

# Analogieuntersuchungen zur Lagerung von Schüttgütern mit Belüftung

Dipl.-Ing. B. Neubüser, KDT, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik

## Verwendete Formelzeichen

c	Geschwindigkeit des strömenden Mediums
x, y	Koordinaten
$\beta$	Schüttwinkel
$\psi$	Stromfunktion
$\Phi$	Potential

Die Lagerung von Schüttgütern in der Landwirtschaft ist in sehr vielen Fällen nur mit einer entsprechenden Belüftung über einen längeren Zeitraum möglich. Gegenwärtig existieren lediglich spezifische Kennzahlen für den Luftdurchsatz (auf Masse Lagergut bezogen). Ob eine Belüftung erfolgt oder nicht, ist dabei vom Gut- und vom Außenluftzustand abhängig (Belüftungstabellen). Unbefriedigende bzw. gar keine Aussagen gibt es zu folgenden Schwerpunkten:

- Auswahl des Lüfertyps
- Abhängigkeit der Kanallenden vor dem Rand der Schüttung von der Schüttform
- untere und obere Grenzwerte der Schütthöhe bei vorhandenem Lüftungssystem bzw. Auslegung des Lüftungssystems nach der zu erwartenden Schütthöhe (Neubau)
- Zusammenhang zwischen Abstand der Kanalmittellinien bzw. Kanalfächen und Lüfertyp
- gutspezifische Auslegung der Belüftungstechnik
- Einfluß von veränderlichen Durchströmungswiderständen auf die Gestaltung des Belüftungssystems.

Die Lagerung von Schüttgütern in Hallen mit Unterflurbelüftung erfolgt im wesentlichen in drei Schüttformen (Bild 1). Die Formen a und b können bei mobilen und stationären Beschickungsverfahren auftreten, während c für einen feststehenden Abwurfpunkt typisch ist. Landwirtschaftliche Schüttgüter haben einen Schüttwinkel zwischen 30 und 45°.

Allein aus den drei betrachteten Schüttformen ist ersichtlich, daß die zugeordnete Belüftungstechnik nicht in jedem Fall gleich sein kann, wenn die Qualität der eingelagerten Stoffe gesichert und gleichzeitig nicht unnötig viel Energie verbraucht werden soll. Deshalb ist eine gute Durchströmung dann erreicht, wenn die Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeit vom Sollwert möglichst gering sind, die Kosten für die Belüftung zur gleichen Zeit aber herabgesetzt werden können.

Die Vielzahl der aufgeführten Probleme erfordert umfangreiche Untersuchungen. Die Ermittlung der gesuchten Werte über Praxisversuche scheitert an der hohen Anzahl von Versuchen, die mit den unterschiedlichen Gütern angestellt werden müßten, an der großen Anzahl von Parametern, die zu variieren wären und nicht zuletzt an der augenblicklichen Situation auf dem Gebiet der Futtermittel.

Eine geeignete Methode für diese Untersuchungen ist die Anwendung des bereits in der Geohydraulik bewährten Verfahrens der elektrischen Analogiebetrachtung.

## Grundlagen der Analogiebetrachtung

Eine ausführliche Darstellung dieser Vorgehensweise ist z. B. in [1, 2] gegeben. Angewendet auf belüftungstechnische Fragen,

Bild 1 Schüttformen

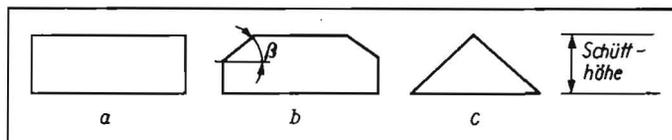
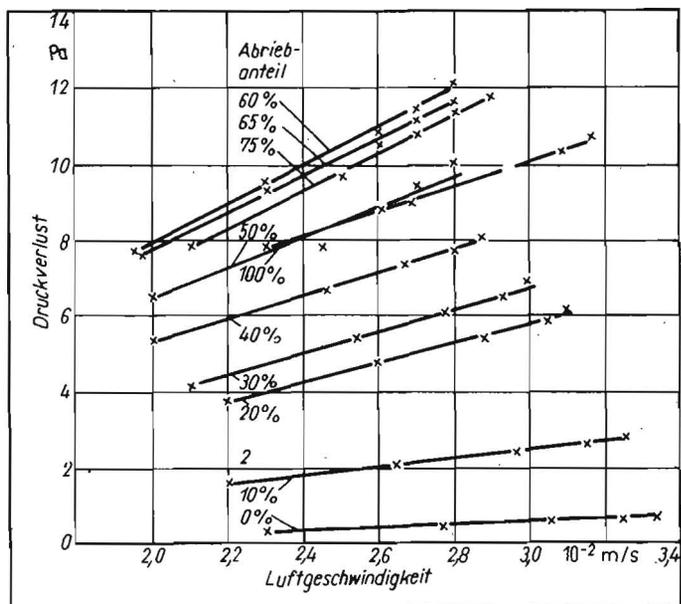


Bild 2 Druckverlust in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (Dicke der zu durchströmenden Pelletschicht 10 cm)



sind die beiden folgenden Grundgleichungen zu erfüllen:

— Drehungsfreiheit der Strömung

$$\frac{\partial c_x}{\partial y} - \frac{\partial c_y}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

— Kontinuitätsgesetz

$$\frac{\partial c_x}{\partial x} + \frac{\partial c_y}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Diese Gleichungen führen auf die Laplaceschen Differentialgleichungen (3) und (4) für das Potential  $\Phi$  und die Stromfunktion  $\psi$ :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

Die Gln. (1) bis (4) gelten analog für bestimmte Probleme der Hydrodynamik, der Wärmeleitung, der Sickerströmung und auch der elektrodynamischen Felder (nach [1]).

Für den Fall der Belüftung sind dem Potential der statische Druck und der Stromfunktion der Volumenstrom der Luft zuzuordnen. Bei der Analogiebetrachtung ist demnach für die Belüftung zu fordern, daß „die Komponenten der Geschwindigkeit direkt proportional sind dem Druckgefälle in Richtung der Koordinaten“ [1]. Im Bild 2 ist dieser Zusammenhang dargestellt, wie er bei der Durchströmung einer 10 cm dicken Schicht aus Stroh-Konzentrat-Gemisch-Pellets (SKG-Pellets) mit unterschiedlichem Abriebanteil gemessen wurde. Ebenfalls durchgeführte Versuche für zu durch-

strömende Gutschichten mit einer Dicke von 50 und 90 cm bestätigten die Aussagen von Bild 2.

Legt man die Forderung von 40 bis 60 m<sup>3</sup> Luft je Tonne Gut und Stunde zugrunde, so entspricht die gewählte Luftgeschwindigkeit einer Schütthöhe von 2,2 bis 5,6 m. Gegenwärtig darf entsprechend ABAO 105/3 eine Schütthöhe von 5 m nicht überschritten werden.

Da die untersuchten Varianten stets eine Höhe von 4,8 m und höher aufwiesen, wird weiterhin angenommen, daß die durch die Lüfter aufgebrauchte Druckerhöhung gleichmäßig über den Belüftungskanal verteilt ist.

## Netzwerk- und Papiermodelle

In die Betrachtungen waren sowohl homogene als auch inhomogene Schüttungen einbezogen. Im belüftungstechnischen Sinn bedeutet homogener Stoff, daß der Strömungswiderstand des zu durchströmenden Gutes an jedem Ort in der Schüttung gleich groß ist. Die strömungstechnisch bedingte Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit bleibt erhalten.

Eine spezielle Arbeit zu Fragen der Getreidebelüftung zum Zweck des Kaltkonservierens wurde bereits im Jahre 1969 von Enkelmann vorgelegt [3].

Folgende Methoden wurden bei den eigenen Versuchen angewendet:

- Untersuchungen an elektrisch leitendem Papier
- Untersuchungen an Netzwerkmodellen.

## Untersuchungen an elektrisch leitendem Papier

Diese Methode liefert sehr schnell qualitativ

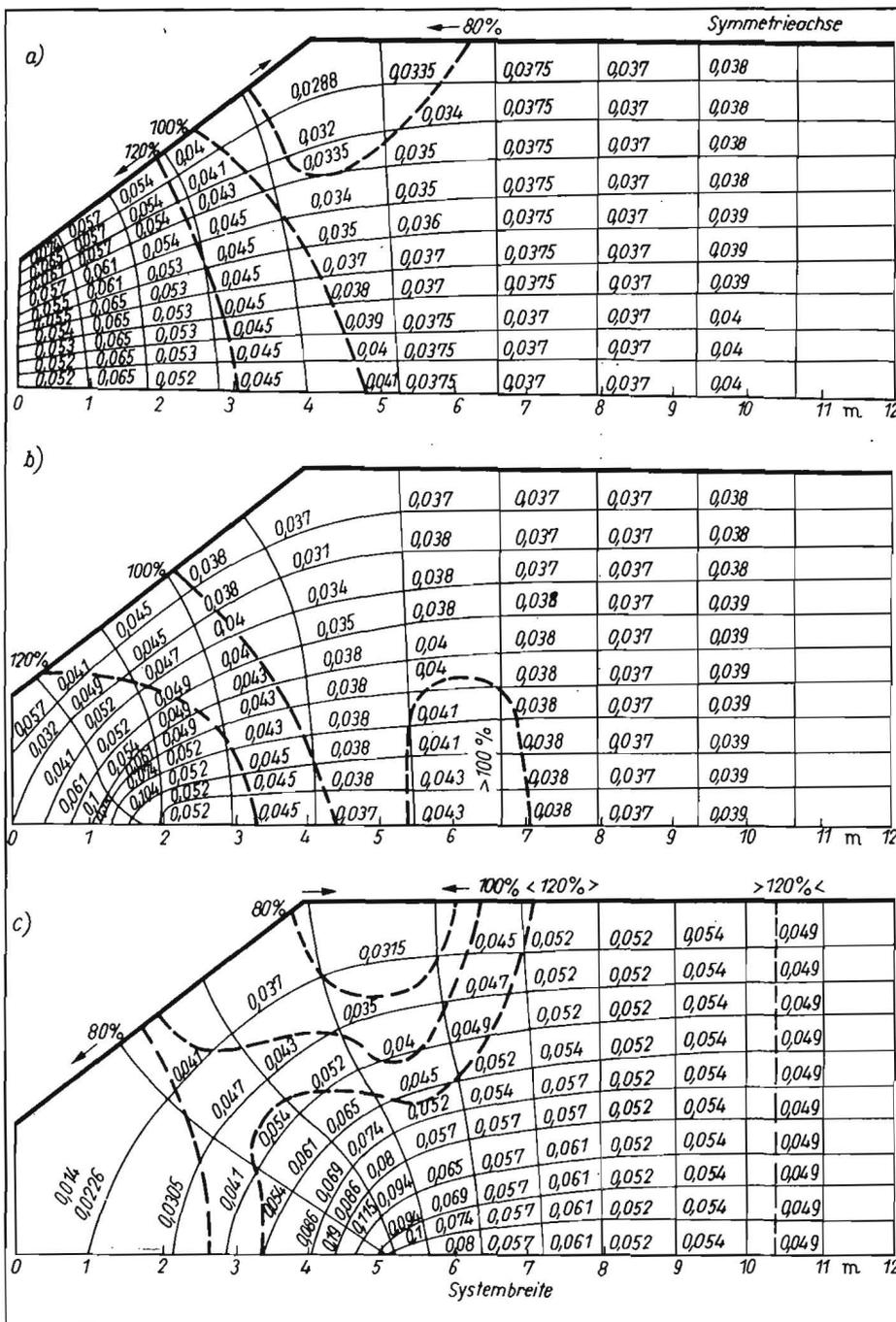


Bild 3. Strom- und Potentiallinien einer homogenen Schüttung (Schütthöhe 4,8 m);  
 a) gesamter Boden belüftet  
 b) Belüftung beginnt 2 m vom Rand entfernt  
 c) Belüftung beginnt 5 m vom Rand entfernt  
 --- Linien gleicher Geschwindigkeit

verwertbare Aussagen. Sie ist recht einfach in ihrer Handhabung und ermöglicht in kurzer Zeit die Untersuchung einer Vielzahl von Varianten. Um zu quantifizierbaren Aussagen zu gelangen, müssen aber die Übergangswiderstände Leitsilber—Papier und die Anisotropie des Papiers selbst berücksichtigt werden. Eine Untersuchung von Nestern erhöhten Widerstands ist durch Einstanzen von Löchern auch problemlos realisierbar.

**Untersuchungen an Netzwerkmodellen**

Die Methode der Analogiebetrachtung mit Hilfe eines elektrischen Widerstandsnetzes bietet die Möglichkeit, Stoffe sowohl gleichen als auch unterschiedlichen Strömungswiderstands zu untersuchen. Eine dreidimensionale Betrachtung ist möglich. Für den in dieser

Arbeit als Beispiel betrachteten zweidimensionalen Fall der Schüttform b (Bild 1) wurde ein Dreiecksnetz gewählt, um den Schüttwinkel, der mit 38° einem Mittelwert entspricht, besser realisieren zu können. Eine Rechteckform ist auch möglich.

Jedes Dreieck symbolisiert damit einen bestimmten Flächenabschnitt in der Schüttung (zweidimensional), und die elektrischen Widerstände sind entsprechend der Größe der Seiten und Winkel nach [2] berechenbar. Der Einfluß der „Nachbardreiecke“ muß berücksichtigt werden. Zur Analogiebetrachtung schließt man alle Punkte, an denen ein Anschlußpunkt des Netzes vorliegt und Lufteintritt und Luftaustritt real möglich sind, an einen bestimmten Spannungswert an. Der Lufteintritt wird durch 10 V, der Austritt durch 0 V realisiert. An den

einzelnen Zwischenpunkten kann dann ein direkter Spannungsabfall gemessen werden. Durch Interpolation zwischen den so ermittelten Werten erhält man die Linien gleichen Drucks in der Schüttung (Potentiale). Werden die Ergänzungsumrundungen zum Anschluß der 0- und 10-Volt-Spannungen benutzt, so erhält man die für diese Variante gültigen Stromlinien ( $\psi = \text{konstant}$ ). Durch jede Fläche, die durch zwei benachbarte Stromlinien begrenzt ist, fließt der gleiche Strom.

Im Bild 3 sind die Ergebnisse der Modelluntersuchungen von drei Belüftungsvarianten für eine typische Lagerhallenbreite vom 24 m dargestellt worden. Die gestrichelten Linien sind die Begrenzungen für die durch Prozentwerte angegebenen Geschwindigkeitsbereiche, wobei 100% die Belüftung des eingelagerten Gutes entsprechend den agrotechnischen Forderungen bedeutet.

Der Abstand der Kanäle untereinander ist durch Korrekturfaktoren zu erfassen. Da es sich bei dem untersuchten Stoff um SKG-Pellets handelt, wurde eine Luftrate entsprechend o.g. Ausführungen gewählt. Das bedeutet, daß für die Bereiche mit Geschwindigkeiten über 0,035 m/s im leer gedachten Querschnitt quantifizierbare Aussagen nur noch bedingt zu treffen sind. Dort ist die Analogie durch den Übergang der laminaren in die turbulente Strömung der Luft nicht mehr ohne Einschränkungen gewährleistet. Das trifft vor allem auf den Bereich um den Beginn des Belüftungskanal zu.

**Untersuchungen am inhomogenen Stoff**

Tritt an die Stelle des mobilen Beschickungsverfahrens ein stationäres Verfahren, so kann es in Abhängigkeit vom Stoff, aber auch von technischen Parametern (Abwurfgeschwindigkeit, Fallhöhe) zu einer Entmischung kommen. Dieser Vorgang hat ebenso wie die Art und Weise der Bewegung des Abwurfpunktes Einfluß auf die Struktur und damit auf den Strömungswiderstand der Schüttung. Bei den bereits erwähnten SKG-Pellets kommt es zu einem derartigen Entmischungsvorgang.

Wird der im Bild 2 dargestellte Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und veränderlichem Abriebanteil auf den Druckverlust, den eine Schüttung mit 10% Abrieb hat, bezogen, so erhält man Bild 4. Danach besteht ein erheblicher Unterschied, ob man SKG-Pellets mit dem geforderten Bereich des Abriebanteils von 0 bis 10% eingelagert hat oder ob dieser Anteil, wie in Praxisanlagen oft anzutreffen, höher ist (bis zu 70%). Tritt der größte Strömungswiderstand im Bereich von 55 bis 60% auf, so hat die Schüttdichte bei 10 bis 15% ihren Maximalwert. Die Abriebanteile lagern sich in die Hohlräume zwischen den Pellets ein, und erst ab den genannten 15% erfolgt durch den Abrieb eine „Aufdehnung“ der Packungsstruktur. Im Bild 5 wird dieser Zusammenhang widergespiegelt (untersuchte Schütthöhe 1 m).

Untersuchungen von Fürll [4] zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Abwurfpunkt und Abriebanteilen. Der Abstand vom Zentrum des Abwurfs ist demnach ein Maß für den zu erwartenden Abriebanteil und folglich für den Strömungswiderstand. Diese Ergebnisse und die Beziehungen nach Bild 4 ermöglichen die modelltechnische Untersuchung der Vorgänge der Belüftung. Entsprechend dem Beschickungsverfahren sind die jeweiligen elektrischen Widerstände mit dem ermittelten Faktor zu multiplizieren. Die Ermittlung

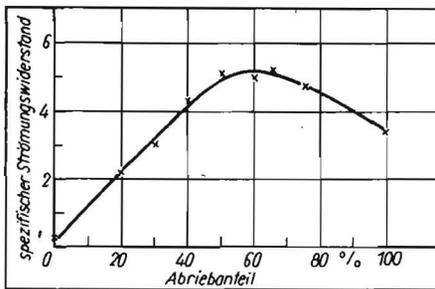


Bild 4. Spezifischer Strömungswiderstand in Abhängigkeit vom Abriebanteil (Bezugsgröße: Druckverlust bei einem Abriebanteil von 10%)

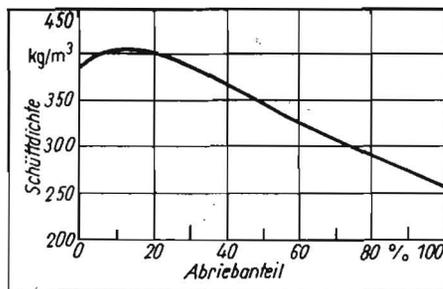


Bild 5. Schüttdichte in Abhängigkeit vom Abriebanteil (Schütthöhe 1 m)

der Strom- und Potentiallinien erfolgt analog der Variante für homogene Stoffe. Zur Bestimmung des Anteils am Gesamtstrom, der durch die jeweiligen Stromröhren fließt, muß für jeden dieser Bereiche der mittlere Faktor aus der Multiplikation der Widerstände ermittelt werden. Je größer dieser Faktor ist, um so kleiner wird der Strom sein.

### Zusammenfassung

Die Methode der elektrischen Analogiebehandlung ermöglicht eine sehr große Aufwandsenkung im Bereich des Versuchswesens. Im Beitrag werden die Grundlagen dieser Analogie am Beispiel der Belüftung bei der Lagerung von Schüttgütern kurz dargelegt. Dabei wird die Methode beschrieben, die sich in der Geo-

hydraulik bereits bewährt hat, für Fragen der Belüftung, aber an Bedeutung gewinnen sollte.

Es ist möglich, sowohl homogene als auch inhomogene Schüttungen (bezüglich des Strömungswiderstands) zu untersuchen. Mit Hilfe eines analogen elektrischen Netzwerks können quantitative Aussagen zur Strömungsgeschwindigkeit bzw. zur Luftrate an jedem Ort in der Schüttung getroffen werden. Damit ist eine Grundlage gegeben, Stoff- und Wärmeübergangsprozesse örtlich begrenzt zu betrachten.

### Literatur

- [1] Albring, W.: Angewandte Strömungslehre. Berlin: Akademie-Verlag 1978.
- [2] Busch, K.F.; Luckner, L.: Geohydraulik. Leipzig: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1972.
- [3] Enkelmann, W.: Untersuchungen zur wirtschaftlichen Gestaltung des Kaltkonservierungsprozesses von feuchtem Getreide. TU Dresden, Sektion Energiewandlung, Dissertation 1969 (unveröffentlicht).
- [4] Füll, C.; Scherping, E.: Umschlag und Lagerung von pelletiertem Trockenfutter. agrartechnik 28 (1978) H. 4, S. 159—161. A 3401

## Senkung der Stillstandszeiten durch rationelle Wartung und Instandhaltung

Der Agrarflugeinsatz wird in der DDR vom Betrieb Agrarflug der INTERFLUG durchgeführt.

Das Luftverkehrsunternehmen INTERFLUG ist Halter und Betreiber der dazu benötigten Luftfahrzeuge und muß auch ihre Einsatzbereitschaft sicherstellen.

Für die Instandhaltung von Agrarflugzeugen gilt die Zielstellung: Gewährleistung einer optimalen Verfügbarkeit zu den agrarbiologisch günstigsten Zeitpunkten bei relativ niedrigen Kosten und hoher Sicherheit. Das unterstreicht die Bedeutung des Instandhaltungsprozesses der verschiedenen Elemente von der Pflege und Wartung bis zur Instandsetzung.

Durch die ordnungsgemäße Pflege und Wartung der Agrarflugzeuge können der künftige Instandhaltungsaufwand und die Kosten erheblich beeinflusst werden.

Ziel ist die Gewährleistung eines hohen Niveaus der technischen Verfügbarkeit durch

- Senkung des Instandhaltungsaufwands
- Senkung der instandhaltungsbedingten Stillstandszeiten.

Die wichtigsten Einflußfaktoren sind die Art des angewendeten Instandhaltungssystems und die Instandhaltungsorganisation (wobei hier der Pflege und Wartung eine entscheidende Bedeutung zukommt).

### Maßnahmen zur weiteren Senkung der Stillstandszeiten und Erhöhung der technischen Verfügbarkeit der Luftfahrzeuge

Dazu trägt die volle Durchsetzung der vorwiegend kalenderzeitabhängigen Instandhaltungsmaßnahmen (Pflege und Wartung) während der einsatzfreien Zeit im Einsatzgebiet bei; um betriebsbedingte Unterbrechungen oder Stillstandszeiten auf ein Minimum zu senken.

Im Ergebnis dessen ist in der Haupteinsatzperiode eine Verfügbarkeit von mindestens 90% zu erreichen.

Die Instandhaltungs- (Wartungs-) organisation ist also ein bestimmender Faktor für die Verfügbarkeit.

Eine der wichtigsten Aufgaben ist es, die Organisationsformen der Instandhaltung (Wartung) nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu erarbeiten und die Instandhaltung (Wartung) der Luftfahrzeuge des Betriebs Agrarflug nach dem Bedarf der Landwirtschaft auszurichten.

Die Vorbereitung der weiteren einsatzorientierten Instandhaltung, die im Jahr 1983 zur Praxiseinführung vorgesehen ist, hat das Ziel,

- die Servicedurchsicht A, die gegenwärtig alle 230 Flugstunden in der Werft durchgeführt wird und 3 Arbeitstage beansprucht, so zu verändern, daß sich die Standzeit auf 1 Tag reduziert
- das Instandhaltungsintervall von 230 auf 300 Flugstunden zu erhöhen, um die Werft nicht wie bisher zweimal für jeweils 3 Arbeitstage anzuliegen.

Durch die Einführung der erwähnten Maßnahmen wird ein Einsatz der Agrarflugzeuge in der Haupteinsatzperiode ohne Unterbrechungen stabil gesichert und die technische Verfügbarkeit für diesen Zeitraum besonders erhöht. Durch die Freisetzung einer Flugzeugmechanikerkapazität von mindestens 20000 AKh ergibt sich eine weitere Steigerung der Arbeitsproduktivität. Die gewonnene freie Kapazität wird zur Erweiterung der Instandsetzungskapazität, der Ersatzteilneufertigung und des Rationalisierungsmittelbaus ohne Inanspruchnahme zusätzlicher Arbeitskräfte genutzt, und es werden somit bestehende Engpässe abgebaut.

Aus der Aufgabe, die Leistungsfähigkeit des Agrarflugs zum Nutzen der Landwirtschaft zu sichern und darüber hinaus Jahr für Jahr zu erhöhen, unternahmen die Kollektive der Abteilung Technik des Produktionsbetriebs Anklam beträchtliche Anstrengungen, die vorhandenen Grundfonds für eine effektivere Nutzung bereitzustellen. Dazu gehört die als einmalig geltende Leistung, die berechnete Lebensdauer des Agrarflugzeugs Z-37 von 5000 Flugstunden ohne Grundüberholung zu erreichen und die Voraussetzung zu schaffen, sie um 1500 Flugstunden je Flugzeug auf 6500 Flugstunden zu erweitern.

In den Jahren 1982 und 1983 wird daran gearbeitet, die technischen Voraussetzungen zur Lebensdauererhöhung bis auf 7300 Flugstunden, unter Beibehaltung des effektiven Instandhaltungssystems ohne Grundüberholung der Zelle (bestehend aus Tragwerk, Rumpf, Leitwerk und Fahrwerk), zu schaffen.

Die Darstellung der Effektivität des neuen Instandhaltungssystems, dessen Schwerpunkt die effektive Pflege und Wartung ist, kann in verschiedenen Kategorien erfolgen. Allein eine Erhöhung der Grenznutzungsdauer von 5000 auf 6500 bzw. 7300 Flugstunden bei gleichzeitiger Reduzierung des spezifischen Arbeitskräfteaufwands von 2,4 auf 0,99 Arbeitskräfte je Flugzeug bringt eine erhebliche Einsparung von Arbeitskräften. Die Senkung des spezifischen Materialverbrauchs von 55 auf 39 M je Flugstunde bedeutet eine weitere Material- und damit Selbstkostensenkung. Ein weiterer Nutzen entsteht durch die aufgrund der Erhöhung der Verfügbarkeit erbrachten zusätzlichen Leistungen für die Landwirtschaft und die daraus resultierenden Ertragssteigerungen.