

Mögliche Leitsysteme für Agrarflugzeuge

Dr.-Ing. J. Zięborak, Institut für Luftfahrt Warszawa (VR Polen)

1. Einführung

In der vorliegenden Arbeit werden mehrere Leitsysteme für Agrarflugzeuge, vor allem in Abhängigkeit von unterschiedlichen Feldgrößen, untersucht (Bild 1). Ein wichtiges Kriterium der Untersuchungen war die Qualität der Querverteilung von Agrochemikalien. Bei der Querverteilung wurde eine zuverlässige Abweichung von 20 % für flüssige und von 25 % für feste Applikationsmittel nicht überschritten. Eine solche Querverteilung verlangt, daß die zulässige Arbeitsbreite genau eingehalten wird (Bild 2a). Hält der Pilot diese Arbeitsbreite nicht ein, ergibt sich eine ungleichmäßige Verteilung. Wenn die tatsächliche Arbeitsbreite in beachtlichem Maß von der zulässigen Arbeitsbreite abweicht, dann treten Unter- oder Überdosierung auf (Bild 2b).

Zur Einhaltung vorgegebener Arbeitsbreiten werden im Agrarflug entsprechende Leitsysteme angewendet. Unter bestimmten Bedingungen können die Seitenabweichungen von der Durchflugrichtung jedoch so groß werden, daß für jedes Leitsystem bestimmte Einsatzgrenzen bestehen. Im zweiten Teil des Artikels werden daher für bestimmte Leitsysteme die Seitenabweichungen behandelt und entsprechende Schlußfolgerungen für den Einsatz gezogen. Für die Untersuchung wurden die gegenwärtig repräsentativen Leitsysteme ausgewählt:

- visuelles System unter Nutzung von Flaggen
- elektronisches System Agri-Fix
- System Decca Flagman.

Zu den einzelnen Systemen werden nachfolgende Leitgrundsätze vermittelt und die Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten behandelt. Aufgrund eingehender eigener Untersuchungen wird das System Decca Flagman umfangreicher dargestellt. Alle Systeme wurden auf ihre Eignung in Abhängigkeit von der Feldgröße in bezug auf maximale Seitenabweichung und gleichzeitige Abweichung der Arbeitsbreite untersucht. Im dritten Teil der Arbeit wird das Ergebnis dieser Untersuchungen bei differenzierter Applikationsmenge von Agrochemikalien aufgrund der Messung der Querverteilung analysiert. Abschließend wer-

den die Einsatzgrenzen der Leitsysteme in Abhängigkeit von Feldgröße und Arbeitsbreite sowie Flughöhe dargestellt.

2. Seitenabweichung der Flugzeuge von der Durchflugrichtung

2.1. Signalisation mit Flaggen (visuelles System)

Das visuelle System des Ausflagens der Fluglinie basiert darauf, daß Anflug und Flugweg genau über die durch Signalisten gesetzten Flaggen verlaufen. Im Bild 3 ist ein solches Flugschema mit 2 Signalisten dargestellt. Anflug und Flugweg werden im wesentlichen von der Art des Kurvenflugs bestimmt. Im Punkt E der Kurve erfolgt eine langsame Einführung des Flugzeugs auf die Durchflugrichtung unter gleichzeitiger Herabsetzung der Flughöhe, die das Flugzeug im Punkt F erreicht. Auf dem Abschnitt E—F führt der Pilot die Änderung von Richtung und Höhe durch. Aus dieser Position ist die angedeutete Fluglinie durch die 2 Signalisten gut sichtbar. Beim Überflug des Signalisten M_3 hat der Pilot den Punkt im Gelände verloren, der mit dem Punkt M_4 eine Gerade bildet. Ab diesem Moment können Seitenabweichungen auftreten. Die Praxis hat gezeigt, daß die Seitenabweichungen am größten im halben Abstand zwischen den Signalisten sind und sich dann stufenweise in Richtung der Annäherung an den Signalisten M_4 vermindern.

In den Jahren 1969 bis 1975 wurden umfangreiche Messungen der Seitenabweichungen Δs an der Achse $x-x$ durchgeführt (Bild 3). Die Messung der Seitenabweichung erfolgt mit fotografischen Methoden. Entsprechende Arbeitsflüge wurden mit den Flugzeugen PZL-101 und AN-2 von Piloten mit Flugerfahrung von 500 bis 1000 Stunden ausgeführt.

Im Resultat der Messungen sind die mittlere und die maximale Seitenabweichung mit einer Sicherheit von 80 % ermittelt worden. Im Bild 4 ist die maximale Seitenabweichung $\Delta s = f(l)$ für die Flughöhe H von 5 m und 30 m zusammengestellt. Aus diesem Diagramm folgt, daß die Seitenabweichung bei der Flughöhe von 30 m rd. 80 % größer ist als die bei der Flughöhe von

5 m. Die Seitenabweichung könnte durch eine größere Anzahl von Signalisationsmitteln auf gleicher Feldlänge vermindert werden. Wenn die Anzahl der Markierungen m so groß ist, daß sie eine sichtbare Reihe bilden, dann werden eine maximale Seitenabweichung von größer als 1,2 m und eine mittlere Seitenabweichung von 0,7 m bei einer Flughöhe von 5 m nicht überschritten.

Auf dem Diagramm (Bild 4) sind die maximalen Seitenabweichungen für die Flughöhe H von 5 m und 30 m als zwei parallele Geraden dargestellt, die durch Ergebnisse der Untersuchungen mit den Agrarflugzeugen AN-2, Z-37 und M-15 im Erprobungsgelände bestätigt worden sind.

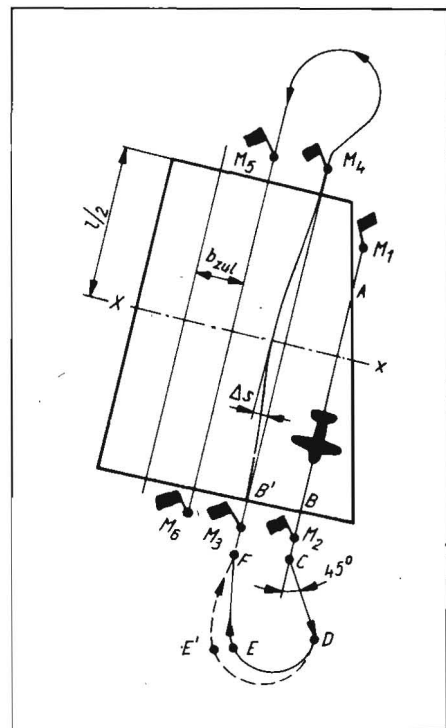
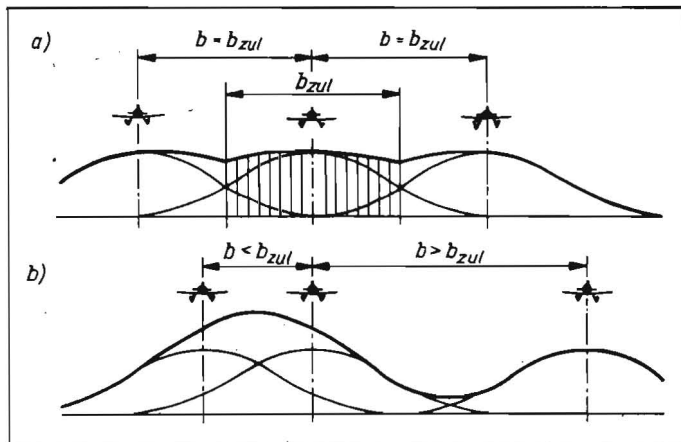
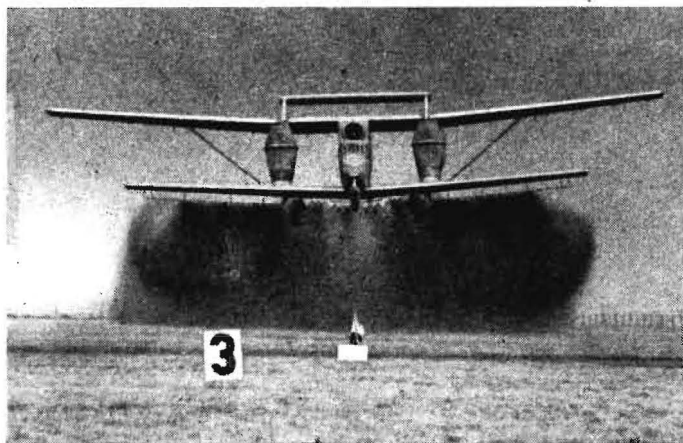
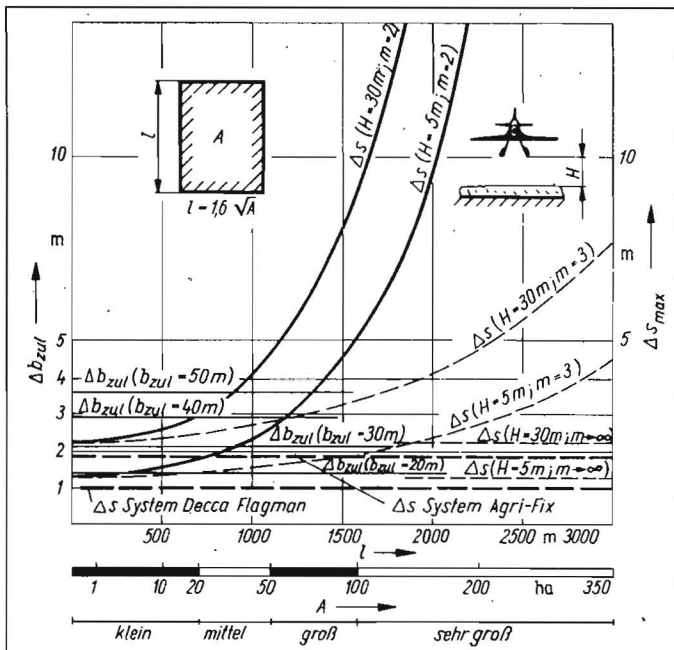


Bild 3. Einfluß des Kurvenflugs auf Anflug und Flugweg

Bild 2. Schematische Übersicht über die Querverteilung von Mineraldünger beim Agrarflugeinsatz

Bild 1. Agrarflugzeug M-15 im Einsatz





2.2. Leitsystem Agri-Fix

Das Leitsystem Agri-Fix gehört zur Gruppe der hyperbolischen Navigationssysteme. In diesem System werden die Strahlungen der weit voneinander entfernten Dipolantennen zweier Bodenstationen (Frequenzbereich 1,6 bis 2,0 MHz) miteinander synchronisiert. Die Schnittpunkte der Phasen der Nulldifferenz bilden bei konstantem Abstand hyperbolische Kurven, die um eine Halbwelle getrennt voneinander liegen. Auf Entfernungen bis 3 km von der Basislinie können die Hyperbeln als gerade, einander parallel liegende Weglinien betrachtet werden. Die Flugzeuglage zur Weglinie wird mit Hilfe des Dekameters (Bild 5), der zur Flugzeug-Bordausrüstung gehört, ermittelt. Im Dekameterfenster wird die volle Anzahl der Halbwellen vom Nullmoment angegeben. Dabei wächst diese Zahl in Richtung der abhängigen Bodenstation. Eine volle Umdrehung des Lichtpunktes auf dem Kreiszeiger des Dekameters entspricht bei 2 MHz der kürzesten Länge der Halbwelle von 75 m. Mit Hilfe des Dekameters kann $1/100$ der Länge der Halbwelle, das entspricht 0,75 m, bestimmt werden. Um die Durchflugrichtung zu realisieren, muß

der Lichtpunkt des Kreiszeigers am Dekameter 0,33 anzeigen. Für die operative Nutzung der Anzeigergebnisse des Dekameters können diese auf den Balkenanzeiger als Weglinie „head up“ transferiert werden (Bild 5). Jedes Lichtsignal des Balkenanzeigers bzw. der Abstand zwischen den einzelnen Lichtsignalen zeigt $1/50$ der Länge der Halbwelle an, was 1,5 m entspricht. Befindet sich das Flugzeug beim Arbeitsflug genau auf der vorgegebenen Durchflugrichtung, leuchten gleichzeitig zwei weiße Lichtsignale gleicher Stärke auf. Leuchtet z. B. ein rotes Lichtsignal an der rechten Seite auf, so befindet sich das Flugzeug links parallel zur vorgegebenen Durchflugrichtung. Beginnen diese roten Lichtsignale an der rechten Seite im Wechsel aufzuleuchten und zu erlöschen, entfernt sich das Flugzeug nach links von der Durchflugrichtung. Die Anzeige der vorgegebenen Durchflugrichtung ist analog zum senkrechten Kreuzbalkenanzeiger ILS oder VOR, wobei mit letzterem normalerweise Agrarflugzeuge nicht ausgerüstet sind. Das Einrichten des Flugzeugs auf die vorgegebene Durchflugrichtung erfolgt mit Hilfe

Bild 5. Dekameter (links) und Anzeigerät für die Anzahl der Durchflüge an Bord des Flugzeugs AN-2 R

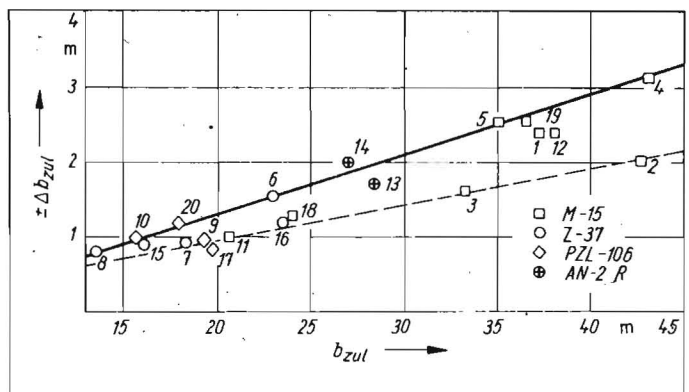
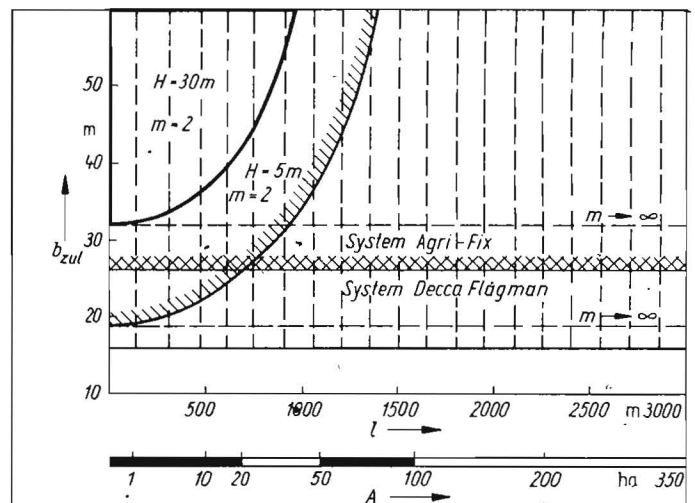


Bild 6. Verlauf der Abweichungen der Arbeitsbreite für verschiedene Flugzeugtypen beim Streuen (1 bis 10) Spritzen (11 bis 17) Stäuben (18 bis 20)

Bild 4. Verlauf der maximalen seitlichen Abweichungen Δs des Flugzeugs in Abhängigkeit von der Feldlänge l

des Anzeigers auf der Kreisskala des Dekameters unter einem Winkel auf dem Abschnitt E-F (Bild 3). Die Ausrüstung des Flugzeugs mit einem Kreiselskompaß erleichtert das Einnehmen der Durchflugrichtung und vermindert damit mögliche Seitenabweichungen. Zur Testung solcher Seitenabweichung wurden viele Flugversuche mit einem Flugzeug AN-2, das mit Agri-Fix-Empfangseinrichtung ausgerüstet war, durchgeführt. Die Seitenabweichung wurde mit Hilfe der Kreiselmethode bei gleichzeitigen Signalen des Anzeigers „head up“ ermittelt und fotografisch festgehalten. Die Ergebnisse zeigen, daß maximale Seitenabweichungen des Flugzeugs etwa 1,8 m bei einer Wahrscheinlichkeit von 80 % betragen und die mittlere Abweichung bei 0,8 m liegt. Eine Abhängigkeit zwischen Flughöhe und Seitenabweichung des Flugzeugs konnte nicht ermittelt werden. Die Versuchsdurchführung erfolgte von einem Piloten, der rd. 800 Flugstunden nachgewiesen hat. Das Flugzeug AN-2 verkörpert mittlere Eigenschaften für den Agrarflug. Die Meßergebnisse sind auf dem Diagramm $\Delta s = f(l)$ als waagerechte Gerade dargestellt (Bild 4).

Bild 7. Anwendungsbereiche verschiedener Leitsysteme für Agrarflugzeuge



2.3. Leitsystem Decca Flagman

Das elektronische System Decca Flagman ist eine Anpassung des Systems vom Typ Transponder als Leitanlage für Agrarflugzeuge.

In diesem System werden durch 2 Abfragesender (Transponder) eine Basislinie festgelegt und durch eine mobile Sender-/Empfangsstation, die im Flugzeug eingebaut ist, Signale zu den Bodenstationen ausgesendet. Der Signalweg bis zu den Bodenstationen wird durch eine Bord-einrichtung DDMU (Digital Distance Measuring Unit — Digitalentfernungsmessanlage) gemessen und diese Information an einen Rechner gegeben.

Im Unterschied zum Agri-Fix-System, wo die vorgegebene Durchflugrichtung immer gerade (senkrecht) zur Basislinie verläuft, besteht beim Decca-Flagman-System die Möglichkeit, die vorgegebene Durchflugrichtung vom Flugzeug aus zu ändern, d. h. eine neue Durchflugrichtung aufzubauen, die auch Krümmungen entsprechend der Feldlage enthalten kann. Hierzu dienen einzelne Drucktastenschalter an einer Bordeinrichtung (Control Panel). Mit Hilfe dieser Drucktasten lassen sich der erste Arbeitsdurchflug, eventuelle Krümmungen der Durchflugrichtung sowie die Position der unterbrochenen Arbeitsflüge speichern.

Grundelement dieses Verfahrens, das dem Piloten die Einhaltung der Durchflugrichtung und Position der Arbeitsunterbrechung anzeigt, ist der Kreuzanzeiger (Cross Pointer), mit dem alle Flugzeuge des Systems ILS und VOR ausgerüstet sind. Die Funktion des Kreuzanzeigers basiert auf der Ermittlung der kleinsten Seitenabweichung.

Für klassische Agrarflugzeuge mit Arbeitsgeschwindigkeiten von rd. 160 km/h soll die Empfindlichkeit der Senkrechtanzeige auf der Halbschale nicht kleiner als 13 m sein und die Impulshäufigkeit (Informationssignal) für die Flugposition nicht weniger als 2mal je Sekunde betragen. Bei Entfernungen von der Basislinie bis 15 km und Einhaltung dieser Bedingungen bereitet die Einhaltung der vorgegebenen Durchflugrichtung mit Abweichungen bis maximal 1 m keine Schwierigkeiten. Bei größeren Entfernungen von der Basislinie bestimmen die technischen Bedingungen des Systems die Seitenabweichungen, die bis ± 2 m betragen können (Bild 4). Die Wahrscheinlichkeit der Einhaltung der Durchflugrichtung wird mit wachsender Entfernung immer geringer. Der maximale Wirkungsbereich des Systems ergibt bei einer Entfernung der Basislinie von 80 km eine Seitenabweichung von ± 3 m.

Am Kreuzanzeiger hat die waagerechte Nadel die Aufgabe, dem Piloten die Annäherung der Position der Arbeitsunterbrechung (Beginn des Arbeitsdurchflugs) bzw. jedes anderen gespeicherten Punktes im Gelände anzuzeigen. Zunächst wird dieser Abstand über eine Digitalanzeige in km angegeben. Bei einer Entfernung von unter 0,5 km erscheint eine bewegliche waagerechte Nadel. In dem Maß, wie das Flugzeug sich dem Punkt nähert, bewegt sich die Nadel in Richtung der waagerechten Grundlinie der Anzeigeeinrichtung. Wenn die Nadel die waagerechte Linie deckt, erscheint ein Lichtsignal, das dem Piloten den Beginn des Arbeitsdurchflugs meldet. Das Kreuzanzeigerinstrument erleichtert dem Piloten das Anfliegen der vorgegebenen Durchflugrichtung besonders dann, wenn sich ein Kreiselkompaß an Bord befindet. Für Piloten, die nach dem ILS-System fliegen, bereitet die Anwendung des Flagman-Systems keine Schwierigkeiten.

3. Abweichungen von der Arbeitsbreite

Jede Applikationseinrichtung an Flugzeugen hat bestimmte Ungleichmäßigkeiten in der Dosierung, die durch eine Abweichung von der Arbeitsbreite verursacht werden. Die zulässige Abweichung beträgt in der VR Polen für flüssige Mittel $\pm 5\%$ und $\pm 10\%$ für Mineräldüngemittel. Für die Ermittlung der quantitativen Einschätzung der Abweichung der Arbeitsbreite wurden mehrere Untersuchungen der Querverteilung bei 5 verschiedenen Agrarflugzeugtypen durchgeführt. Die verwendeten Applikationseinrichtungen haben die Anforderungen an die zulässige Dosiergleichmäßigkeit erfüllt.

Die Untersuchungen wurden für 3 verschiedene Applikationsverfahren durchgeführt, und zwar bei der Düngung mit pneumatischen und Schleuderradstreuern sowie bei flüssigen Mitteln mit Spritz- und Sprüheinrichtung (Rotationszerstäuber). Die Dosierung betrug 155 bis 400 kg/ha für Düngemittel und 15 bis 145 l/ha für flüssige Mittel. Die Flugarbeit erfolgte im Beetflug. Das statistische Untersuchungsergebnis zeigte eine Wahrscheinlichkeit von 90% 20 Varianten sind auf dem Diagramm $\Delta b_{zul} = f(b_{zul})$ im Bild 6 dargestellt. Insgesamt wurden 178 Messungen der Querverteilung aufgenommen. Man kann feststellen, daß sich die Streuung der Punkte für diese Varianten in den Grenzen eines Dreiecks befindet.

Aus dem Verlauf der maximalen Abweichungen folgt, daß sich die Toleranz des Bereichs der Arbeitsbreite von 15 bis 45 m im Bereich von 12 bis 14,7% von b_{zul} ändert. Eine ähnliche Analyse nach der Webschützermethode zeigt, daß trotz verschiedener absoluter Größen der Abweichungen bei beiden Methoden die Prozentzahlen im Verhältnis zur Arbeitsbreite konstant bleiben.

4. Anwendungsbereiche verschiedener Leitsysteme

Die Anwendungsbereiche der einzelnen Systeme können aus den Bildern 4 und 6 mit der Bedingung $\Delta s_{max} \leq \Delta b_{zul}$ ermittelt werden, bei der die Anforderungen an eine gleichmäßige Querverteilung erfüllt sind. Das Enddiagramm (Bild 7) stellt die Bereiche für die Anwendung als schraffierte Fläche dar.

Die einzelnen Systeme könnten wie folgt zur Anwendung kommen:

Werden 2 Signale ($m = 2$) bei Flughöhen von 5 m verwendet, kann das visuelle Leitsystem auf kleineren, mittleren und großen Feldern mit entsprechenden Arbeitsbreiten genutzt werden. Die minimale Arbeitsbreite für 2 Signale beträgt 19 m. Flugzeuge mit geringer Arbeitsbreite sollten auf großen Feldern aufgrund ungenügender Deckungsgleichheit bei der Verteilung nicht genutzt werden. Bei 2 Signalen und einer Flughöhe von 30 m kann man das visuelle System auf kleinen und mittleren Feldern bei entsprechenden Arbeitsbreiten nutzen. In diesem Fall beträgt die minimale Arbeitsbreite 32 m. Daraus folgt, daß eine größere Flughöhe die Anwendung des visuellen Systems begrenzt. Durch Verwendung von 3 Signalen kann man bei gleicher Feldlänge den Anwendungsbereich jedoch erweitern. Eine Erhöhung der Signale hat aber wegen der damit verbundenen größeren Organisationsprobleme in der Praxis keine breite Anwendung gefunden.

Wenn jedoch die Anzahl der Signale so ansteigt, daß sie eine Reihe bilden ($m \rightarrow \infty$, Bild 4), dann ergibt sich nur eine äußerst minimale Seitenabweichung des visuellen Systems. In der Praxis entspricht dieser Zustand dem Fliegen entlang einer Plantagenreihe, wie z. B. im Obstbau. In

dieser Form ergibt sich keine Begrenzung der Feldgröße.

Die maximalen Seitenabweichungen des Systems Agri-Fix bilden eine konstante Größe. Der Bereich der Anwendung wird daher im Bild 7 als ein Rechteck betrachtet. Das System kann bis zu einer Flughöhe von 50 m für Arbeitsbreiten über 26 m genutzt werden. Auf kleinen Feldern bei einer Arbeitsbreite unter 26 m und Flughöhe von 5 m ist das visuelle System günstiger.

Die Fläche, die das System Agri-Fix umfassen kann, ist symmetrisch zur Basisachse und beträgt $2/3 \times 2/3$ der Achsenlänge. Bei einer maximalen Länge der Achse von 30 km entspricht das 40000 ha. Um das Fliegen auf vorgegebener Durchflugrichtung zu erfüllen, die als parallele Gerade betrachtet werden kann, ist es zweckmäßig, aus sehr großen Feldern Flächen bis zu 350 ha für die Bearbeitung herauszugreifen. Als nachteilig muß hervorgehoben werden, daß die Möglichkeit einer Richtungsänderung der Anflüge nicht gegeben ist.

Im Vergleich der genannten Systeme ergibt sich beim System Decca Flagman ein größerer Anwendungsbereich, was im Bild 7 dargestellt ist. Die Möglichkeiten der Anwendung auch bei geringen Arbeitsbreiten ergibt sich aus der Verminderung der maximalen Seitenabweichung. Es übertrifft damit auch das visuelle System auf kleineren Feldern und bei geringer Arbeitsbreite. Positive Eigenschaften dieses Systems sind die Möglichkeiten, die vorgegebene Durchflugrichtung vom Flugzeug aus zu ändern, diese von einer Geraden abweichen zu lassen und die Positionsbestimmung im Gelände. Die Durchfluglinie muß nicht parallel zur Basislinie verlaufen wie beim System Agri-Fix. Das Flagman-System zeigt damit nicht nur eine bessere Gleichmäßigkeit der Verteilung, sondern auch einen breiten Einsatzbereich.

Bei der Betrachtung der Anwendungsbereiche der einzelnen Leitsysteme bleibt zu erwähnen, daß gegebenenfalls nicht immer eine hohe Gleichmäßigkeit der Verteilung erforderlich ist. In bestimmten Fällen läßt man eine verminderte Gleichmäßigkeit der Querverteilung zu; dann wächst der Anwendungsbereich der Leitsysteme, vor allem des visuellen Systems. Bei der Auswahl größerer Arbeitsbreiten auf kleineren Feldern sollte man stärker ökonomische Aspekte des Agrarflugzeugeinsatzes beachten. Größere Agrarflugzeuge sind auf kleineren Feldern weniger ökonomisch, allein schon wegen der häufigen und größeren Wenderadien am Feldrand nach jedem Durchflug.

Literatur

- Thomson, I.; Mitche||, H. W.: A new positioning aid for agricultural aviation. United Nations Economic Commission for Europe 1978.
- Zięborak, J.: Kunachowicz, K.: Bericht über Erprobung des Systems Agri-Fix/Sea Fix bei Agrarflugarbeiten. Institut für Luftfahrt Warszawa 1974.
- Zięborak, J.: Gegenwart und Perspektive der Signalisation beim Einsatz von Agrarflugzeugen und Hubschraubern. Vortrag zum Agrarflugseminar in Olsztyn 1979.
- Bericht über Ergebnisse von Agrarflugversuchen. Institut für Luftfahrt Warszawa 1970 und 1979 (unveröffentlicht).