

Grundlagen der Landtechnik

Herausgegeben mit Unterstützung durch die
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 36 (1986) Nr. 1, S. 1 bis 36

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Aktive Lageregelung von Auslegern zur Verbesserung der Verteilungsgüte von Pflanzenschutzmitteln

Von Christian Thomas und Horst Göhlich, Berlin*)

DK 632.934.1:62-531

Der ansteigende Kostendruck in der Landwirtschaft sowie wachsendes Umweltbewußtsein verlangen einen effizienten Umgang mit Spritzmitteln. Für größere Arbeitsbreiten und -geschwindigkeiten beim Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln stellt die Entwicklung lagegeregelter Spritzgestänge, bei denen fortlaufend über Sensoren die Lage des Gestänges zur Zielfläche ermittelt wird, einen wichtigen Beitrag zur weiteren Verbesserung der Arbeitsqualität von Feldspritzgeräten dar. Es wird über Versuche berichtet, mit einem elektrohydraulisch bezüglich Neigung und Höhe lagegeregelten Feldspritzgestänge bei Verwendung von berührungslos arbeitenden Ultraschall-Abstandssensoren die Verteilgenauigkeit der Spritzflüssigkeit unter Praxisbedingungen zu verbessern.

1. Einleitung

Von Schmitt-Ott wurde 1976 [1] anhand von vergleichenden Versuchen nachgewiesen, daß mit dem Übergang von starr zu pendelnd aufgehängten Gestängen infolge mehr oder weniger guter Schwingungsisolierung die Verteilgenauigkeit der Spritzflüssigkeit verbessert wird. Weitere Untersuchungen [2] bestätigten diese Versuchsergebnisse.

Derzeit werden von den Geräteherstellern fast ausschließlich pendelnd aufgehängte Gestänge angeboten [3]. Nur bei preiswerten Standardgeräten mit vergleichsweise geringer Arbeitsbreite, die der Abrundung des Verkaufsprogramms nach unten dienen, werden starre Gestängeaufhängungen vorgesehen.

Pendelnd aufgehängte Feldspritzgestänge nutzen die Schwerkraft zur Lagestabilisierung des Gestänges. Die Gestalt der Zielfläche hat keinerlei Einfluß auf die Lagestabilisierung. Die Grundeinstellung der Spritzdüsenhöhe muß üblicherweise vom Anwender selbst mit einer Seilwinde oder hydraulisch unterstützt vom Fahrerplatz aus vorgenommen werden. Eine Anpassung an Hanglagen oder

sonstige größere Unebenheiten wird je nach technischer Ausstattung am stehenden Fahrzeug oder während der Applikation hydraulisch gesteuert vorgenommen.

Im Hinblick auf eine kostensparende und umweltschonende Ausbringung von Pflanzenbehandlungsmitteln ist diese Gerätetechnik insbesondere bei Berücksichtigung tendenziell zunehmender Arbeitsbreiten und -geschwindigkeiten unter bestimmten Bedingungen nicht mehr ausreichend:

- Eine schwingungsarme Bewegung des Gestänges mit konstantem Abstand zum Boden ist je nach konstruktiver Ausführung besonders bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten nicht immer gewährleistet. Dies führt zur ungleichmäßigen Verteilung des Spritzmittels (Über- und Unterdosierung) sowie zu erhöhter Abtrift.
- Zur Vermeidung einer Bodenberührung der Auslegerenden im Fahrbetrieb wird häufig eine zu hohe Grundeinstellung der Düsenhöhe gewählt. Damit besteht die Gefahr der verstärkten Abtrift kleiner Tropfen.
- Mit einem hydraulischen Hangausgleich ist prinzipiell eine Anpassung des Gestänges an Hanglagen oder Bodenunebenheiten möglich. Dies erfordert jedoch vom Anwender gutes Schätzvermögen. Eine exakte Führung des Gestänges ist hierbei in der Praxis kaum möglich.

Erste Vorschläge zum Aufbau aktiv lagegeregelter Gestänge (z.B. [4]) waren wegen Fehlens geeigneter berührungslos arbeitender Sensoren unbefriedigend. Durch Einsatz der Mikroelektronik wurde es möglich, robuste und preiswerte Abstandssensoren für den Bereich mittlerer Abstände zu entwickeln. Als besonders geeignet für Anwendungen in der Landtechnik können Ultraschallsensoren nach dem Laufzeitverfahren angesehen werden [5].

Ein 1982 vorgestellter Prototyp [6] eines aktiv lagegeregelten Gestänges wies alle technischen Merkmale auf, die eine gute Funktionsfähigkeit erwarten ließen. Zur Abstandsmessung waren Ultraschall-Sensoren installiert. Die Regeleinheit bildete ein Mikrocomputer, der über ein Servoventil die hydraulischen Aktoren ansteuerte. Geräte nach diesem Prototyp sind bisher nicht produziert worden, auch entsprechende Versuchsergebnisse wurden bis heute nicht bekannt.

In einem weiteren aus England bekannt gewordenen Prototyp [7] findet ein elektromechanischer Schubspindeltrieb als Aktor Anwendung. Die Abstandssensoren arbeiten wie im vorgenannten Fall nach dem Prinzip der Ultraschall-Laufzeitmessung. Für dieses vergleichsweise langsam arbeitende System liegen Ergebnisse aus Feldversuchen bislang nicht vor.

*) Dr.-Ing. Chr. Thomas war wiss. Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktion, Bereich Landtechnik und Baumaschinen der TU Berlin, und ist jetzt bei der Zahnradfabrik Friedrichshafen AG tätig. Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich ist Leiter des Institutsbereiches.

2. Prinzipielle Systeme zur Lageregelung von Gestängen bezüglich Neigung und Höhe

Eine naheliegende Möglichkeit zur Verbesserung der Gestängeaufhängung, Bild 1, besteht darin, eine fernsteuerbare Einrichtung zur Hanganpassung in einen Regelkreis einzubeziehen. Der aktive Teil des Systems kann in ein vorhandenes Bauprogramm von passiven Aufhängesystemen leicht integriert, bzw. ältere Feldspritzengeräte können nachgerüstet werden, da keine oder nur wenige konstruktive Änderungen an den passiven Aufhängesystemen vorgenommen werden müssen. Die Aktoren der Hanganpassung, hydraulische oder elektromechanische Stellglieder, können prinzipiell übernommen werden. Da die pendelnde Aufhängung erhalten bleibt, müssen Pendel und aktiver Teil des Systems, der die Schwerpunktlage des Gestänges beeinflusst, in ihrem dynamischen Verhalten aufeinander abgestimmt werden. Andernfalls droht unter bestimmten Betriebsbedingungen Instabilität des Gesamtsystems, und ein Aufschaukeln der Gestängebewegungen wird möglich.

Aktive Gestänge-Aufhängesysteme beinhalten für die Führung in der Quervertikalebene keine zusätzlichen Funktionselemente gegenüber einem passiven Aufhängesystem. Der aktive Teil führt anders als bei den aktivunterstützten passiven Systemen nicht nur eine automatische, mehr oder weniger schnelle Anpassung der Gestängelage an das Bodenprofil herbei, sondern isoliert das Gestänge auch von den Wank-Eigenbewegungen des Schleppers. Die Regelung der Gestängelage muß mithin auch höherfrequente Anteile der Schlepperbewegung ausgleichen können. Aktive Systeme können mit einem im Betriebszustand in der Quervertikalebene ungeteilten oder geteilten Gestänge konzipiert werden.

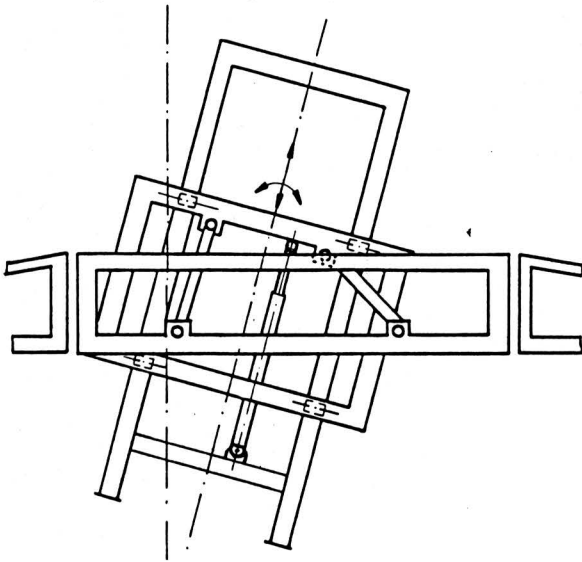


Bild 1. Passives System zur Neigungsregelung von Auslegern mit aktiv unterstützter Höhenregelung.

Das im ausgeklappten Zustand in der Quervertikalebene starre und ungeteilte Gestänge, das dem heutigen Baustandard entspricht, kann relativ leicht in das Konzept einer aktiven Lageregelung integriert werden. Hierbei wird das Gestänge zentral, um eine Achse in Fahrtrichtung drehbar, aufgehängt. Ein oder zwei Hydraulikzylinder, Bild 2, verdrehen das Gestänge laufend derart gegenüber dem hinsichtlich der Neigung schlepper- bzw. fahrgestellfesten Zwischenrahmen, daß Wankbewegungen ausgeglichen werden und es ruhig und bodenparallel geführt wird.

Beim geteilten geregelten Gestänge, Bild 3, werden die Ausleger unabhängig voneinander in ihrer Lage zur Zielfläche geregelt. Jeder Ausleger muß mindestens mit einem Sensor versehen sein. Zur Begrenzung des Bauaufwandes ist jedoch ein dreigeteiltes Gestänge sinnvoll, bei dem der am Mittelteil befestigte Sensor die Abstandsinformation zur Einstellung der zuvor gewählten Düsenhöhe gibt.

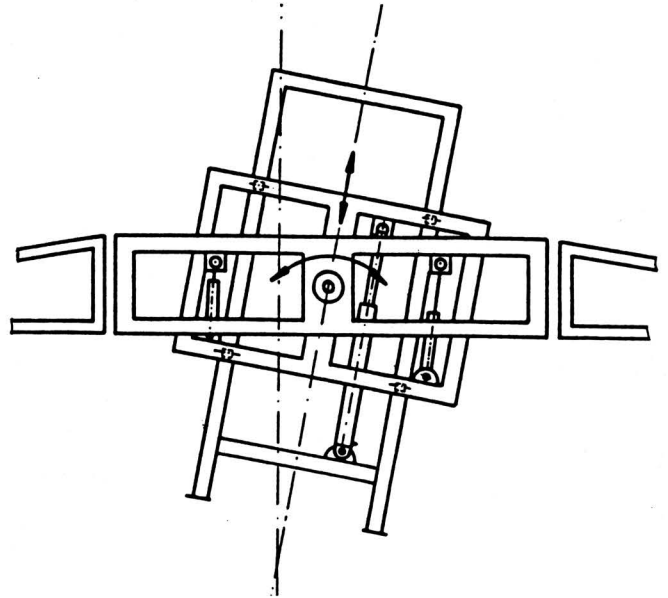


Bild 2. Aktives System der Höhen- und Neigungsregelung von Auslegern bei ungeteiltem Gestänge.

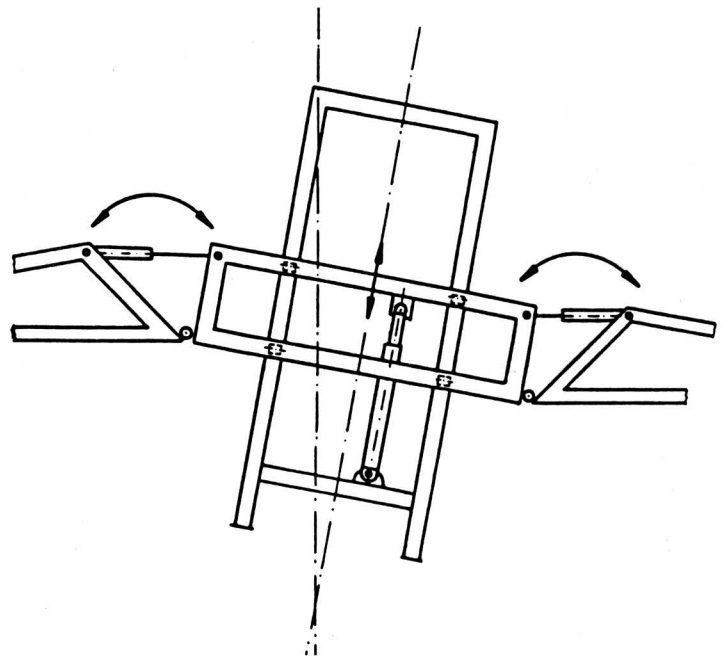


Bild 3. Aktives System der Höhen- und Neigungsregelung von Auslegern bei geteiltem Gestänge.

3. Feldspritzengerät mit lagegeregeltem ungeteiltem Gestänge

3.1 Aufhängekonstruktion

Zur Demonstration der Möglichkeiten moderner Regelsysteme wurde ein aktives System mit ungeteiltem Gestänge als Konstruktionsziel bestimmt. Schon im Grundkonzept wurde eine Höhenregelung des Gestänges mit einbezogen. Die Höhenregelung erfordert hier Änderungen an dem konventionellen Verstellrahmen, da dieser im Versuch exakt geführt werden muß. Gemäß den Gepflogenheiten im Feldspritzenbau wurde eine Schweißkonstruktion mit Maßtoleranzen im mm-Bereich gewählt, Bild 4.

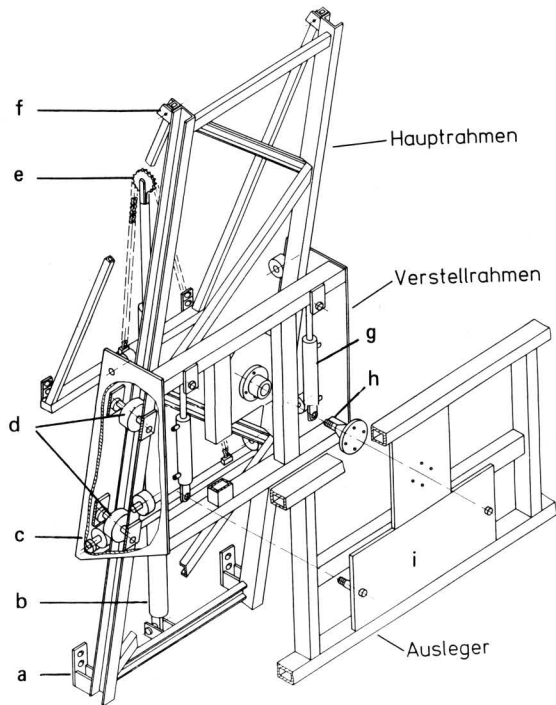


Bild 4. Der entwickelte Prototyp einer Aufhängung für ein neigungs- und höhengeregeltes Feldspritzgestänge.

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| a Verbindungselemente | e Kettenrad |
| b Zylinder zur Höheneinstellung | f U-Profile des Hauptrahmens |
| c Führungsrollen, Längsvertikalebene | g Zylinder für Neigungseinstellung |
| d Führungsrollen, Quervertikalebene | h Drehgelenk des Auslegers |
| | i Zentrale Trägerplatte des Auslegers |

Die Führung des Verstellrahmens wird von insgesamt zehn handelsüblichen wälzgelagerten Kunststofflaufrädern übernommen. Vier Räder d führen den Zwischenrahmen in der Quervertikalebene, wobei die Räder der einen Seite auf einstellbaren Exzentern montiert sind. Weitere sechs Räder c führen den Rahmen in der Längsvertikalebene. Diese Räder sind so verteilt, daß sie die anfallenden Momente optimal aufnehmen können. Die zwei unteren der sechs Räder sind wiederum über Exzenter einstellbar.

Zur Höhenregelung des Verstellrahmens wird der serienmäßige Hydraulikzylinder b (Kolbendurchmesser 40 mm) mit Kettenrad und Kette des Originalfeldspritzgerätes verwendet. Wegen der erhöhten Belastung des Kettenradgleitlagers wurde dieses erheblich verstärkt. Der Hauptrahmen mit zwei kräftigen U-Profilen f, auf deren Außenflächen die Räder des Zwischenrahmens laufen, ist als ebenes Fachwerk konzipiert, an das die Verbindungselemente über Gelenke angeschlossen sind.

Das Feldspritzgestänge ist über eine Lagereinheit h mit einem einstellbaren Kegelrollenlagerpaar um die Fahrzeuglängsachse drehbar mit dem Verstellrahmen verbunden. Die zwei hydraulischen Schwenkzylinder g sind symmetrisch zum Drehpunkt des Gestänges angebracht und statisch entlastet. Die tragende Mittelplatte i des ansonsten unveränderten Gestänges bietet genügend Fläche zum Anbau der hydraulischen Funktionselemente.

3.2 Auslegung der Hydraulikanlage

Da die Hydraulikanlage des Schleppers bei der Applikation von Pflanzenbehandlungsmitteln wenig genutzt wird und die Zapfwelle zum Pumpenantrieb dient, wurde die Konstantstromanlage des Schleppers in das Hydraulikkonzept integriert. **Bild 5** zeigt den für Versuchszwecke entworfenen Hydraulikschaltplan. Eine doppelt wirkende hydraulische Steckdose reicht dabei zur Versorgung der Regelkreise zur Neigungs- und Höhenregelung aus.

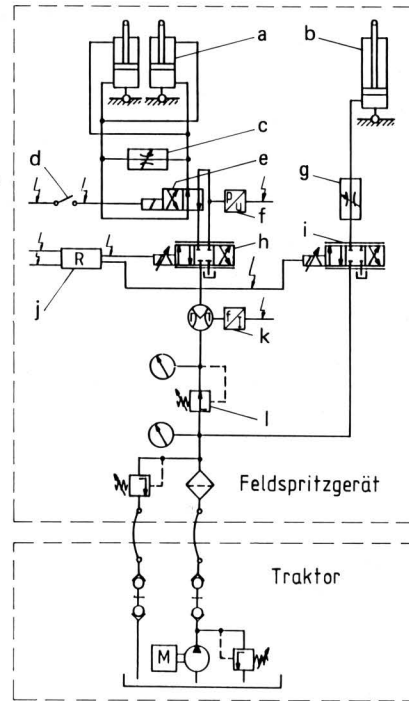


Bild 5. Hydraulikschaltplan zur analogen Neigungs- und Höhenregelung mit Proportionalventilen.

- | | |
|--|--------------------------------------|
| a Stellzylinder für Neigungsregelkreis | g Hub- und Senkdrossel |
| b Stellzylinder für Höhenregelkreis | h Proportionalventil Lagerregelkreis |
| c Dämpfungsdrossel | i Proportionalventil Höhenregelkreis |
| d Sicherheitsschalter | j analoge Regeleinheit |
| e Kurzschlußventil | k Meßturbine |
| f Druckaufnehmer | l Druckregelventil |

In einem Pendelversuch wurde das Trägheitsmoment des Feldspritzgestänges mit 15 m Arbeitsbreite für den Schwerpunkt und bei Drehung um eine Achse in Fahrtrichtung zu $J_S = 1300 \text{ m}^2 \text{ kg}$ bestimmt. Für die Verstellung der Gestängeneigung wurden beide Hydraulikzylinder so parallelgeschaltet, daß in beiden Schwenkrichtungen eine gleich große Stellgeschwindigkeit erzeugt werden kann. Zur Zylinderauslegung wurde mit einem Eingangsdruck von $p_0 = 160 \text{ bar}$ und einem Druckabfall durch das Ventil von $p_N = 70 \text{ bar}$ bei Nenndurchfluß gerechnet. Die Zylinder wurden so ausgelegt, daß bei einem Übersetzungsverhältnis von 1 : 29 bei einem vertikalen Stellweg des Auslegerendes von 1,2 m die Kolben die maximal zulässige Geschwindigkeit $v_{K, \text{max, zul}} = 13 \text{ m/min}$ erreichen. Die Kolbenbeschleunigung beträgt dabei $\dot{v}_K = 0,61 \text{ m/s}^2$. Mit diesen Ausgangsdaten ergibt sich eine wirksame Zylinderarbeitsfläche $A_Z = 14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Gewählt wurden Zylinder mit einem Kolbendurchmesser $d_K = 32 \text{ mm}$ und einem Kolbenstangendurchmesser $d_{KS} = 16 \text{ mm}$.

Diese theoretischen Überlegungen können den instationären Beschleunigungsvorgang der Kolben nur annähernd beschreiben. Insbesondere in der ersten Beschleunigungsphase ist der Vorgang durch eine gedämpfte Schwingung mit einer zunächst sehr hohen Druckamplitude und hohen Kolbenbeschleunigung gekennzeichnet [8].

Der Zylinder der Höhenverstellung muß für jeden Verschiebevorgang die statische Last des Gestänges und Verstellrahmens überwinden. Der notwendige Arbeitsdruck des Höhenregelkreises stimmt mit dem des Neigungsregelkreises nur bei exakter Abstimmung der wirksamen hydraulischen Arbeitsflächen der Zylinder für die Neigungs- und Höhenregelung überein. Für den Prototyp wurde deshalb am Eingang des Neigungsregelkreises ein Druckregelventil l vorgesehen. Da elektrohydraulische Regelsysteme stark ungedämpft sind (s.a. [9, 10]), wurde auf die wirkungsgradmindernde Dämpfungsdrossel c nicht verzichtet.

Die dem Zylinder der Höhenregelung b vorgeschaltete Hub- und Senkdrossel g kann durch ein Drosselrückschlagventil, das das Ausfahren des Höhenzylinders erleichtert, ersetzt werden. Die hydraulische Leistungsaufnahme des Neigungs- und Höhenregelkreises ist diskontinuierlich, so daß bei der eingangs vorausgesetzten Konstantstromanlage eine Kühlung notwendig werden kann. Die zwei parallel geschalteten Zylinder der Neigungsregelung können bei Verzicht auf gleiche Stellgeschwindigkeit in beiden Schwenkrichtungen durch einen Zylinder ersetzt werden.

3.3 Analoge Regeleinheit

Die Neigungsregelung muß bei der Nachführung des Gestänges parallel zum Bodenprofil einen Teil der Wankbewegungen des Schleppers bzw. Fahrgestells mit Frequenzen bis zu ca. 10 Hz kompensieren.

Die analoge Regeleinheit für die Regelung mit Proportionalventilen ist in Bild 6 dargestellt. Die Logik des Neigungsregelkreises regelt die Differenz der unter den beiden Auslegerenden gemessenen Abstände aus, während der Höhenregelkreis die Differenz zwischen der halben Summe der Abstandssignale und dem vorgegebenen Sollwert über ein P-Glied verstärkt. Für den sensiblen Neigungsregelkreis, der mit einer Wegübersetzung für die Auslegerenden von 1 : 29 arbeitet, ist ein PID-Regler vorgesehen. Für ein schnelles Ansprechen des Proportionalventiles ist dem Stellsignal ein Zittersignal überlagert.

Das Regelsystem ist modular aufgebaut, und mittels Potentiometern können die Regelparameter eingestellt werden.

4. Feldversuche

4.1 Meßwerterfassung und -verarbeitung

Für die Feldversuche stand neben dem aktiv geregelten Versuchsfeldspritzgerät ein weiteres baugleiches Anbaugerät mit einem passiven Aufhängesystem des Gestänges zur Verfügung. An beiden Geräten wurden zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Gestänges in der Quervertikalebene je zwei Beschleunigungsaufnehmer an den Gestängeenden, je zwei am unregulierten Hauptrahmen und zwei Ultraschall-Abstandssensoren (US-Sensoren) als Referenzsensoren installiert, Bild 7.

Die Steuersignale für den Beginn und das Ende einer Testfahrt erzeugte eine fahrzeuffeste Lichtschranke. Die momentane Fahrgeschwindigkeit wurde mit einem vom rechten Vorderrad des Versuchsfahrzeugs angetriebenen Tachogenerator und einem Digitalmultimeter zur Anzeige gebracht. Für eine möglichst gleichbleibende Fahrgeschwindigkeit während eines Versuchs sorgte die Fixierung des Gaspedals am Versuchsfahrzeug.

Zur Aufnahme der Kolbenbewegungen für die Neigungs- und die Höheneinstellung am Versuchsgerät wurden zusätzlich zwei resistive Wegaufnehmer eingesetzt. Neben den Meßumformern befanden sich nur vorverarbeitende Elektronikkomponenten, wie Verstärker und Filter, und die Telemetriesendereinheit mit Eingangsfiler und A/D-Wandler auf dem Versuchsfahrzeug. Das erschütterungsempfindliche Cassetten-Bandgerät zur Speicherung der Meßdaten verblieb mit der Telemetrieempfängereinheit und einem Monitor zur Aufnahmekontrolle im ortsfesten Begleitfahrzeug, Bild 8.

Zur Meßdatenverarbeitung wurde im Labor ein digitales Meßwert-erfassungs- und -verarbeitungssystem nach Bild 9 eingesetzt. Ein der Meßwerterfassungseinheit vorgeschalteter Presampling-Filter mit einer eingestellten Grenzfrequenz von 5 Hz bei einer Abtastfrequenz von 51 Hz diente zur Vermeidung des Aliasing-Effektes. (Der Aliasing-Effekt ist eine Signalverfälschung, die sich aufgrund einer zu niedrigen Abtastfrequenz im Verhältnis zur Frequenz des zu verarbeitenden Signals ergibt. Als Abhilfe werden Antialiasing-Tiefpaßfilter eingesetzt, die oberhalb ihrer Grenzfrequenz einen extrem starken Amplitudenabfall verursachen. Mit Rücksicht auf die nicht ideale Charakteristik des Filters ist die Filtergrenzfrequenz deutlich niedriger als die Abtastfrequenz zu wählen.)

4.2 Versuchsdurchführung

Die Planung und Abwicklung der Feldversuche Mitte April 1985 in Berlin-Gatow erfolgte unter Mitwirkung zweier erfahrener Landwirte. Das ausgewählte saattbettfertige Feld, von dem eine 100 m lange Strecke abgesteckt wurde, war nicht völlig eben. Die aus Streckenlänge und Arbeitsbreite des Auslegers überspannte Feldfläche war in Längsrichtung leicht schraubenförmig verwunden. Die maximalen Höhendifferenzen zu einer gedachten planen Fläche betragen weniger als ± 20 cm.

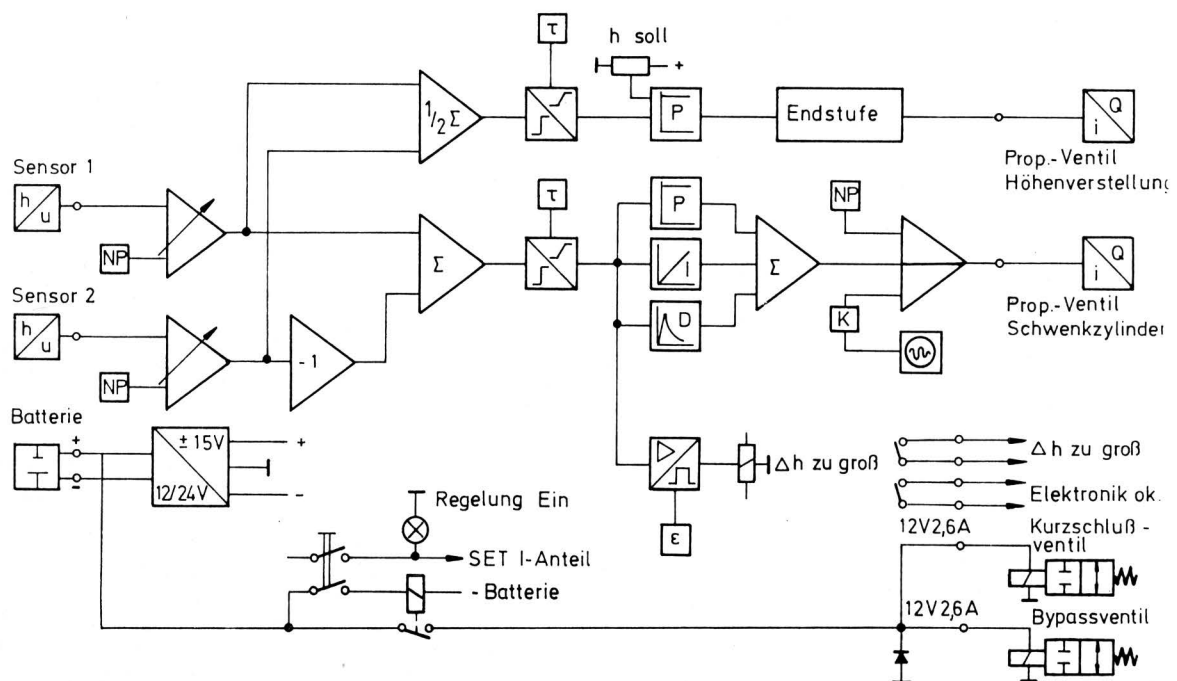


Bild 6. Blockschaltbild der analogen Regeleinheit.

Die Bedienung des hydraulischen manuell gesteuerten Hangausgleichs am Vergleichsgerät hätte keine Vorteile in der Boden-anpassung ergeben. Der Hangausgleich wurde deshalb während der Fahrt nicht betätigt. Geprüft wurden das Versuchsfeldspritzgerät und das mit Ausnahme der Aufhängung baugleiche Vergleichsfeldspritzgerät bei den drei mittleren Fahrgeschwindigkeiten
 $\bar{v} = 7,2 \text{ km/h}$, $\bar{v} = 9 \text{ km/h}$, $\bar{v} = 12 \text{ km/h}$.

Für jede Versuchseinstellung wurden drei Hin- und Rückfahrten über die Telemetrestrecke vom Cassetten-Bandgerät aufgezeichnet. Nach jeweils drei Hin- und Rückfahrten befuhr der Versuchsschlepper eine seitlich etwas versetzte Fahrspur, um den Einfluß der Bodenverdichtung auf das Bewegungsverhalten des Versuchstraktors gering zu halten.

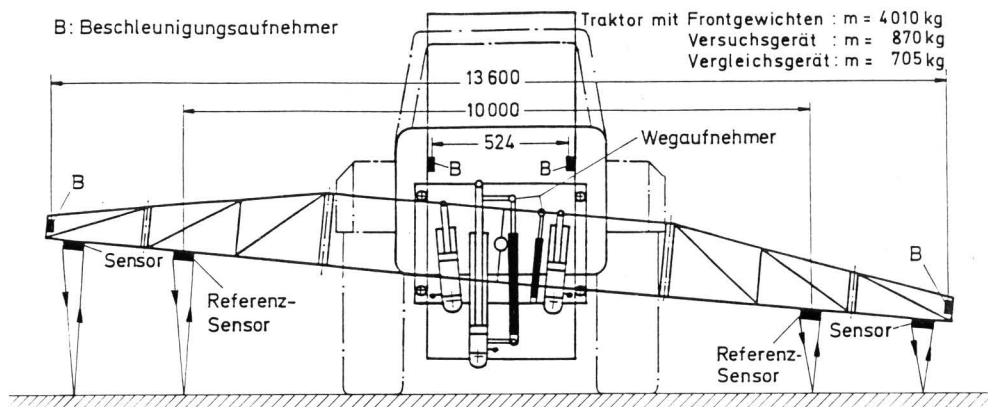


Bild 7. Geometrische Lage der Meßwertaufnehmer am Versuchs-Feldspritzgerät.

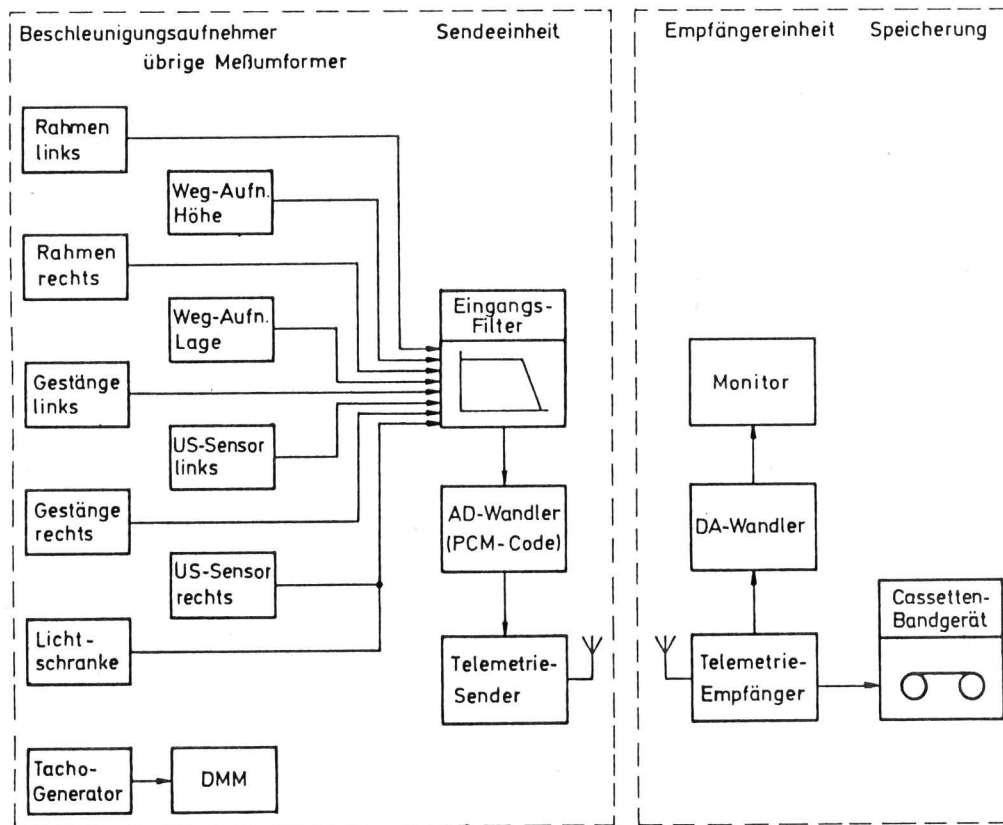


Bild 8. Blockschaltbild zur Meßwertaufnahme und -registrierung bei den Feldversuchen.

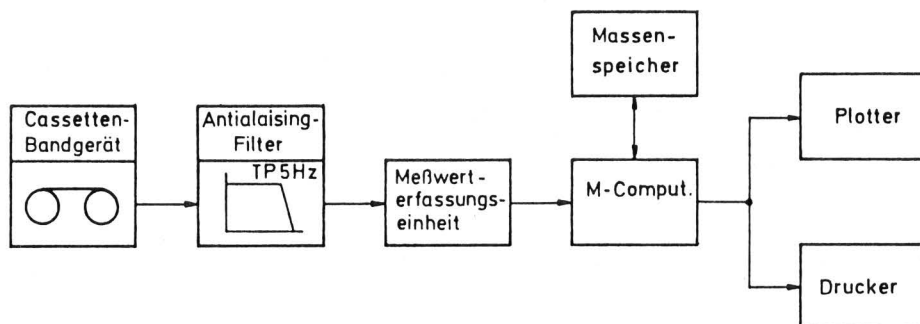


Bild 9. Blockschaltbild zur Meßwertverarbeitung mit dem Digitalrechner.

4.3 Abweichung der Ausleger von der Sollhöhe

Ein besonders wichtiges Kriterium zur Beschreibung der Funktionstüchtigkeit einer Gestängeaufhängung sind die bei Fahrt auftretenden Höhenabweichungen der beiden Auslegerhälften vom Sollwert. Im weiteren wird deshalb gezielt auf diesen Punkt eingegangen.

Die Höhe des Auslegers über dem Bodenprofil unterliegt während der Fahrt statistischen Schwankungen. Interessant ist deshalb die Wahrscheinlichkeit, mit der innerhalb eines Toleranzbereiches der Ausleger eine gewählte Sollhöhe sicherstellt. Der Wert der Wahrscheinlichkeit läßt sich als Grenzwert eines statistischen Experimentes auffassen, bei dem aus einer abzählbar endlichen Menge von Ereignissen der Anteil eines bestimmten Ereignisses, bezogen auf die Menge aller beobachteten Ereignisse, festgestellt wird. In der meßtechnischen Praxis wird dieser Grenzwert nicht erreicht, so daß dieses Experiment zur Angabe der relativen Häufigkeit mit der grafischen Darstellung in Form eines Histogrammes führt.

Anhand der Häufigkeitsverteilungen der mit den Ultraschall-Referenzsensoren gemessenen Abweichungen von der Sollhöhe für das geregelte und unregelmäßige Feldspritzgerät in Bild 10 und 11 lassen sich die Vorteile der Neigungs- und Höhenregelung erkennen. Beim Vergleichsgerät (Bild 11) liegen die Maxima der relativen Häufigkeit überwiegend um eine Klassenbreite versetzt links und rechts vom Sollwert. Erklärbar wird dieser Umstand durch den

leichten relativen Anstieg des Bodenprofils auf der einen und den entsprechenden Abfall auf der anderen Auslegerseite. Die Neigungs- und Höhenregelung (Bild 10) paßt den Ausleger an dieses Bodenprofil an, so daß der Sollwert besser eingehalten werden kann.

Die Häufigkeitsverteilungen für das geregelte Versuchsgerät fallen demnach enger aus mit höheren maximalen Werten der relativen Häufigkeit als beim unregelmäßigen Vergleichsgerät. Die für das Vergleichsgerät bei den mittleren Fahrgeschwindigkeiten 12 km/h und 9 km/h andeutungsweise erkennbaren Säulen für Höhenabweichungen unterhalb von - 50 cm dokumentieren, daß die bei den Versuchsfahrten deutlich sichtbaren Taumelbewegungen des Auslegers zeitweise zu Bodenberührungen geführt haben.

Eine anschauliche Darstellung der Güte einer Aufhängung liefert die Standardabweichung für die Abweichungen von der Sollage in der Quervertikalebene bezogen auf die halbe Auslegerbreite, Bild 12. Werden neben den Störungen über die Aufhängung des Schleppers Bodenunebenheiten unter dem Ausleger unmittelbar als Sollhöhenstörungen wirksam, können diese vom geregelten Ausleger ausgeglichen werden. In diesem Praxistest wurden deshalb für das unregelmäßige Vergleichsgerät im Mittel um 63 % höhere Werte der bezogenen Standardabweichung als beim analog geregelten Versuchsgerät ermittelt.

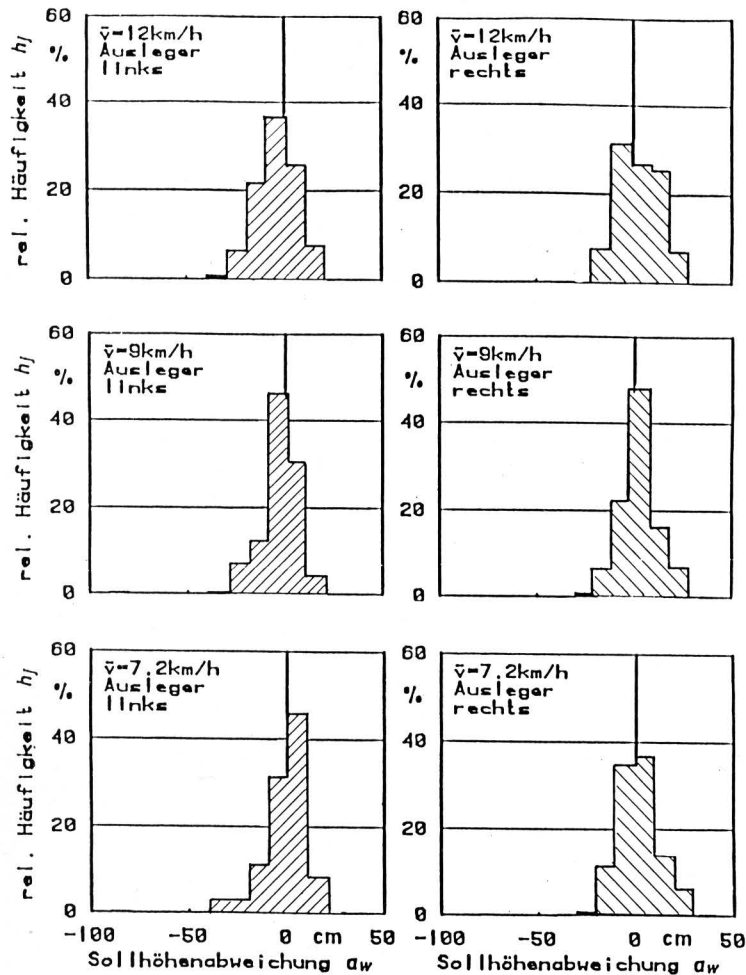


Bild 10. Häufigkeitsverteilung der Abweichungen von der Sollhöhe der linken und rechten Auslegerhälfte für das analog geregelte Feldspritzgerät. Die Seitenbezeichnung bezieht sich auf die Orientierung bei Hinfahrt.

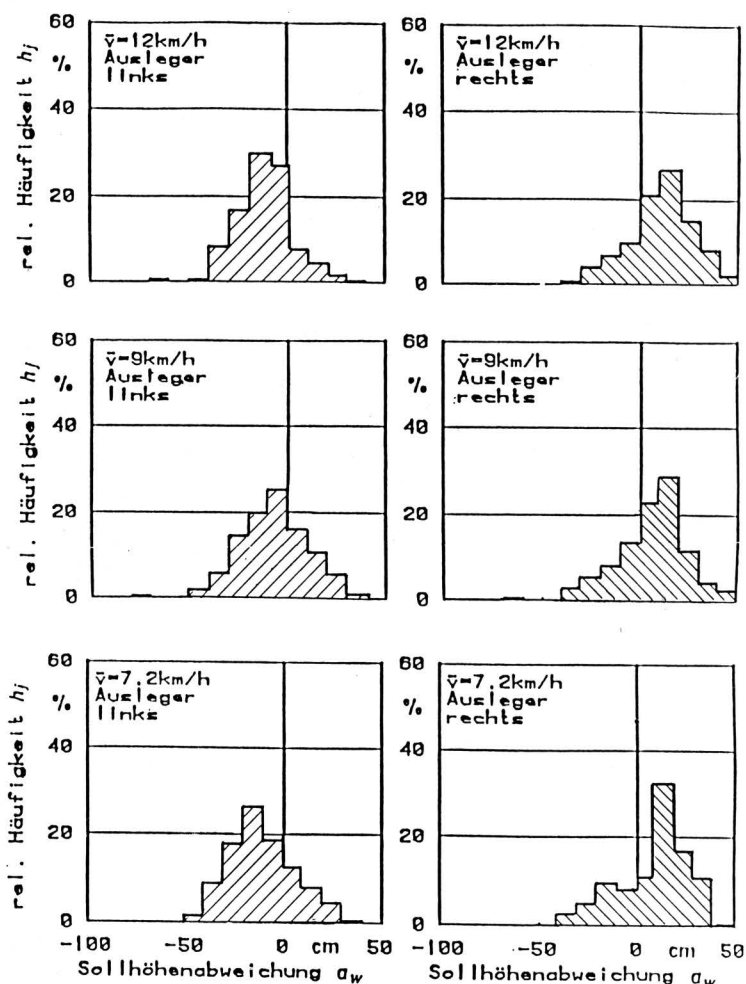


Bild 11. Häufigkeitsverteilung der Abweichungen von der Sollhöhe der linken und rechten Auslegerhälfte für das Vergleichsfeldspritzgerät. Die Seitenbezeichnung bezieht sich auf die Orientierung bei Hinfahrt.

Vergleichende Untersuchungen auf einer 4-Stempel-Hydropulsanlage mit Simulation der genormten Fahrbahn "Smooth-Track" und einer Balkenstabilisierung gegenüber dem ebenen Hallenboden lassen die Vorteile des geregelten Auslegers weniger deutlich erkennen (untere Kurven in Bild 12). Die ausschließlich vertikale Anregung der Räder im Simulationsversuch kann nur unvollständig ein Bewegungsverhalten von Schlepper und Ausleger wie auf natürlicher Fahrbahn erzeugen. Die im Feldeinsatz beobachteten Taumelbewegungen des Auslegers am Vergleichsgerät konnten im Labor nicht reproduziert werden.

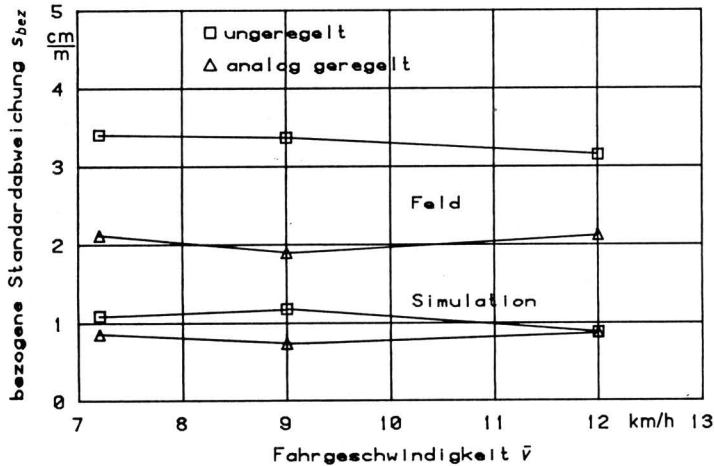


Bild 12. Standardabweichung für die Abweichungen von der Sollhöhe bezogen auf die halbe Auslegerbreite für verschiedene mittlere Fahrgeschwindigkeiten auf simulierter und natürlicher Fahrbahn.

4.4 Theoretische Verteilung der Spritzflüssigkeit bei Berücksichtigung der Abweichungen der Ausleger von der Sollhöhe

Die für jede Versuchseinstellung über die Sensoren der beiden Ausleger gewonnenen Abstandssignale erlauben theoretische Betrachtungen zur Verteilgüte der Spritzflüssigkeit. Mit den zu einem beliebigen Zeitpunkt anliegenden Abstandswerten der beiden Sensoren kann keine exakte Aussage über die Abstände zum Boden für den gesamten Ausleger getroffen werden. Es muß deshalb vereinfachend angenommen werden, daß für die Zeitdauer des jeweiligen Meßwertes der Boden in Fahrtrichtung stufenweise eben ist, mit einer Stufenbreite, die durch die Abtastfrequenz von 20 Hz des Sensors und die Fahrgeschwindigkeit gegeben ist.

Geht man von einer Flachstrahldüse mit einer idealen Dreiecksverteilung aus, so ist mit der Spritzbreite b_{Sp} als benetzte Strecke am Boden und der Koordinate x , die von der Position der Düse nach beiden Seiten gezählt wird, für die örtliche Belagsdichte der Einzeldüse (s.a. [1]):

$$V_{DE}(x) \sim \frac{1}{b_{Sp}} \left(1 - \frac{2|x|}{b_{Sp}} + \left| 1 - \frac{2|x|}{b_{Sp}} \right| \right) \quad (1)$$

Mit der Koordinate y in Fahrtrichtung gilt für den Düsenabstand zum Boden

$$a = a(x, y)$$

und

$$b_{Sp}(x, y) = 2 a \tan(\alpha/2) \quad (2)$$

Bei einem Strahlwinkel von $\alpha = 110^\circ$ wird im weiteren angenommen, daß in Abhängigkeit von der Düsenhöhe bis zu 5 Düsen die örtliche Belagsdichte $V_D(x, y)$ an einer beliebigen Stelle beeinflussen können. Wird nun jede Auslegerhälfte in diskrete Meßpunkte

aufgeteilt, die für eine vereinfachte Schreibweise zunächst mit dem geometrischen Ort der Düsen nach Bild 13 identisch sein sollen, so ist mit einem Abstand von 50 cm der Düsen untereinander und einer halben Auslegerlänge von 7,25 m für die geprüften Feldspritzgeräte, sowie der Höhe a_0 des mittigen Auslegerdrehpunktes über dem Boden

$$a(x_{n,k}, y) = a_0 - [50n + 50(3 - k) + 25](a_0 - a_m)/500 \text{ (cm)} \quad (3)$$

mit

$$x_{n,k} = n x_k$$

$$n = 0, \pm 1 \dots \pm 14 \quad (4)$$

$$k = 1 \dots 5 \quad (4)$$

Den fortlaufenden Meßwert in Fahrtrichtung y unter dem Sensor (Abstand zum Gestängedrehpunkt 500 cm) charakterisiert a_m . Mit Gl. (3) ist für Gl. (2) zu schreiben

$$b_{Sp}(x_{n,k}, y) = 2a(x_{n,k}, y) \tan(\alpha/2) \quad (5)$$

Für die örtliche Belagsdichte im Düsenverband V_D gilt dann schließlich

$$V_D(x_n, y) \sim \sum_{k=1}^5 \frac{1}{b_{Sp}(x_{n,k}, y)} \left(1 - \frac{2|x_n + 50(3 - k) + 25|}{b_{Sp}(x_{n,k}, y)} + \left| 1 - \frac{2|x_n + 50(3 - k) + 25|}{b_{Sp}(x_{n,k}, y)} \right| \right) \quad (6)$$

mit

$$n = 0, 1, \dots, 14.$$

Bei einer fortwährend konstanten Düsenhöhe a_0 beträgt die Spritzbreite b_{Sp0}

$$b_{Sp0} = 2 a_0 \tan(\alpha/2) \quad (7)$$

und für die ideale Belagsdichte ist zu schreiben

$$V_{D0}(x_n, y) \sim \sum_{k=1}^5 \frac{1}{b_{Sp0}} \left(1 - \frac{2|x_n + 50(3 - k) + 25|}{b_{Sp0}} + \left| 1 - \frac{2|x_n + 50(3 - k) + 25|}{b_{Sp0}} \right| \right) \quad (8)$$

Wird nun für jeden Punkt x_n, y die Belagsdichte V_D auf die ideale Belagsdichte V_{D0} bezogen, liegt ein Maß für die relativen Verteilungsschwankungen, verursacht durch die fehlerhafte Auslegerneigung, vor

$$V_{rel}(x_n, y) = \frac{V_D(x_n, y)}{V_{D0}(x_n, y)} \quad (9)$$

Da in den Gln. (5) und (7) die selben Faktoren, wie etwa der Düsendurchfluß, einzutragen sind, ist Gl. (9) gültig.

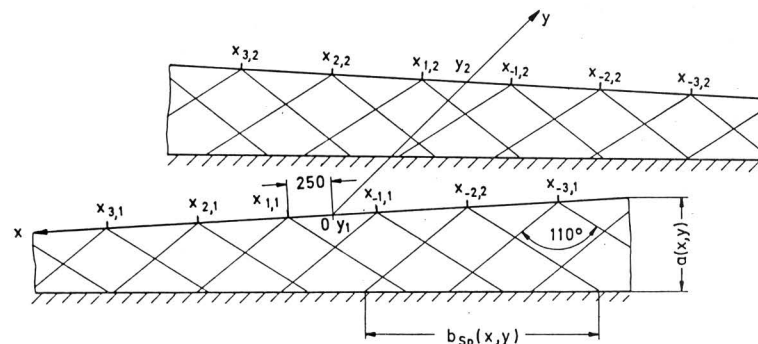


Bild 13. Bezeichnungen zur Beschreibung von Spritzbreite b_{Sp} und Düsenabstand zum Boden a als Funktionen der Auslegerkoordinate x und der Wegkoordinate y .

Die Feldfläche wird in Fahrtrichtung mit der Stufenbreite y_m abgetastet, so daß die Basisgleichung zur Berechnung der relativen Verteilsschwankungen der Spritzflüssigkeit mit dem Digitalrechner lautet

$$V_{rel}(x_n, y_m) = \frac{V_D(x_n, y_m)}{V_{D_0}(x_n, y_m)} \quad (10)$$

mit

$$y_m = m y \quad (11)$$

Zur Bestimmung der Verteilsschwankungen am Digitalrechner wurden weitere, programmtechnisch mögliche Maßnahmen zur Erhöhung der statistischen Sicherheit getroffen. Die Schrittweite für die Auslegerhälfte wurde auf 20 cm herabgesetzt. Das Programm muß dann die Lage der nächstliegenden 5 Düsen selbst berechnen. Der Startpunkt am Ausleger für jeden Wert y_m wird durch eine Zufallszahl im Bereich 0 . . . 20 cm vom Programm bestimmt.

In das Programm wurde als Grundeinstellung für die Auslegerhöhe $a_0 = 50$ cm eingegeben. In den Versuchen war der Ausleger

höher eingestellt. Dies beeinflusst jedoch nicht das Rechenergebnis, da vom Rechenprogramm Abstandsschwankungen nach unten von mehr als 50 cm auf 50 cm fixiert werden.

Die statistisch regellos verteilten Werte der relativen Belagsabweichung für die Feld- wie Prüfstandsmessungen sind in den Histogrammen von Bild 14 und 15 grafisch dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden in den Grafiken die weit streuenden Abweichungen auf $\pm 20\%$ begrenzt. Belagsabweichungen, die über $\pm 18\%$ liegen, wurden den beiden Endklassen (gepunktete Säulen) zugerechnet.

Aus der Darstellung wird deutlich, daß die Belagsabweichungen unter Praxisbedingungen beim ungeregelten Ausleger (Bild 15) wesentlich größer als beim analog geregelten Ausleger (Bild 14) sind. Besonders fällt dies für die in Fahrtrichtung linke Auslegerhälfte auf, da infolge der leicht schraubenförmig gewundenen Bodenfläche der Abstand hier längs der Versuchsstrecke abnahm, während er zur rechten Auslegerhälfte zunahm. Abweichungen von der Sollhöhe, die die Auslegerhöhe verringern, wirken sich jedoch sehr viel stärker negativ auf die Verteilungsgüte aus als Abweichungen mit einer Zunahme der Auslegerhöhe.

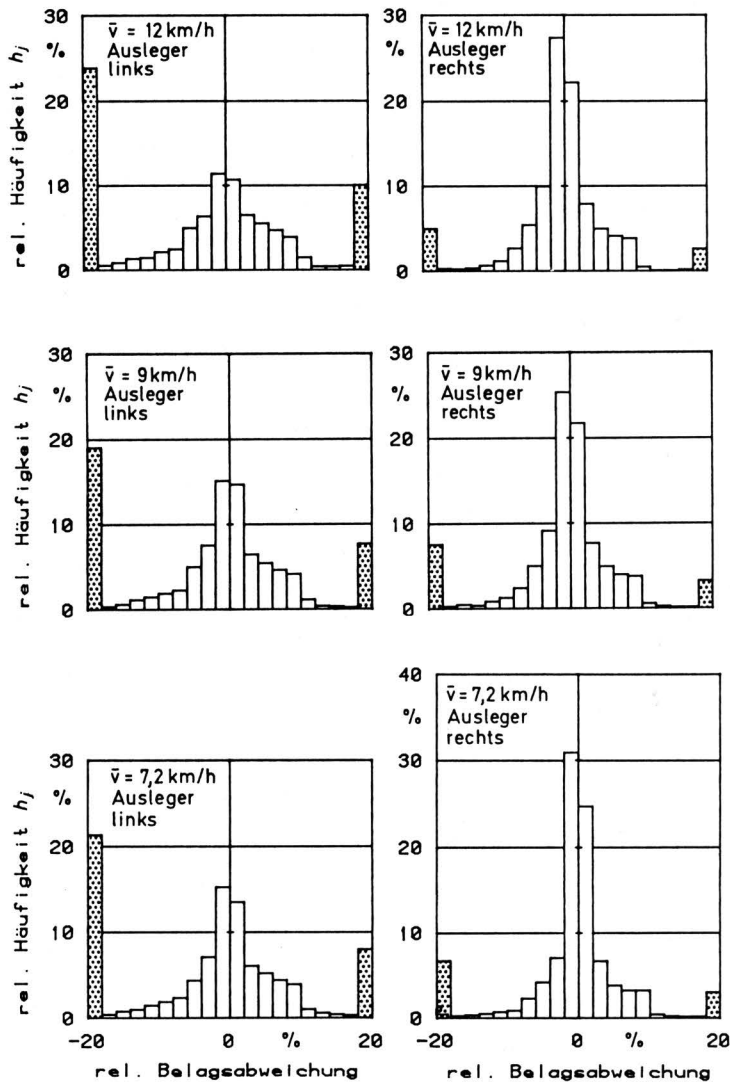
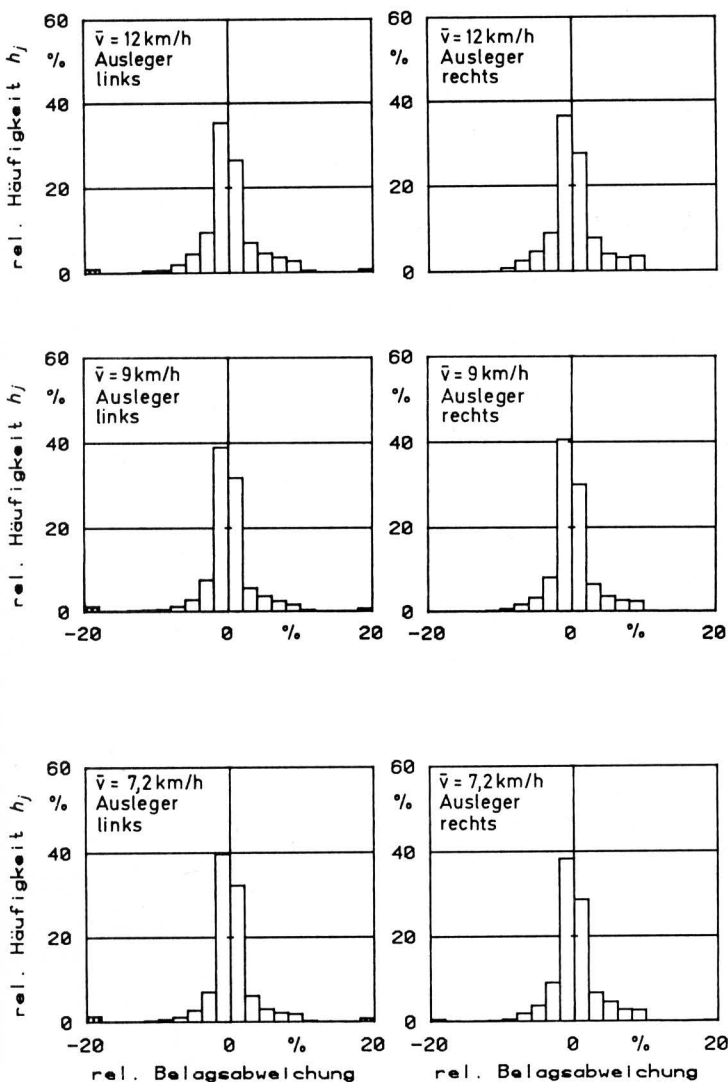


Bild 14. Häufigkeitsverteilung der theoretischen relativen Abweichungen der Belagsdichte, basierend auf den gemessenen Abstandswerten für den analog geregelten Ausleger des Versuchsfeldspritzgerätes auf natürlicher Fahrbahn. Abweichungen über $\pm 18\%$ sind in den gepunkteten Säulen zusammengefaßt.

Bild 15. Häufigkeitsverteilung der theoretischen relativen Abweichungen der Belagsdichte, basierend auf den gemessenen Abstandswerten für den ungeregelten Ausleger des Vergleichsfeldspritzgerätes auf natürlicher Fahrbahn. Abweichungen über $\pm 18\%$ sind in den gepunkteten Säulen zusammengefaßt.

5. Zusammenfassung

Bei der konstruktiven Verwirklichung neigungs- und höhengeregelter Feldspritzgestänge können aktiv unterstützte passive Systeme und aktive Systeme, die gegenüber einem passiven Aufhängesystem keine zusätzlichen Funktionselemente für die Führung in der Quervertikalebene beinhalten, unterschieden werden. Bei aktiven Systemen ist eine Lageregelung des ungeteilten Auslegers oder eine unabhängige Lageregelung mehrerer Auslegerteile möglich.

Am Institut für Landtechnik in Berlin wurde basierend auf einem Seriengerät ein aktiv neigungs- und höhengeregeltes Feldspritzgerät entwickelt. Das Gestänge ist zentral in seinem Schwerpunkt über eine Wälzlagereinheit an einem Verstellrahmen aufgehängt. Für eine verzögerungs- und spielarme Höheneinstellung wird der Verstellrahmen über wälzgelagerte Kunststofflaufräder an den U-Profilen des Hauptrahmens geführt.

Das analoge Regelkonzept des aktiven Aufhängesystems umfaßt berührungslos arbeitende Ultraschall-Sensoren nach dem Laufzeitverfahren an den Auslegerenden, eine gekapselte Regeleinheit und hydraulische Stellzylinder. Zur Neigungsregelung wird die Differenz zwischen den unter den beiden Auslegerenden gemessenen Abständen ausgeregelt, während der Höhenregelkreis die Differenz der halben Summe der Abstandssignale mit einem vorgegebenen Sollwert über ein P-Glied verstärkt.

Der Prototyp mit geregelter Ausleger und ein baugleiches Feldspritzgerät mit passivem Aufhängesystem wurden in Feldversuchen untersucht. Mit jeweils zwei Ultraschall-Abstandssensoren an den Auslegerenden erfolgte eine laufende Registrierung der Abstände zum Erdboden. Die anschließende statistische Auswertung der Abstandssignale und deren Darstellung in Histogrammen zeigte für das Versuchsgerät mit geregelter Ausleger eine deutlich bessere Eingrenzung der Auslegerabstände im Bereich der Sollhöhe. Die Standardabweichung für die Abweichungen von der Sollage in der Quervertikalebene, bezogen auf die halbe Auslegerbreite, lag für den ungeregelten Ausleger im Mittel um 63 % höher.

Unter Einbeziehung der gespeicherten Abstandssignale aus den Messungen wurde ein Rechenprogramm zur Bestimmung der theoretischen Flüssigkeitsverteilung erstellt. Mit einer Gestängesollhöhe von 50 cm und einem Spritzwinkel von 110° wurden für den geregelten Ausleger wesentlich geringere Abweichungen in der örtlichen Belagsdichte ermittelt als für den Vergleichsausleger.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Schmidt-Ott, M.*: Konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verteilungsgüte von Pflanzenschutz- und Düngemaschinen. Diss. TU Berlin 1976.
- [2] *Ganzelmeier, H. u. E. Moser*: Einfluß der Auslegerbewegungen von Feldspritzgeräten auf die Verteilgenauigkeit der Spritzflüssigkeit. *Grundl. Landtechnik* Bd. 27 (1977) Nr. 3, S. 65/72.
- [3] *Thomas, C.*: Die Industrie stellt sich der erhöhten Verantwortung – Pflanzenschutztechnik auf der DLG-Ausstellung 1984. *Landtechnik* Bd. 39 (1984) Nr. 7/8, S. 339/42.
- [4] *Schumacher, F.*: Steleinrichtung für fahrbare Spritzen in der Landwirtschaft. Gebrauchsmuster 6 8033 047.8, Deutsches Patentamt, München.
- [5] *Thomas, C.*: Berührungslos arbeitende Abstandssensoren in der Landtechnik. *Grundl. Landtechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 3, S. 125/32.
- [6] Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (Cemagreff): Prociède de stabilisation par rapport a une trajectoire recherchée d'un élément monté mobile selon au moins une composante de mouvement et son application a la stabilisation d'une rampe pulverisatrice. Offenlegungsschrift 8240 1851.9 vom 8.10.82, Europäisches Patentamt.
- [7] *Frost, A.*: Simulation of an active spray boom suspension. *J. agric. Engng. Res.* Bd. 30 (1984), S. 313/25.
- [8] *Paetzold, W.*: Beitrag zum dynamischen Verhalten von Hydrozylindern. *ölhydraulik und pneumatik* Bd. 24 (1980) Nr. 8, S. 577/82.
- [9] *Kauß, W.*: Aktive, hydraulische Schwingungsisolierung des Fahrerplatzes ungefederter, geländegängiger Fahrzeuge. Diss. TU Berlin 1981.
- [10] ● *Backé, W.*: Servohydraulik. Vorlesungsumdruck, 3. Aufl., Aachen 1979.

Einsatz moderner Rechenmethoden mit Finiten Elementen (FEM) bei der Konstruktion von Landmaschinen, dargestellt am Beispiel der Schneidwerksentwicklung

Von Norbert Diekhans, Harsewinkel*)

DK 631.354.2:519.6.001.66

Bei der Konstruktion einer neuen Schneidwerkfamilie wurden konsequent die modernsten Computertechniken in Anspruch genommen. Alle Entwürfe, Aufrisse und Detailzeichnungen wurden erstmals durchgehend an CAD-Bildschirmen erstellt. Somit waren auch die Geometriedaten als rechnerinternes Modell für die parallel ablaufende Strukturanalyse wie auch für die späteren Abläufe bei der Fertigungsvorbereitung verfügbar.

*) Dr.-Ing. N. Diekhans ist Leiter der Abt. Elektronik, Meßtechnik und Berechnung in Fa. CLAAS OHG, Harsewinkel.

1. Einleitung

Die Finite-Element-Methode (FEM) ist ein leistungsfähiges Verfahren für die Spannungs- und Verformungsanalyse im konstruktiven Bereich. Damit wird sie zu einem Schlüssel für die heute geforderte fertigkeitgerechte Konstruktion bei größtmöglichem Leichtbau.

Bisher wurde die breite Anwendung der FEM oft behindert durch den großen Aufwand bei der Erstellung der Rechenmodelle bzw. durch die aus diesem Grund hingenommenen groben Vereinfachungen bei der Modellierung.

Am Beispiel eines Mähdrescherschneidwerks wird gezeigt, wie sich FEM effizient in den verschiedenen Stufen der Entwicklung, von der Voruntersuchung bis zur Detailzeichnung, einsetzen läßt.