noch würde warten müssen: Als ich 1980 als Copilot auf die Boeing 737-100 und -200 kam, konnte diese Maschine immer noch kein Autoland, und Auto-Thrust gab es auch noch nicht.

Ausblick

In zwei Artikeln zum Thema Blindlandungen habe ich über die Geschichte des Instrumentenflugs und des ILS der ersten zwei Jahrzehnte von den 1920er- bis zu den 1940er-Jahren berichtet. Allein die Entwicklung eines zuverlässigen Gleitwegs hat mit Irrun-

gen und Wirrungen mehr als zehn Jahre gedauert. Es ist erstaunlich, wie lange sich das ILS gehalten hat. Das ursprünglich aus dem AN/SCS-51 von 1944 entwickelte zivile ILS wurde in all den Jahren immer weiter verbessert.

Für die Allgemeine Luftfahrt wurde die Nutzung des ILS erst nach Einführung der Halbleitertechnik möglich, die leichtere und klei-Empfänger erlaubte. nere Verkehrsfliegerei ermöglicht das gute alte ILS heute Blindlandungen nach CAT IIIb ohne Entscheidungshöhe. Das heißt, der Pilot sieht die ersten Lichter der Landebahnbefeuerung erst nach dem automatischen Aufsetzen. Die Minimum-RVR für CAT IIIb ist nur 75 Meter und auch nur dafür erforderlich, um das Flugzeug nach der Landung zum Terminal zu rollen. Für die Allgemeine Luftfahrt verliert das ILS dank immer genauerer GPS-Anflüge an Bedeutung. In der Verkehrsfliegerei wird das ILS noch eine Weile für Blindlandungen erforderlich sein.

PeterKlant@Lindbergh-aviation.de

Quellen und Literatur:

- [1] Instrument Flying Techniques and Procedures Department of the Air Force, Washington, D.C. 1951
- [2] Your Wings Assen Jordanoff, New York – London 1943
- [3] Aircraft Radio With a Chapter on Airport and Airway Lighting
- [4] Dr. Hay Surgeoner, London 1938
- [5] Flugfunkwesen Teil II: Flugzeugstationen und Peilgeräte - Flugsicherung und Fernmeldebetrieb – Funkverkehr mit Luftfahrzeugen – Funknavigation – Schlechtwetter-Landeverfahren Karl Möbius, Berlin 1942

- [6] Bordfunkgeräte Vom Funkensender zum Bordradar; Fritz Trenkle, Bonn 1986
- [7] Practical Air Navigation; U.S. Department of Commerce – Civil Aeronautics Administration Washington D.C. 1940
- [8] Instrument Flying Instrument Trainer; Army Air Forces, Patterson Field, Fairfield, Ohio 1944
- [9] Die Fernmeldebetriebsordnung für die Verkehrsflugsicherung (FBO) – in Frage und Antwort Dipl.-Ing. W. Feilhauer. Berlin 1936
- [10] Flugfunkpeilwesen und Funknavigation Rudolf Grötsch, Berlin-Tempelhof 1938
- [11] Die Luftfahrt-Navigation Ein Handbuch für den Dienstunterricht Theo E. Sönnichsen. Berlin 1940
- [12] I Could Never Be So Lucky Again Gen. James H. "Jimmy" Doolittle, Caroll V. Glines, New York, Toronto, London, Sydney, Auckland 1992
- [13] The Aircraft Year Book for 1945 Aeronautical Chamber of Commerce of America, New York
- [14] The Status of Instrument Landing Systems; Technical Development Report No. 1 W.E. Jackson, CAA, Washington D.C. 1937
- [15] Blind Landings Low-Visibility Operations in American Aviation, 1918–1958 Erik M. Conway, The Johns Hopkins University Press, Baltimore 2006
- [16] "We Flew the Atlantic ,No Hands" James M. Gillespie, Popular Science, December 1947
- [17] Ein Beitrag zur Flugsicherungs-Geschichte Hans H. Jucker, 2014
- [18] Alle Bilder aus der Sammlung des Autors, wenn nicht anders vermerkt