

# Mehrkammerdüngerstreuer

Sebastian Peisl

Institut für Landtechnik  
der Technischen Universität München  
in Weihenstephan

**Technische Entwicklung und verfahrenstechnische  
Einordnung eines Gerätes zur mobilen Herstellung von  
Mineraldüngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen  
(Mehrkammerdüngerstreuer)**

**Sebastian Peisl**

Vollständiger Abdruck der  
von der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
***Doktors der Agrarwissenschaften***  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. H. Schön

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. M. Estler
2. Univ.-Prof. Dr. L. Reiner

Die Dissertation wurde am 28.09.1993 bei der  
Technischen Universität München eingereicht und durch die  
Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau  
am 29.11.1993 angenommen.

Nach Abschluß der vorliegenden Arbeit möchte ich allen danken, die zum Gelingen der Dissertation beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt vor allem Herrn Univ.-Prof. Dr. M. Estler für die Überlassung des Themas und seine unermüdliche Betreuung und Diskussionsbereitschaft. Danken möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr. L. Reiner für die Übernahme des Korreferates und Herrn Univ.-Prof. Dr. H. Schön für den Prüfungsvorsitz.

Herrn Priv. Doz. Dr. Dr. H. Auernhammer danke ich für die Zusammenarbeit im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "Einführung der Elektronik für die Außenwirtschaft in die Praxis". Vorliegende Arbeit ist im Rahmen dieses Pilotvorhabens erstellt worden und wäre ohne sein Bemühen nicht zustande gekommen.

Herrn Dr. Hauser, Lehrstuhl für Maschinen- und Apparatekunde, möchte ich für seine Anregungen und seine Betreuung in allen verfahrenstechnischen Fragen ganz besonders danken.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Dr. Schmidt, Geologisches Landesamt München, für die zur Verfügungstellung unzähliger wertvoller Materialien und seiner Unterstützung bei deren Auswertung.

Ich danke Herrn K.- H. Ullrich, BASF, für seine Unterstützung und die kostenlose Bereitstellung der verwendeten Düngemittel.

Ganz herzlichen Dank schulde ich den Mitarbeitern der Landtechnik Weihenstephan, die mir bei der Anfertigung dieser Arbeit behilflich waren, insbesondere Herrn H. Keller und Herrn M. Berchtold für ihre Geduld bei der Anfertigung der Konstruktionszeichnungen, Herrn J. Dallinger und Herrn K. Stadler für ihre Unterstützung beim Aufbau der Versuche, Herrn Dr. G. Wendl für seine Betreuung in Fragen der statistischen Auswertung des Datenmaterials, sowie Herrn Dr. R. Bauer und Herrn Dr. B. Haidn für wertvolle Hinweise bei der Texterstellung.

Zu großem Dank bin ich Frau B. Klingler verpflichtet, ohne deren Hilfe die Versuche nicht hätten bewältigt werden können.

Ich darf den Betriebsleitern Herrn H. Amon, Herrn J. Holzapfel, Herrn W. Hußlein, Herrn P. Muhr, Herrn H. Schönleber, Herrn J. Schwarzer, und Herrn J. Speiser danken, die ihren Teil zum erfolgreichen Abschluß des Pilotvorhabens beigetragen haben.

Mein Dank gilt dem Bundesminister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens "Einführung der Elektronik für die Außenwirtschaft in die Praxis" 88 UM 04.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	8
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	12
<b>1 Einleitung</b> .....	13
1.1    Hinführung .....	13
1.2    Problemanalyse .....	14
<b>2 Grundlagen zur Mineraldüngerausbringung</b> .....	18
2.1    Derzeitige Verfahrensweise der Mineraldüngerausbringung .....	18
2.2    Grundlagen zur Entwicklung von Teilschlagkonzepten .....	24
2.2.1    Bodenkarten .....	27
2.2.2    Flurbereinigungsunterlagen .....	33
2.2.3    Luftbildauswertung .....	36
2.2.4    Bodenuntersuchung auf Nährstoffgehalte .....	37
2.2.5    Digitale Bodeninformationssysteme .....	39
2.2.6    Ertragskarten .....	40
2.2.7    Beurteilung der Bilanzierungsgrößen .....	42
2.3    Verfahrenstechnische Ansätze zur bedarfsorientierten Düngung .	43
2.3.1    Dezentral und stationär hergestellte Düngermischungen (bulk blending) .....	43
2.3.1.1    Dosierung von Einzelnährstoffkomponenten .....	44
2.3.1.2    Mischung von Einzelnährstoffkomponenten .....	46
2.3.2    Dezentral und mobil während der Applikation hergestellte Dünger- mischungen .....	51
2.3.3    Probleme bei der Verwendung von dezentral hergestellten Mehr- nährstoffdüngern .....	52
2.3.3.1    Entmischung durch Schüttkegelbildung .....	53
2.3.3.2    Entmischung während des Verteilvorganges .....	56
2.3.3.3    Mechanische Veränderung des Rohmaterials .....	60
2.3.3.4    Zeitbedarf für die Mischung und Zuteilung .....	61
2.4    Aktueller Entwicklungsstand in den USA .....	61
2.5    Einordnung der Grundlagen .....	63
<b>3 Zielsetzung</b> .....	66
<b>4 Versuche zur technischen Entwicklung eines Gerätes für die mobile Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen</b>	68

4.1	Auswahl und Kenndaten der Einzelnährstoffkomponenten . . . . .	68
4.2	Schematischer Aufbau eines Gerätes für die mobile Herstellung variabler Düngermischungen . . . . .	71
4.2.1	Auswahl und technischer Aufbau geeigneter Vorratsbehälter . . .	72
4.2.1.1	Versuche zur Ermittlung der Massenströme aus einem Vorratsbehälter beim Einsatz ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten	73
4.2.1.2	Ergebnisse der Vorratsbehälterauslaufversuche . . . . .	76
4.2.2	Auswahl und technischer Aufbau eines geeigneten Dosiersystems zum Einzelnährstoffauftrag . . . . .	84
4.2.2.1	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit beim Einsatz ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten . . . . .	91
4.2.2.2	Ergebnisse der Dosierorganüberprüfung . . . . .	93
4.2.3	Auswahl und technischer Aufbau eines internen Fördersystems .	96
4.2.3.1	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Gleichlaufschwankungen . . .	97
4.2.3.2	Ergebnisse der Prüfung von Gleichlaufschwankung . . . . .	98
4.2.4	Auswahl und technischer Aufbau eines Misch- und Zuteilsystems zur Verteilung auf die Teilbreiten . . . . .	100
4.2.4.1	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zuteilung ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten auf acht Kammern . . . . .	106
4.2.4.2	Ergebnisse der Zuteilung auf acht Kammern . . . . .	107
4.2.4.3	Versuch zur Ermittlung der Zuteilung ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten auf acht Kammern in Hanglagen . . . . .	112
4.2.4.4	Ergebnis der Zuteilung auf acht Kammern in Hanglagen . . . . .	113
4.3	Bewertung der vorliegenden Versuchsergebnisse . . . . .	118
4.4	Konstruktive Weiterentwicklung am Misch- und Zuteilorgan . . . .	120
4.4.1	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zuteilung der Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf . . . . .	121
4.4.2	Ergebnisse der Zuteilung von Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf . . . . .	122
4.4.3	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zuteilung ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf in Hanglagen . . . . .	126
4.4.4	Ergebnisse der Zuteilung von Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf in Hanglagen . . . . .	126
4.5	Beurteilung der konstruktiven Weiterentwicklung . . . . .	127
<b>5</b>	<b>Versuche zur mobilen Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen . . . . .</b>	<b>129</b>
5.1	Praxisorientierte Anforderungen an die Düngermischungen . . . .	130

5.2	Versuchsaufbau zur mobilen Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen . . . . .	131
5.3	Ergebnisse der Mischung von Einzelnährstoffkomponenten . . . . .	136
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b> . . . . .	<b>139</b>
<b>7</b>	<b>Verfahrenstechnische Einordnung und weiterführende Arbeiten</b> . . . . .	<b>144</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>148</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>156</b>

### Abbildungsverzeichnis

Nr.		Seite
1	Ausschnitt aus einer Bodenschätzungs - Übersichtskarte (Gemarkung Inkofen bei Moosburg). . . . .	28
2	Ausschnitt aus einer Gemeindebodenschätzungskarte. . . . .	29
3	Feldkarte der Bodenschätzung (Gemarkung Beyharting). . . . .	30
4	Besitzstandskarte vor der Flächenneuordnung (Arresting, Lkr. Kelheim). . . . .	34
5	Zusammenlegungskarte nach der Flächenneuordnung (Arresting). . . . .	35
6	Teilflächendifferenzierendes Luftbild (AMON, Garching). . . . .	36
7	Hauptnährstoffgehalte von 16 aufeinanderfolgenden Teilflächen. . . . .	38
8	Hauptnährstoffbedarf von 16 Teilflächen nach Düngeplan. . . . .	39
9	Schlaglinearisierung und Satellitenortung im Vergleich. . . . .	41
10	Ertragskartierung mit unterschiedlichen Ertragsklassen in Scheyern (nach AUERNHAMMER et al. 1991). . . . .	42
11	Schema ausgewählter statischer Mischer mit Einbauteilen. . . . .	48
12	Feststoffmischer mit rotierenden Behältern und/oder rotierenden Werkzeugen. . . . .	49
13	Mischschnecke (nach FRIZEN, 1974). . . . .	50
14	Mehrkammerdüngerstreuer mit Schleuderscheiben (nach FRIZEN, 1974). . . . .	51
15	Homogene und heterogene Mehrnährstoffdünger im Vergleich. . . . .	53
16	Versuchsaufbau zur Erfassung der Entmischung nach Korngrößen (nach HOFFMEISTER et al. 1964) [48, 47]. . . . .	54
17	Auslauf- und Streuergebnis einer Düngermischung aus Nitrophos und Kali (geändert nach ULLRICH, 1979). . . . .	56
18	Mengeneffekt (nach ULLRICH, 1984). . . . .	58

19	Nährstoffverteilung einer Düngermischung aus Nitrophos und Kali bei der Ausbringung mit einem Zweischeibenstreuer (geändert nach ULLRICH, 1979) . . . . .	59
20	Mehrkammerdüngerstreuer (geändert nach THE NEW LOR*AL, 1990). .	63
21	Für die Versuche wurden (von links) Granulat, Kompaktat und Prill ausgewählt. . . . .	68
22	Schematischer Aufbau eines Gerätes für die Herstellung variabler Düngermischungen. . . . .	71
23	Auslaufverhalten eines ausgewählten Schrägbodenbehälters. . . . .	74
24	Versuchsaufbau zur Ermittlung des Massenstromes ausgewählter Einzel-nährstoffdünger bei Kernfluß mit verschiedenen Auslauföffnungen. . . .	75
25	Schrägbodenauslaufversuch mit Harnstoff bei 20 mm Öffnung. . . . .	77
26	Schrägbodenauslaufversuch mit Harnstoff bei 30 mm Öffnung. . . . .	77
27	Schrägbodenauslaufversuch mit Harnstoff bei 40 mm Öffnung. . . . .	78
28	Schrägbodenauslaufversuch mit Kali bei 20 mm Öffnung. . . . .	79
29	Schrägbodenauslaufversuch mit Kali bei 40 mm Öffnung. . . . .	80
30	Schrägbodenauslaufversuch mit Kalkammonsalpeter bei 20 mm Öffnung . . . . .	81
31	Schrägbodenauslaufversuch mit Kalkammonsalpeter bei 30 mm Öffnung. . . . .	82
32	Schrägbodenauslaufversuch mit Kalkammonsalpeter bei 40 mm Öffnung. . . . .	82
33	Hydraulischer Antrieb der drei Dosierorgane. . . . .	88
34	Ausgewähltes Dosierorgan für rasche Mengenänderung (SYSTEM NODET). . . . .	89
35	Kalibrierung des Dosierorganes mit 40er Kali. . . . .	90
36	Prüfung der Dosiergenauigkeit (Drehzahl 10 1/min). . . . .	94
37	Prüfung der Dosiergenauigkeit (Drehzahl 25 1/min). . . . .	95



38	Aufbau des internen Förderorganes mit induktiver Meßeinrichtung. . . . .	98
39	Gleichlaufschwankungen des internen Förderorganes (Meßintervall 1 s, Totzeit 0,1 s, Beobachtungszeit 200 s aus 800 s). . . . .	99
40	Rotationsverteiler (SYSTEM WEIHENSTEPHAN). . . . .	103
41	Prallkörper zur Durchsatzoptimierung. . . . .	103
42	Verteiler mit acht Kammern. . . . .	105
43	Verteilung von Kalkammonsalpeter auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (n = 20). . . . .	108
44	Verteilung von Cederan P 23 auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (n = 20). . . . .	109
45	Verteilung von 40 er Kali auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (n = 20). . . . .	110
46	Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (n = 20). . . . .	111
47	Verteilung von Kalkammonsalpeter auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20). . . . .	112
48	Verteilung von Cederan P 23 auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20). . . . .	113
49	Verteilung von 40er Kali auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20). . . . .	114
50	Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20). . . . .	115
51	Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 10 % Steigung (n = 20). . . . .	116
52	Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 20 % Steigung (n = 20). . . . .	117
53	Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 30 % Steigung (n = 20). . . . .	118

54	Verteilung von Harnstoff auf acht Verteilkammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 30 % Steigung mit der Rotorscheibe für großen Durchsatz (n = 20). . . . .	119
55	Kreuzweise Zusammenfassung der acht Verteilkammern zum linken und rechten Auslauf. . . . .	123
56	Verteilung ausgewählter Dünger auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und der Rotorscheibe für geringen Durchsatz (n =20). . . . .	124
57	Verteilung ausgewählter Dünger auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min und der Rotorscheibe für geringen Durchsatz. . . . .	125
58	Verteilung von Harnstoff auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min sowie 10, 20 und 30 % Steigung. . . . .	127
59	Verteilung von Harnstoff auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min, 10, 20 und 30 % Steigung sowie der Schleuderscheibe für hohen Durchsatz. . . . .	128
60	Versuchsaufbau zur Durchführung der Mischversuche. . . . .	132
61	Regelstrecken des Gesamtsystems im Verlauf von sieben Teilflächen unterschiedlichen Nährstoffbedarfes während der Überprüfung von Mischung und Zuteilung. . . . .	133
62	Empirische Varianz des Gesamtsystems je Einzelnährstoff unter sieben definierten Varianten oder Teilflächen. . . . .	137
63	Mehrkammerdüngerstreuer . . . . .	145
64	Technik im rechnergestützten System einer "umwelt- und ertragsorientierten Düngung" (nach AUERNHAMMER, 1992). . . . .	146

### Tabellenverzeichnis

Nr.		Seite
1	Entwicklung des Handelsdüngerverbrauches. . . . .	15
2	Streuergebnis ausgewählter Düngerstreuer (Quelle: DLG-Prüf- berichte). . . . .	19
3	Ergebnisse eines Wurfstreuers mit getrennter Schieberbetätigung. . .	21
4	Ergebnisse eines Wurfstreuers mit Schieberbetätigung über mehrere Zwischenhebel nach Optimierung der Kinematik. . . . .	22
5	Kenngrößen ausgewählter Düngemittel. . . . .	70
6	Gesetzlich zulässige und vom Gesamtsystem erreichte Abweichun- gen. . . . .	138

## **1 Einleitung**

### **1.1 Hinführung**

Die zurückliegende Entwicklung im pflanzenbaulichen Bereich war durch eine Senkung der Stützungspreise ohne Ausgleich zum Abbau der Getreideüberschüsse gekennzeichnet. Zur Zielsetzung der Agrarreform durch den Überschußabbau wieder ein ausgewogenes Marktgleichgewicht herzustellen gibt es in absehbarer Zeit keine vertretbare Alternative. Landwirte, die Preisausgleichszahlungen in Anspruch nehmen wollen, müssen sich an den Flächenstilllegungsprogrammen beteiligen und derzeit auf 15 % ihres wichtigsten Produktionsfaktors Boden verzichten. Unter diesen Bedingungen sind aber weiterhin qualitativ hochwertige Nahrungsmittel kostengünstig zu erzeugen und Betriebseinkommen zu erwirtschaften, die die Existenz der Betriebe langfristig sichern. Während sich eine Senkung der fixen Kosten gerade unter dem Aspekt der Flächenstilllegung als schwierig erweist, gilt es mehr denn je, alle sich bietenden Möglichkeiten zur Einsparung von Betriebsmitteln nutzbar zu machen [71].

Ohnehin liegen die variablen Kosten im Pflanzenbau für Saatgut, Dünge- und Pflanzenschutzmittel um das eineinhalb- bis zweifache über den Ausgaben für die variablen Maschinenkosten. Die Düngung bietet in diesem Zusammenhang das größte Einsparungspotential, da sie circa 30 bis 35 % der variablen Kosten verursacht. Dies sind etwa 65 bis 70 % der Ausgaben für die gesamten bestandesführenden Maßnahmen [33, 63].

Neben Einsparungen aus ökonomischen Gründen, gewinnt zunehmend der Boden- und Gewässerschutz in Verbindung mit einer Reduzierung der Stoffeinträge an Bedeutung. 46 % des Nitrates und 38 % des Phosphates in den Gewässern stammen aus der Landwirtschaft [99]. Der Handlungsbedarf kommt durch die Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung und die Bodenschutzprogramme der Länder zum Ausdruck [23, 26].

Die Funktionen des Bodens, ihre Schutzbedürftigkeit, die Nahrungsansprüche und die daraus resultierenden Gefahrenpotentiale bilden die Bezugspunkte des Bodenschutzes. Nur vorsorgende Maßnahmen und verantwortungsvolles Abwägen der an den Boden gestellten Ansprüche verhindern dauerhafte Schäden. Bodenschutz ist deshalb zukunftsgerichtet und vorsorgeorientiert [14, 15].

Die Landwirtschaft ist darin zur Minimierung qualitativ und quantitativ problematischer Stoffeinträge verpflichtet [23, 55]. Durch strikte Anwendung des Verursacherprinzips wird die Selbstverantwortung des Einzelnen und das Eigeninteresse der gesamten Landwirtschaft künftig erhöht. Novellierungen der Düngemittel- und Pflanzenschutzgesetze werden bereits als Vorboten einer reglementierten und verordneten Landbewirtschaftung gewertet [77], denn Vorsorgestrategien umfassen die dauerhafte Sicherung der Produktion unbedenklicher Nahrungsmittel. Dies ist nur erreichbar, wenn ein ausgewogener Wasserhaushalt wiederhergestellt werden kann und den jeweiligen Bodenverhältnissen angepasste Stoffkreisläufe gewährleistet sind [23]. Aus Kosten-, wie auch aus Umweltgründen ist folglich die Düngung auf ein Maß zu begrenzen, das durch den Nährstoffentzug der Ernten, und die standortgegebenen Nährstoffgehalte der Böden bestimmt ist [23, 21, 22].

## **1.2 Problemanalyse**

Die moderne Pflanzenernährung konnte durch die konsequente Ausrichtung der organischen und mineralischen Düngung auf die Nährstoffversorgung des Bodens und seine Ertragserwartung in der Düngeoptimierungsplanung beachtliche Einsparungen an den Hauptnährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kali erzielen [84]. Der Handelsdüngerverbrauch ging seit 1980 bei Stickstoff von 1 551 000 t auf 1 366 000 t, bei Phosphat von 838 000 t auf 512 000 t und bei Kali von 1 144 000 t auf 738 000 t zurück (Tab. 1). Dennoch ist das Einsparungspotential nicht ausgeschöpft.

Die Düngeplanung geht auf Analysenwerte der Bodenuntersuchung und einen geschätzten Zielertrag zurück. Für einen Schlag wird so ein durchschnittlicher Bedarf

**Tabelle 1:** Entwicklung des Handelsdüngerverbrauches.

Wirtschaftsjahr	1980/81	1985/86	1987/88	1988/89	1989/90	1990/91
Nährstoff	Handelsdüngerverbrauch der Landwirtschaft (1000 t Nährstoff)					
Stickstoff (N)	1550,8	1515,7	1601,4	1539,9	1487,2	1366,4
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	837,5	736,8	678,9	643,5	594,4	511,7
Kali (K <sub>2</sub> O)	1144,1	932,0	864,8	887,1	791,6	738,4
	Nährstoffverbrauch je Hektar (kg)					
Stickstoff (N)	126,6	126,1	133,9	129,2	125,1	115,1
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	68,4	61,3	56,8	54,0	49,9	43,1
Kali (K <sub>2</sub> O)	93,4	77,5	72,3	74,2	66,5	62,2

an Einzelnährstoffen ermittelt. Die Grunddüngung erfolgt dann entweder durch Ausbringung von Volldüngern, auch Mehrnährstoffdüngern, mit geeigneten Nährstoffverhältnissen, oder mit Einzelnährstoffdüngern in mehreren aufeinander folgenden Arbeitsgängen [33].

In beiden Fällen werden aber die Schläge bislang mit einer voreingestellten Ausbringmenge beziehungsweise einem festgelegten Nährstoffverhältnis einheitlich gedüngt. Diese Düngung ist allenfalls dem Bedarf angenähert, jedoch nicht auf den Standort der Pflanzen, und damit auf deren Entwicklung und Aktivität ausgelegt und allein deshalb nicht bedarfsgerecht.

Aus heutiger Sicht muß jedoch für ein künftiges Düngemanagement [29] eine derartige Vorgehensweise in Frage gestellt werden. Das Problem einer optimierten und bedarfsgerechten Düngung liegt letztendlich darin, daß Schläge aufgrund ihrer Bodenunterschiede nicht als in sich geschlossene und einheitliche Systeme betrachtet

werden können, in denen überall das gleiche Nährstoffangebot herrscht. Die Nährstoffverfügbarkeit und das Ertragspotential unterliegen innerhalb eines Schlag es deutlichen Unterschieden.

Demnach hat die bislang einheitliche Düngung auf einem Schlag ökonomische und ökologische Verluste in zweierlei Hinsicht zur Folge. **Auf Teilflächen geringerer Ertragserswartung** kann das überschüssige Nährstoffangebot von den Pflanzen nicht verwertet werden. Andere ertragsrelevante Parameter, wie beispielsweise die nutzbare Feldkapazität oder die Bodenverdichtung begrenzen den Ertrag. Die Folge sind umweltbelastende Nährstoffauswaschungen und gleichzeitig eine Verschwendung von Betriebsmitteln. **Auf Teilflächen mit hoher Ertragserswartung** dagegen wird durch die defizitäre Nährstoffversorgung das Ertragspotential nicht ausgeschöpft. Es kommt in diesen Bereichen zu einem häufig unterschätzten Ertragsverlust und einer Nährstoffverarmung des Bodens [33, 6, 50, 75].

Die bisherige Form der Bestandesführung ist demnach unzureichend. Ebenso wie ertragsrelevante Parameter auf einem Schlag schwanken können, muß demnach die Düngung künftig als dynamischer Prozeß die Anpassung der Applikation an den Einzelnährstoffbedarf erlauben.

Die bedarfsgerechte Applikation von Düngemitteln ist ein Beispiel dafür, daß grundsätzlich ökonomische Interessen und die Forderung nach umweltgerechter Landbewirtschaftung einander nicht ausschließen, ja sogar eng miteinander verbunden werden können. Diese komplexen Zusammenhänge fordern jedoch die Entwicklung neuer Strategien für die Düngerverteilung. Sie bedingen deren systematische Erforschung und die Aufbereitung der Informationsinhalte. Auch wenn dabei Entscheidungen immer schwieriger werden, gilt es dennoch, alle Einflußfaktoren auf die Nährstoffverfügbarkeit und damit auf die Ertragsbildung zu erfassen [32].

Hierbei wird der Einsatz von Echtzeitsensorik, Datenmanagement [4] und Prozeßtechnik [5] in der Landwirtschaft mehr denn je an Bedeutung erlangen. Die bisher

angewendete wird durch eine kommunikative und intelligente Technik [2, 57] zu ersetzen sein. Diese intelligente Technik aber wird es sein, die an die klassischen Formen der Technik völlig neue Anforderungen stellt. Die teilflächenbezogene Mineraldüngerausbringung läßt die gleichmäßige Verteilung vorgefertigter Düngerrezepturen nicht zu [33]. Sie fordert den Einsatz intelligenter Prozeßtechnik und vor allem einer daran adaptierten Aktorik, die in der Lage ist, örtlich differenziert die bedarfsgerechte Dosierung, Mischung und Verteilung der Einzelnährstoffkomponenten variabel umzusetzen. Im Folgenden sollen Verfahren der Mineraldüngerausbringung aus aktueller Sicht diskutiert und ein Ansatz zu deren Optimierung erarbeitet werden.



## 2 Grundlagen zur Mineraldüngerbringung

### 2.1 Derzeitige Verfahrensweise der Mineraldüngerbringung

Für die Ausbringung von Mineraldüngern werden zur Zeit hauptsächlich zwei Bauarten von Düngerstreuern eingesetzt: die **Wurf- oder Schleuderstreuer**, sowie die meist pneumatischen **Auslegerstreuer**.

Bei den **Schleuderstreuern** konzentriert sich das Interesse zunehmend auf 2-Scheibenstreuer, deren Streuqualität durch technische Weiterentwicklungen (z.B. austauschbare Streuscheiben, Drehzahlüberwachung der Streuorgane oder hydraulischer Streuscheibenantrieb für bessere Drehzahlkonstanz) etwa auf das Niveau der Auslegerstreuer angehoben werden konnte. Derartige "Komfort"-Schleuderstreuer unterscheiden sich aber auch preislich kaum mehr von den Auslegerstreuern [33, 62].

An beide Düngerstreuerbauarten sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Gleichmäßige Längs- und Querverteilung,
- einfache und sichere Möglichkeit der Kalibrierung (Abdrehprobe),
- ausreichendes Fassungsvermögen,
- damit verbunden eine hohe Flächenleistung,
- einfache und sichere Einstellung der Ausbringmengen,
- Unempfindlichkeit gegen Korrosion und
- ein angemessener Kaufpreis.

Für den Feldeinsatz ist das wichtigste Kriterium in einer gleichmäßigen Querverteilung zu sehen [37]. Die Ergebnisse von zwei aktuellen DLG-Gruppenprüfungen lassen erkennen, daß die geprüften Düngerstreuer fast ausnahmslos gute bis sehr gute Ergebnisse liefern (Tab. 2).

**Tabelle 2:** Streuergebnis ausgewählter Düngerstreuer (Quelle: DLG-Prüfberichte).

	Anbau-Zweischeibenstreuer		Anbau-Pneumatikstreuer	
	Variations-Koeffizient (%) bei Streumenge (kg/ha)			
	150	300	150	300
KAS 27 Fabrikat I	<b>5,4</b> (3,6 - 6,7)	<b>5,0</b> (3,4 - 6,7)	<b>6,9</b> (5,2 - 8,2)	<b>5,8</b> (5,3 - 6,2)
KAS 27 Fabrikat II	<b>5,9</b> (4,4 - 7,2)	<b>5,0</b> (3,5 - 6,5)		
NPK	<b>5,6</b> (3,8 - 7,0)	<b>6,1</b> (3,6 - 8,0)		<b>6,0</b> <sup>5)</sup> (5,6 - 6,4)
Harnstoff EG-Ware	<b>7,4</b> <sup>1)</sup> (5,7 - 11,4)	<b>6,7</b> <sup>2)</sup> (3,8 - 9,7)		
Harnstoff Ost-Ware	<b>6,8</b> <sup>1)</sup> (3,9 - 11,6)	<b>8,4</b> (4,3 - 10,4)	<b>6,4</b> (5,8 - 6,9)	<b>8,9</b>
PK 0/7/18		<b>5,6</b> <sup>3)</sup> (3,1 - 7,0)		
PK 0/10/15		<b>5,4</b> <sup>3)</sup> (3,1 - 7,0)		<b>8,9</b> <sup>4)</sup> (8,8 - 8,9)
Kali 60		<b>7,7</b> <sup>3)</sup> (3,2 - 11,8)		
1) 100 kg/ha    3) 400 kg/ha    5) 600 kg/ha 2) 200 kg/ha    4) 500 kg/ha				
DLG-Beurteilungsmaßstab: Variationskoeffizient 1,0 - 5,0 = sehr gut 5,1 - 10,0 = gut 10,1 - 15,0 = befriedigend				

Das läßt auf den ersten Blick den Schluß zu, für eine umweltgerechte Mineraldüngung sei alles getan. Tatsächlich kann aber die moderne Ausbringtechnik nur gewährleisten, daß eine vorgegebene Düngermenge mit großer Gleichmäßigkeit auf der Ackerfläche verteilt wird. Eine bedarfsgerechte Versorgung der Pflanzen mit den benötigten Nährstoffen ist dadurch jedoch noch nicht realisiert [33].

Eine Verbesserung der Nährstoffversorgung konnte durch den Einsatz der Elektronik in der Außenwirtschaft erreicht werden [27]. Die Verwendung von Sensoren am nicht

angetriebenen Traktorvorderrad beziehungsweise an der Kardanwelle allradgetriebener Traktoren, oder von Radarsensoren ermöglicht die schlupffreie Erfassung der echten Fahrgeschwindigkeit. Aus dieser Fahrgeschwindigkeit, der gewünschten Aufwandmenge und der Arbeitsbreite wird die Sollausbringung errechnet. Sie wird vom Prozeßrechner permanent mit der aktuellen Istausbringung verglichen. Werden Abweichungen festgestellt, erfolgt eine Korrektur. Dafür ist die Durchführung einer Kalibrierung (Abdrehprobe) die wichtigste Voraussetzung. Ohne sie könnte die Abregelkurve, nach der die Einstellungen vom Prozeßrechner vorgenommen werden, nicht erstellt werden.

Bei Wurfstreuern beispielsweise ist jedoch die permanente Erfassung des Massenflusses und damit der Ausbringung nicht unmittelbar, sondern nur über Hilfsgrößen, wie die Schieberstellung, die Position der Stellmotore oder die Ergebnisse der dynamischen Gewichtserfassung. Elektronische Regeleinrichtungen bewirken, daß z.B. in Abhängigkeit von einer Geschwindigkeitsänderung beim Wurfstreuer ein Hubspindelmotor mit Positionsrückmeldung betätigt und dadurch die Aufwandmenge verändert wird. Wirkt die Hubspindel direkt auf den Schieber des Düngerstreuers, so ist gewährleistet, daß der gesamte Hub auf den Schieber übertragen wird. Damit wird sowohl bei geringfügiger Erhöhung, als auch bei Verringerung der Fahrgeschwindigkeit die richtige Ausbringung eingestellt [61, 33].

Bei Zweiseibenstreuern werden zur Schieberbetätigung häufig zwei voneinander unabhängig arbeitende Hubspindelmotoren eingebaut. Diese setzen unmittelbar am Schieber an. Die Positionsmeldung des Hubspindelmotors an den mobilen Agrarcomputer ist eine repräsentative Größe für die Schieberstellung und ein sicheres Maß für die Ausbringung. Aus diesem Grund sind bei dieser Technik die linke und die rechte Streuseite getrennt zu kalibrieren. Dies erfordert zwar bei der Kalibrierung etwa 20 min. und damit einen hohen Zeitbedarf, liefert aber dafür auch sehr gute Ergebnisse (Tab. 3).

**Tabelle 3:** Ergebnisse eines Wurfstreuers mit getrennter Schieberbetätigung.

**linke Streuscheibe**

Sollmenge (kg/ha)	Wiederholung				ØAbweichung	
	I	II	III	IV	absolut (kg/ha)	relativ (%)
100	103,17	103,28	99,75	99,75	1,49	+ 1,5
200	201,53	209,33	214,13	209,55	7,89	+ 3,9
300	319,33	322,54	299,04	299,04	9,99	+ 3,3
400	389,82	396,01	399,43	371,66	10,77	- 2,7
500	512,64	508,37	478,46	493,42	1,78	- 0,4
mittlere relative Abweichung						2,4

**rechte Streuscheibe**

Sollmenge (kg/ha)	Wiederholung				ØAbweichung	
	I	II	III	IV	absolut (kg/ha)	relativ (%)
100	109,68	106,69	107,87	107,87	8,03	+ 8,0
200	204,42	207,62	202,92	205,80	5,19	+ 2,6
300	300,11	309,72	309,72	283,02	0,64	+ 0,2
400	411,18	403,70	405,84	413,32	8,51	+ 2,1
500	540,41	538,27	540,41	510,50	2,40	+ 6,5
mittlere relative Abweichung						3,9

Wirkt im Gegensatz dazu die Hubspindel über mehrere Gelenke und Zwischenhebel auf den Schieber, so kann es vorkommen, daß durch die kinematischen Verhältnisse (Gelenkspiel, elastische Verbiegungen der Steuerstangen) noch keine Änderung der Ausbringmenge eintritt, obwohl der Prozeßrechner seine Rückmeldung vom Aktor bereits erhalten hat und den Regelungsvorgang abschließt. Dies führt letztlich zu einem mangelhaften Gesamtstreuergebnis. Werden bei derartigen Streuern technische Verbesserungen durchgeführt (z.B. Anpassen der Bodengruppe, Einbau verstärkter

Lagerbuchsen etc.) sind die Abweichungen nur noch gering und die Streuer bringen ebenfalls deutlich bessere Ergebnisse [33](Tab. 4).

**Tabelle 4:** Ergebnisse eines Wurfstreuers mit Schieberbetätigung über mehrere Zwischenhebel nach Optimierung der Kinematik.

Sollmenge kg/ha	Wiederholung				ØAbweichung	
	I	II	III	IV	absolut (kg/ha)	relativ (%)
100	89,92	91,20	91,52	92,06	8,83	- 8,8
200	194,48	199,05	194,5	195,44	4,14	- 2,7
300	304,16	302,24	303,73	303,60	3,43	+ 1,1
400	400,28	399,00	400,92	404,02	1,05	+ 0,3
500	519,68	524,38	526,10	522,70	23,46	+ 4,7
400	410,30	410,11	408,80	411,18	10,09	+ 2,5
300	302,13	300,85	302,13	300,96	1,56	+ 0,5
200	189,35	190,10	190,00	190,95	9,90	- 5,0
100	94,60	93,12	93,87	94,09	5,91	- 6,1
mittlere relative Abweichung						3,5

Bei **Auslegerstreuern** dagegen erfolgt in der Regel eine Zwangsvolumendosierung über Zellen- oder Nockenräder, beziehungsweise Dosierwalzen. Diese sind häufig ölhydraulisch angetrieben. Die Drehzahl der Dosierorgane wird induktiv gemessen und dient dem Prozeßrechner als Regelgröße. Über motorisch angetriebene Regelventile wird der Ölstrom und damit die Drehzahl des Dosierorganes korrigiert, bis der Istwert mit dem Sollwert übereinstimmt.

Auch dabei wird der Massenstrom nicht direkt gemessen, sondern über die Hilfsgröße "Dosierorgandrehzahl" nach entsprechender Kalibrierung vom Prozeßrechner ermittelt. Die Dosierorgandrehzahl läßt sich allerdings sehr genau einstellen. Dreijährige Untersuchungen im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "Einführung der Elektronik für

die Außenwirtschaft in die Praxis" ergaben nur geringfügige Drehzahlabweichungen von unter 1 %. Generell wurden damit im praktischen Einsatz gute Ergebnisse erzielt. Es sind aber auch bei diesem Verfahren in regelmäßigen Abständen Kontrollwiegungen durchzuführen, denn es darf nicht übersehen werden, daß beim praktischen Einsatz während des Streuens durch die physikalischen Eigenschaften des Düngers und die Erschütterungen auch bei konstanter Dosierorgandrehzahl zwangsläufig zusätzliche Abweichungen vom vorgegebenen Sollwert auftreten können, die der Rechner nicht erfassen kann. Durch den kontrollierten Einsatz der Elektronik werden bereits sehr gute Ergebnisse erzielt und die Anforderungen an die Düngeverteilterchnik bislang durchaus erfüllt [60].

Auch bei nicht bodenangetriebenen Düngerstreuern gelingt so letztlich die geschwindigkeitsabhängige Regelung der Ausbringmenge, zur Sicherung einer gleichmäßigen Längsverteilung, eine den Fahrer entlastende bequeme Fernsteuerung und Aufwandmengenänderungen bei gleichzeitig zuverlässiger Protokollierung des Arbeitseinsatzes [63]. Damit ist eine lückenlose Dokumentation des Flächennachweises, des Arbeitszeitaufwandes und der ausgebrachten Düngermengen realisiert [8, 6, 5]. Wobei letztere mit zunehmender Reglementierung der Landwirtschaft als Nachweis für staatliche Kontrollen vermehrt an Bedeutung gewinnen wird.

Dieses Gedankengut findet seinen Eingang in der Forderung nach dem Nachweis ausgebrachter Düngermengen [77]. Sie ist eine Entwicklung aus den programmatischen Grundlagen der Bodenschutzpolitik, die langfristig berechenbare Rahmenbedingungen anstrebt. Wesentliche Inhalte sind darin die strikte Anwendung des Verursacherprinzips zur Stärkung der Selbstverantwortung des Einzelnen und des Eigeninteresses der Wirtschaft [23]. Exakt aus diesem Grund müssen an die Düngetechnik der Zukunft höhere Forderungen gestellt werden, so gut die Ergebnisse der elektronisch geregelten Düngerstreuer gleich welcher Bauart auch sein mögen,.

Schlagkartierungen und Bodenuntersuchungen haben gezeigt, daß auf den verschiedenen Teilflächen des selben Feldes ein sehr unterschiedliches Nährstoffangebot

vorliegen und demzufolge auch der Bedarf an Einzelnährstoffen sehr differierend sein kann. Für die Düngerausbringung liegt das Problem darin, daß die chemisch industriell sehr aufwendig gefertigten Voll- oder Mehrnährstoffdünger unveränderbar konstante Nährstoffverhältnisse aufweisen und damit vorgefertigten Rezepturen gleichen, mit deren Einsatz der hohen Variabilität des teilflächenbezogenen Nährstoffbedarfes nicht entsprochen werden kann. Insbesondere deshalb nicht, weil für die Verteilung bislang lediglich eine Ausbringtechnik zur Verfügung stand, mit der zwar Aufwandmengen, nicht aber Konzentrationsänderungen möglich sind [33].

Um sich aus der staatlichen Reglementierung zugunsten größerer Freiheit im wirtschaftlichen Handeln zu lösen, ist darum die Landwirtschaft in die Pflicht genommen, schnellstens ökonomisch und ökologisch bedeutend günstigere Verfahren und Lösungen als bisher zu realisieren [23]. Ein Beispiel dafür ist die Ausrichtung der mineralischen Düngung auf die Kulturpflanze, ihr Wachstumsstadium und vor allem auf ihren standortabhängigen Bedarf [21], wie er in der teilschlagspezifischen Düngung zum Ausdruck kommt.

Experten bewerten diese Vorgehensweise als vorteilhaft. In einschlägigen Studien hat sich wiederholt gezeigt, daß die Rentabilität, gemessen am Verlauf der Produktionsfunktion, mit einer Zunahme der Heterogenität natürlicher Standortverhältnisse steigen kann. Zudem werden gerade jene Landwirte am meisten von der teilflächenbezogenen Düngung profitieren, die bisher am weitesten vom Gewinnoptimum entfernt waren [50].

## **2.2 Grundlagen zur Entwicklung von Teilschlagkonzepten**

Anregungen zum standortgerechten Pflanzenbau sind der Landwirtschaft seit Jahrhunderten unterbreitet worden. So schreibt bereits Justus Möser im Jahre 1770 zur Herstellung und Nutzung von Bodenkarten in der nützlichen Beilage zum Osnabrücker Intelligenzblatt vom 26. Mai [56]:

**Ein Projekt das nicht ausgeführt werden wird**

*“Da wir bald eine neue Charte von hiesigem Hochstifte erhalten werden: so wäre zu wünschen, daß auch eine dergleichen, worauf nach gehöriger Vergrößerung überall die Beschaffenheit des Bodens angezeigt wäre, verfertigt würde; es könnte solches bloß durch Farben geschehen und zugleich in den Farben wiederum der Unterscheid angebracht werden, daß z. E. der beste Weidegrund durch Dunkelgrün, der mittlere durch etwas hellers und der schlechteste durch noch hellers angezeigt würde. In der Einfassung, wodurch jede Art dieses Grünen von den andern abzusondern, würde durch eine Schattierung von Rot, Gelb, Blau oder Schwarz angezeigt, ob Mergel- Sand- oder Moorgrund darunter anzutreffen wäre; und die Vermischung, Verhöhung oder Vertiefung dieser Schattierung würde auch zu gebrauchen sein, die Art des Mergels, Sandes- oder Moorgrundes anzuzueigen. Auf gleiche Art verführe man mit den Heiden, die etwan mit einer hell- oder dunkelbraunen Farbe angezeigt und durch die Schattierung nach ihrer Erdart unterschieden würden... Man könnte auch auf jedem Fleck durch Nummern die Tiefe einer jeden Lage oder deren Abstand von einer gewissen angenommenen Linie, wie auf den Seekarten, bemerken... Außer dieser Charte müßten wir noch eine andere haben, worauf die ganze Fläche, so wie sie sich 6, 7 oder 8 Schuh tief unter der Erden befände, verzeichnet würde; so daß, wann man die erstere Charte auf die andere legte, man sogleich sehen könnte, wie es in vorgedachter Tiefe beschaffen wäre. Man würde solches durch Erdbohrer bald untersuchen und geometrisch auftragen können. Aus der Vergleichung dieser beiden Charten würden sich vermutlich viele gute Schlüsse ziehen lassen, besonders wenn die Veränderungen auf der Oberfläche mit sichern Veränderungen auf der Unterfläche übereinkämen. Diese Schlüsse würden uns in der Urbarmachung leiten und manches, was wir*



*in der Ferne suchen, in der Nähe finden lassen. Man könnte auch solche Charten verschicken und das Urteil der Forst- und Bergwerksverständigen darüber einholen, besonders wann noch eine kurze Beschreibung der wilden Gewächse dabei gefüget würde."*

Der Übergang von der einheitlichen Schlagdüngung zur angestrebten teilflächenspezifischen Nährstoffversorgung stellt die konsequente Weiterführung Möasers Gedanken unter Einbezug der heutigen technischen Möglichkeiten dar. Er ist aber für die Landwirtschaft nicht ohne investiven Einsatz zu realisieren, da er ohne umfassendes Datenmanagement nicht auskommt. Die Notwendigkeit dieses Entwicklungsschrittes wird durch die Auswertung verschiedener, zum Teil lange verfügbarer Quellen bestätigt.

Worauf basieren nun die individuellen Nährstoffansprüche und woraus lassen sie sich ableiten? Zur Vorbereitung einer umfassenden Teilflächenskartierung sollten alle verfügbaren Unterlagen eingesehen und auf ihren Gehalt an brauchbaren Informationen geprüft werden. Zweckmäßig erscheint dabei, die beiden Einflußgrößen der Düngeplanung, die Nährstoffversorgung der Böden als Eingangsparameter und den Ertrag als Zielparame-ter zunächst getrennt zu betrachten.

Für die Beurteilung der Nährstoffversorgung kann auf vorhandene geologische Informationen zurückgegriffen werden. Das Ziel ist die möglichst exakte typologische Charakterisierung von Teilflächen durch die Erfassung von Substrat, Petrographie, geogener, stratigraphischer und lithologischer Kennung. Aufbauend darauf sind möglichst alle ertragsrelevanten bodenchemischen und -physikalischen Parameter zu inventarisieren und durch pflanzensoziologische Kartierungen um die kleinklimatischen Effekte zu erweitern. Aus der Vielfalt der Möglichkeiten hierzu soll in dieser Arbeit exemplarisch ein repräsentativer Querschnitt ausgewählt werden.

### 2.2.1 **Bodenkarten**

So dienen beispielsweise die **Bodenkundlichen Übersichtskarten im Maßstab 1:500 000** durch die mehr oder weniger starke Zusammenfassung der Böden nach geologischem Ausgangsmaterial hauptsächlich dazu, regionale Unterschiede beziehungsweise geologische Großeinheiten darzustellen [97]. Die Grundlage bilden Substrate und deren Verbreitung. Die Angaben werden ergänzt um die Bodenart und den Bodentyp sowie einige Hinweise auf die Nutzung und Bewertung der Legendeneinheiten (Zusammenfassung von Böden mit einer geringen Varianz, die sich von anderen Legendeneinheiten nach Bodenart, Deckschicht und Ausgangssubstraten differenzieren lassen) .

Die **Bodenschätzungs - Übersichtskarten im Maßstab 1:100 000** und **1:25 000** basieren dagegen auf einer flächenhaften Auswertung der Reichsbodenschätzung. Sie liefern daraus den Klassenbeschrieb mit dem Inhalt: Bodenart wie S = Sand, T = Ton, L = Lehm (abweichend von der Bodenkundlichen Kartieranleitung wird U = Schluff nicht aufgeführt), Zustandsstufe (1 = sehr guter bis 7 = schlechter Zustand) und geologische Herkunft (Alluviale, Diluviale, Löß- und Verwitterungsböden) mit Hinweisen auf die Nutzung der Böden.

Die Bodenschätzungs - Übersichtskarten dokumentieren den starken Wechsel der Bodenarten am besten (Abb. 1). Die Kartierung erfolgte in einem Raster von 50 x 50 m, erlaubte aber zum Zeitpunkt der Erstellung die Anpassung an die Flurstücksgrenzen, und erfuhr dadurch wieder eine Informationsverfälschung, die den Nutzen für die heute notwendige Teilflächenkartierung schmälert.

Deutlicher werden diese bodencharakteristischen Differenzierungen durch die **Bodenschätzungskarten** oder die **Gemeindebodenschätzungskarten im Maßstab 1:5 000** auf der Grundlage der Reichsbodenschätzung [3]. Mindestens 5 Einstiche je Flurstück erlaubten eine Bewertung mit der Bodenzahl und später mit der Ackerzahl. Diese Karten zeigen die deutliche Differenzierung der Böden aufgrund weiterer







Feldkarten beinhalten detaillierte Informationen über Bodenzahlen, Klassenbeschriebe und den Substrataufbau der einzelnen Rasterflächen (Teilflächen) und grenzen diese gegeneinander ab [3]. Die Feldkarte wurde anschließend in die Schätzungskarte übertragen, die dann nicht mehr die natürlichen Grenzen auswies, sondern auf die damaligen Besitzstandsgrenzen ausgerichtet wurde. Es kam zu einer Verfälschung der Urinformation. Unglücklicherweise gingen die meisten Feldkarten nach der Übertragung in die Schätzungskarte verloren, und mit ihnen aus heutiger Sicht wertvolle Informationen. Denn jetzt sind mehrere unterschiedliche zu der im Grundstück dominanten Bodenzahl zusammengefaßt. Das gleiche gilt für die Klassenbeschriebe und den Substrataufbau.

Für jeden Klassenbeschrieb einer Gemeindegemeinschaftskarte, die auf Anfrage aus den Schätzungskarten erstellt werden, werden demnach ausgewählte Beispielsprofile exakt vermessener Bohrkernprofile, herangezogen. Bei genauerer Betrachtung der Aufzeichnungen im Schätzungsbuch zeigt sich jedoch, daß bei gleichem Klassenbeschrieb der Profilaufbau, die Substratschichtung oder die Horizontierung des Bodentyps auch auf engem Raum sehr unterschiedlich sein kann und damit bei bestandesführenden Maßnahmen berücksichtigt werden muß.

Die Gemeindegemeinschaftskarten waren auch die Bemessungsgrundlage für die Flächenneuordnung. Sie ist durch den Wechsel von Besitzständen und die daraus resultierenden Verschiebungen von Flurstücksgrenzen ein weiterer Beweis dafür, daß Flurstücke nicht einheitlich homogen sind, sondern in verschiedene Teilstücke untergliedert werden müssen. Aufgrund dieser Erkenntnis ist zu fordern, daß bei neueren Geländeaufnahmen oder Luft- und Satellitenbilddatenauswertung noch kleinere Raster, etwa (20 x 20 m) angelegt werden, die eine weitere Differenzierung zulassen und nicht wieder aus hoheitlichen Gründen an Grundstücksgrenzen ausgerichtet werden.

Die Notwendigkeit der Schlagdifferenzierung wird beispielsweise auch durch **Standortkundliche Bodenkarten im Maßstab 1:50 000** deutlich. Sie berücksichtigen

weitere Standortfaktoren [34]. In Abhängigkeit von Bodentyp, Bodenart und Profilaufbau lassen sich verschiedenste chemische und physikalische Eigenschaften aus punktuellen Ergebnissen extrapoliert, flächenhaft ableiten. Klassifiziert werden Gründigkeit, Entwicklungstiefe, Carbonatgehalt der Feinböden, Bodenreaktion, Basensättigung, Humusanteil, Bodenskelettanteil, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Speicherfeuchte, Lagerungsdichte, Durchlässigkeit, Sorptionskapazität, Filterungsvermögen und Erosionsanfälligkeit [9]. Zu diesen rein bodenspezifischen Parametern kommen Inklination (Hangneigung) und Exposition als morphologische Größen hinzu. Dies sind Parameter, die ebenfalls Schlagunterschiede kennzeichnen und in Kalkulationen bestandesführender Maßnahmen Eingang finden müssen. Darüberhinaus sind in Abhängigkeit von der Hangneigung Hinweise zur Nutzungseignung und sogar zum Maschineneinsatz denkbar.

Als ebenfalls ertragsbildende Größe und damit für die Düngebedarfsermittlung von besonderer Relevanz, ist der **Ökologische Feuchtegrad** [34]. Er basiert auf pflanzensoziologischen Erhebungen und wird in der **Standortkundlichen Bodenkarte Teil II** dargestellt. Innerhalb verschiedener Legendeneinheiten können dadurch Differenzierungen auftreten. Es wird eine Einstufung der Teilflächen möglich, die es erlaubt, die während einer Vegetationsperiode zur Verfügung stehenden und ertragsrelevanten Niederschläge abzuschätzen, die beispielsweise auf verschiedene Reliefpositionen zurückgeführt werden können. Durch die Erfassung kleinklimatischer Langzeiteffekte charakterisiert beispielsweise die pflanzensoziologische Zusammensetzung von mäßig gedüngten, zweischürigen Wiesen diese Feuchteverhältnisse besser, als einmalige bodenphysikalische Untersuchungen. Es lassen sich Hinweise über Nutzungseignung, Befahrbarkeit, Meliorationsmaßnahmen und für eine standortgerechte Düngung ableiten.

Eine Verbesserung der derzeit verfügbaren Datengrundlagen ist durch die **Konzeptbodenkarten im Maßstab von 1:25 000** zu erwarten. Sie ersetzen vorläufig die Kartierung im klassischen Stil und werden Legenden mit standortkundlichen Parametern enthalten. Daraus können Empfehlungen für die praktische Landwirtschaft

abgeleitet werden. Dennoch sind die Konzeptbodenkarten nur ein vorübergehender Kompromiß, denn auf lange Sicht sind aufgrund der Unschärfe der Abgrenzungen weitere verbesserte Aufnahmen nach bildanalytischer Erkennung der Teilflächen notwendig. Diese Aufnahmen sind nur im Gelände möglich, denn die Bildanalyse kann nur eine Differenzierung erkennen lassen, sie läßt jedoch kaum einen Schluß zu, welche Ursachen dafür zugrunde liegen.

Durch die vielfältige Erfassung der Eigenschaftsparameter gelingt dann eine, über den Klassenbescrieb hinausgehende Kennzeichnung der Böden, ihrer Empfindlichkeit und Belastbarkeit bei verschiedenen Nutzungen und Umweltbeanspruchungen. Dies erleichtert auf Teilflächen eine Risikoabschätzung durch bestandesführende Maßnahmen und hilft so, Düngung und Pflanzenschutz standort- und bedarfsgerecht zu optimieren.

### **2.2.2 Flurbereinigungsunterlagen**

Werden Klassenbescrieb und standortkundliche Informationen vor dem Hintergrund der Flurneuordnung gesehen, so wird die Notwendigkeit von Teilschlagkonzepten besonders deutlich. Die Reichsbodenschätzung und aus ihr hervorgegangene Kartierungen folgten einem Raster von etwa 50 x 50 m und den Flurstücksgrenzen vor der Flurbereinigung. Ein Vergleich der Zusammenlegungskarten, d. h. den alten Besitzstandskarten (Abb.4) vor der Flurneuordnung einerseits und den Neuverteilungskarten (Abb.5) nach der Flurneuordnung andererseits, erlaubt den konkreten Schluß, daß die neugebildeten, meist wesentlich größeren Schläge von alten Flurstücksgrenzen und damit Grenzen ursprünglicher Klassenbescriebe, Bodenwertzahlen oder sonstiger chemischer und physikalischer Kenngrößen durchzogen sind und deshalb nicht als einheitliche Fläche angesprochen werden dürfen [11, 12].

Neben den unterschiedlichen bodentypologischen Charakteristika, Profilen und Substraten sind traditionelle und historische Momente bei der Flurneuordnung zu

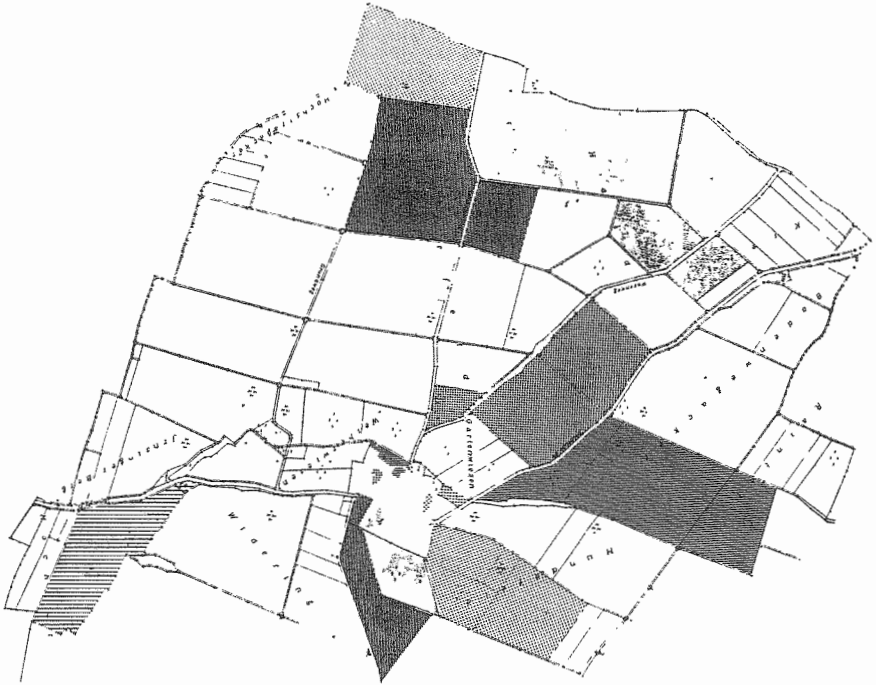




**Abbildung 4:** Besitzstandskarte vor der Flächenneuordnung (Arresting, Lkr. Kelheim).

beachten. So lassen unterschiedliche Bewirtschaftungsformen und -intensitäten ebenfalls keine einheitliche Behandlung der zusammengelegten Flächen zu. Dabei sind sämtliche chemisch- und physikalisch-anthropogenen Parameter von Bedeutung.

Ein Vergleich von Zusammenlegungskarten, also Besitzstandskarte und Neuverteilungskarte, liefert durchschnittlich eine Zusammenlegungszahl von drei. Gemeint ist die Zusammenlegung von etwa drei Flächen vor, zu einer Fläche nach der Flurneuordnung. Die Zusammenlegungszahl reduziert sich mit der Erweiterung des Aufgabenspektrums der Flurbereinigungsbehörden zusehends auf zwei, weil neben den verbes-



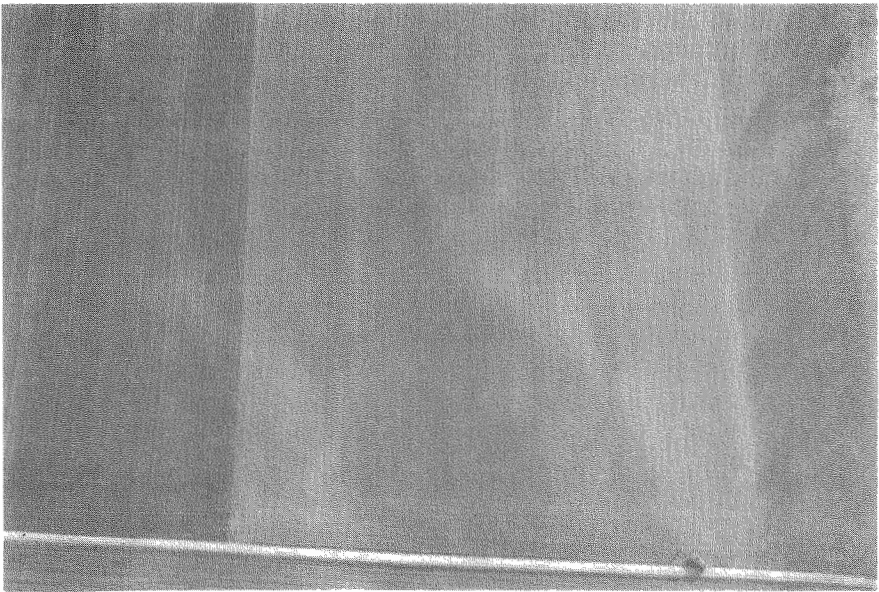
**Abbildung 5:** Zusammenlegungskarte nach der Flächenneuordnung (Arresting).

sernden Maßnahmen der Agrarstruktur mehr und mehr Aspekte der Landesentwicklung und der Landeskultur zu berücksichtigen sind [13]. Folglich sind neugeordnete Schläge in durchschnittlich drei Teilflächen zu untergliedern.

Bisher wurden in der Bundesrepublik Deutschland (ausgenommen das Gebiet der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik) durch Flurbereinigungsverfahren und beschleunigte Zusammenlegungsverfahren von 1975 bis 1990 2 732 000 ha neu zugeteilt. In den letzten fünf Jahren waren es ca. 760 000 ha [13]. Folglich müßten allein aufgrund der Flurneuordnung bereits knapp 2 800 000 ha teilflächenspezifisch gedüngt werden.

### 2.2.3 Luftbildauswertung

Die Luftbildauswertung insbesondere die Interpretation von Infrarotluftaufnahmen ist eine schnelle und sichere Methode zur Erfassung von Boden- und Bestandesunterschieden [86]. Infrarotaufnahmen eignen sich zur rechtzeitigen Erkennung von Vegetationsstörungen (Abb.6).



**Abbildung 6:** Teilflächendifferenzierendes Luftbild (AMON, Garching).

Die Methode beruht darauf, daß Pflanzen Sonnenlicht reflektieren. Dieses Reflexionsvermögen nimmt im nahen Infrarotbereich, verglichen mit dem Spektrum des sichtbaren Lichtes zu [1]. Für eine Differenzierung steht demnach erheblich mehr Information zur Verfügung, wenn der Spektralbereich des nahen Infrarot (700 - 900 nm) miterfaßt wird.

Durch Stress oder Schädigungen verändern sich die Strukturen des Blattgewebes und damit dessen Reflexionseigenschaften. Die Reflexion nimmt mit der Zunahme von Stress oder Schädigung ab. Stress kann auf Infrarotaufnahmen wesentlich früher erkannt werden als im Bereich des sichtbaren Lichtes.

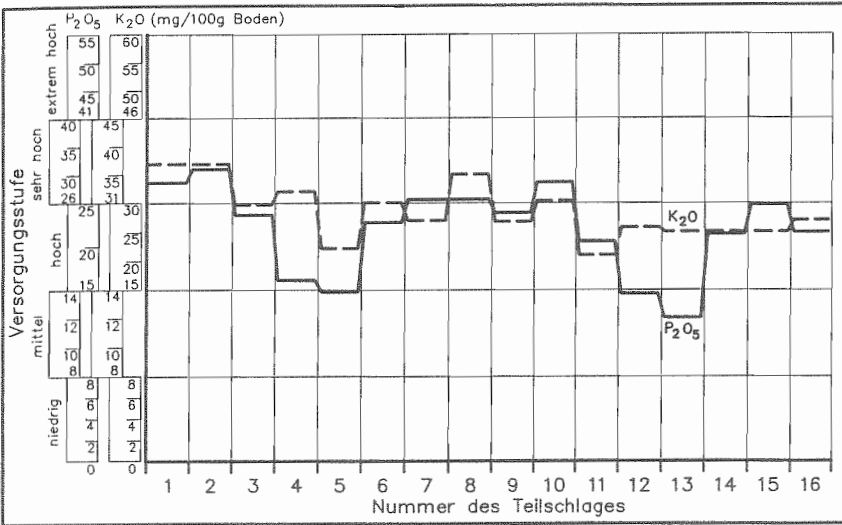
Die Boden- und Bestandesunterschiede werden als Flächen unterschiedlicher Farbintensitätsstufen in Luftbildern deutlich und können nach deren Abgrenzung und kartographischer Erfassung als Teilflächen angesprochen und lokalisiert werden. Sämtliche, in Düngebilanzmodelle eingehenden Parameter, können dann im Gelände teilflächenspezifisch untersucht und ausgewertet werden. Aus den Informationen der nun gezielt durchführbaren Bodenuntersuchung leiten sich nach der Düngelageplanung differenzierte Bedarfswerte für die Teilflächen ab.

#### **2.2.4 Bodenuntersuchung auf Nährstoffgehalte**

Nach der Lokalisierung und Kartierung der Teilflächen kann im Gelände gezielt deren individuelle Nährstoffversorgung untersucht werden. Nicht mehr die Mischprobe aus zehn Einzelproben je Hektar abgeschrittener Fläche ist das Ziel. Bei dieser nach geometrischem Raster ausgelegten Vorgehensweise werden Proben aus unterschiedlichen Teilflächen miteinander vermischt.

Nur die Probenahme innerhalb der Teilschlaggrenzen liefert den benötigten Informationsgehalt. Dabei weisen die Teilflächen in der Regel keinerlei Korrelationen zwischen den Nährstoffgehalten der Hauptnährstoffe auf. Selbst die Einordnung in die klassischen Versorgungsstufen läßt keine Zusammenhänge erkennen (Abb. 7).

Nach einer Auswertung der Bodenuntersuchungsergebnisse mit den üblichen Methoden der Düngelageplanung kann der Nährstoffbedarf für jede Teilfläche ermittelt dargestellt werden. Der individuelle Nährstoffbedarf am Beispiel der Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kali (Abb. 8) macht deutlich, daß eine bedarfsgerechte



**Abbildung 7:** Hauptnährstoffgehalte von 16 aufeinanderfolgenden Teilflächen.

Düngung mit jeglichen Mehrenährstoffdüngern konstanter Nährstoffverhältnisse ausgeschlossen, ja sogar nicht mehr vertretbar ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Beurteilung der Nährstoffbilanzierung von Teilflächen liegt in der Ertragsoptimierung begründet. Genaugenommen ist durch Feldversuche zu ermitteln in welchem Umfang sich Steigerungen des Nährstoffangebotes auf den einzelnen Teilflächen in Ertragssteigerungen umsetzen lassen. Am Beispiel der aus diesen Untersuchungen resultierenden standortabhängigen Produktionsfunktion wird das Ausmaß des notwendigen Informationsbedarfes deutlich.

Diese Verfahren der Mineraldüngerausbringung werden in die Praxis nur dann eingeführt werden können, wenn ein umfassendes Datenmanagement zu Verfügung steht. Von der Erfassung der ertragsbildenden Parameter bis hin zur Steuerung der Verteiltechnik darf der Informationsfluß nicht unterbrochen sein.

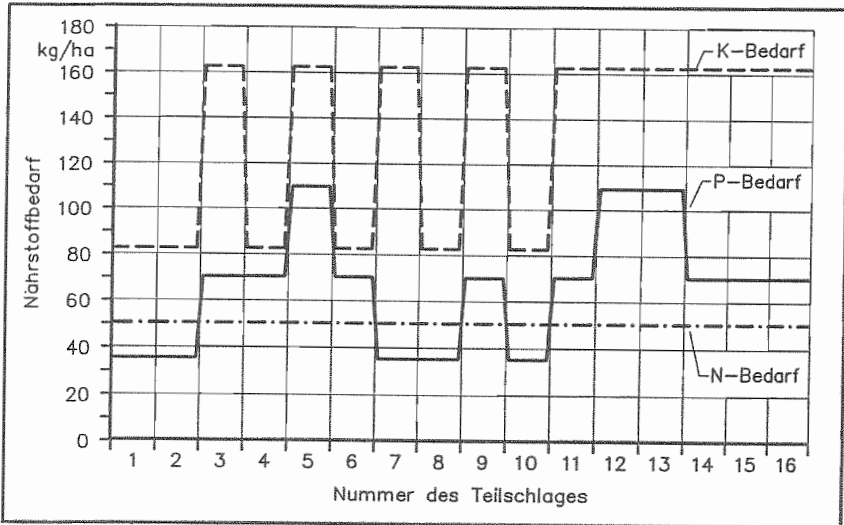


Abbildung 8: Hauptnährstoffbedarf von 16 Teilflächen nach Düngplan.

### 2.2.5 Digitale Bodeninformationssysteme

Um die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Daten erfolgreich auszuwerten und effektiv nutzbar zu machen, werden digitale Informationssysteme benötigt [74, 67, 70, 72, 82]. Ein Beispiel dafür ist das beim Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung in Hannover entwickelte Bodeninformationssystem NIBIS [31]. Seine Flächen- und Labordatenbanken sind so weit entwickelt, daß es für erste Auswertungsversuche zur Verfügung steht.

Je nach Fragestellung besondere Beachtung findet dabei die Dokumentation der angewandten Auswertungsmethoden, um langfristig sicherzustellen, daß vergleichbare Situationen auch gleich bewertet werden können. Darum muß gewährleistet sein, daß die Auswertungsmethoden zur Vereinheitlichung normiert werden, deren Rechenregeln aber in Abhängigkeit vom aktuellen Wissensstand eine Modifikation jederzeit zulassen.

Die Ergebnisse der Auswertungen können dann in tabellarischer Form oder als digitalisierte Karten zur Verfügung gestellt werden. Mit der Auswertungsmethode "Ackerbauliches Ertragspotential" wurde anhand der in digitalisierter Form vorliegenden Bodenkundlichen Standortkarte im Maßstab 1:200 000 die Arbeit zur Erstellung eines allgemeinen Bewertungsschemas zur Beurteilung des Ertragspotentials aufgenommen, das nach seiner Überprüfung eventuell auch für die Teilschlagkartierung von Nutzen sein kann [32].

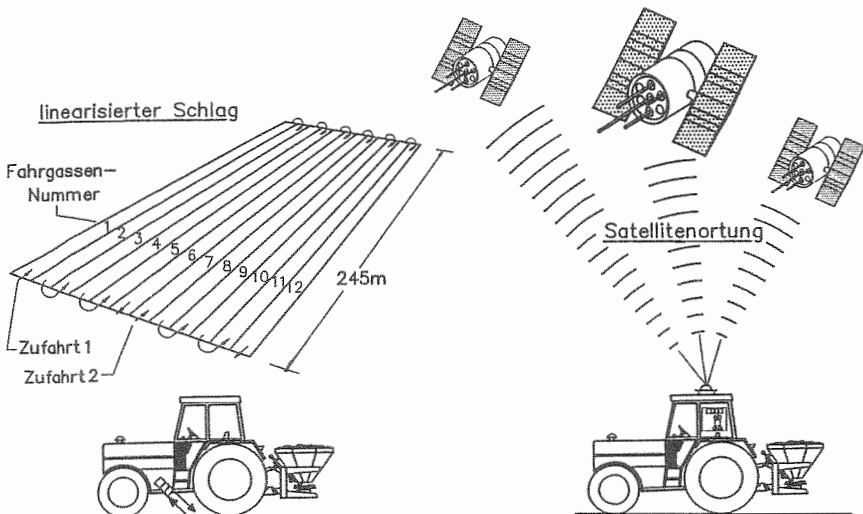
Infolgedessen sind die Vorinformationen inhaltlich soweit verknüpft und aufbereitet, daß sie in die digitalen Hof-Bodenkarten [75], die Grundlage für CAF (Computer Aided Farming) eingelesen und lediglich durch die praktischen Erfahrungen des Landwirtes (ebenfalls digital aufbereitet) ergänzt werden müßten [38]. Die Überlagerung dieser Vorinformationen hat dann die agropedologische Konzeptkarte zum Ergebnis. Sie dient einer optimierten und weit effizienteren Nacherhebung und Beprobung der nun neu definierten Teilflächen [75].

Neben der Erfassung der Eingangsparameter kommt dem Zielparame-ter der Düngoptimierung große Bedeutung zu. Die Ergebnisse aller Boden- und Nährstoffver-sorgungsunterschiede schlagen sich letztendlich in den Ertragskarten nieder.

### **2.2.6 Ertragskarten**

Die Ertragskarten machen die Differenzierung von Schlägen durch alle ertrags-relevanten Parameter am Ergebnis der Bodenfruchtbarkeit also dem Ertrag, sichtbar. Zwar stellt der Ertrag ein Maß für den Nährstoffbedarf dar, da aber seine Feststellung erst nach der Vegetation zum Zeitpunkt der Ernte erfolgen kann, wird er immer im Zusammenhang mit den bisher genannten Einflußgrößen in die Düngoptimierung eingehen. Per Saldo wird sich der Nährstoffbedarf sowohl am Entzug, als auch an der Verfügbarkeit der Nährstoffe während der Vegetationsperiode orientieren müssen.

Eine Erstellung von Ertragskarten wird durch eine fortlaufende Ertragsermittlung mit geeigneten Sensoren in Erntemaschinen während der Fahrt ermöglicht. Zur Positionsbestimmung der Erntetechnik und Lokalisierung der Ertragswerte werden Satellitenortungssysteme oder im einfacheren Fall der Schlaglinearisierung die Wegstreckenmessung eingesetzt (Abb. 9).

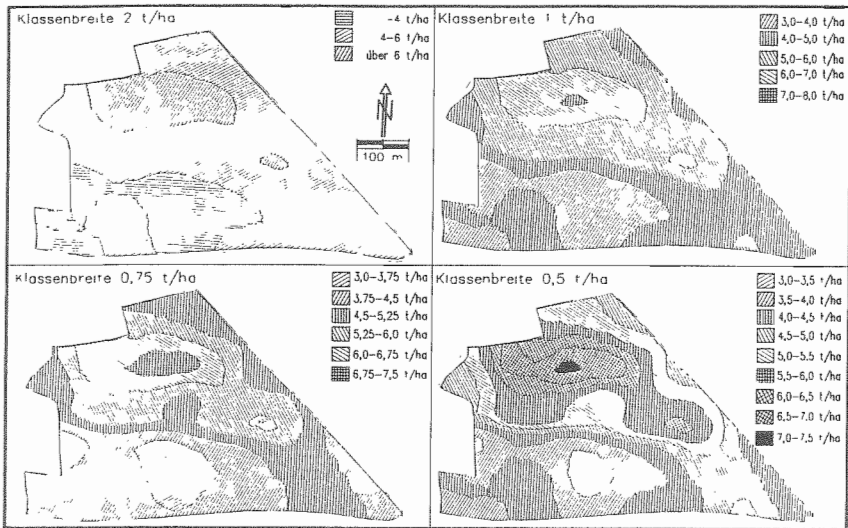


**Abbildung 9:** Schlaglinearisierung und Satellitenortung im Vergleich.

Die unterscheidbaren Teilflächen werden dann als Äquifertile [75, 76], Flächen gleicher Bodenfruchtbarkeit oder Isoertragsflächen [6, 8] angesprochen (Abb.10). Nach dieser Auffassung ist eine Teilfläche als ein Plateau mit einem in definierten Grenzen schwankenden Ertrag zu sehen. Der Ertrag geht als real ermittelte Zielgröße und nicht mehr, wie bisher, als geschätzte Größe in die Düngeplanung ein.

Der Bedarf an Einzelnährstoffkomponenten ist innerhalb eines solchen Teilschlages konstant. Die Techniken der dynamischen Ertragsermittlung, unterstützt durch moderne Ortungssysteme, erlauben aber auch eine stärkere Differenzierung innerhalb von





**Abbildung 10:** Ertragskartierung mit unterschiedlichen Ertragsklassen in Scheyern (nach AUERNHAMMER et al. 1991).

Teilflächen, so daß die Bezeichnung Linien gleichen Ertrages (Isoertragslinien) angebracht erscheint. Folglich kann auch die Düngung entsprechend auf Linien gleichen Nährstoffbedarfes ausgerichtet werden.

### 2.2.7 Beurteilung der Bilanzierungsgrößen

Nach der Berechnung des Düngesplanes für diverse Teilflächen zeigt sich, daß Korrelationen des Nährstoffbedarfes verschiedener Einzelnährstoffkomponenten selten sind, weshalb mit Mehrnährstoffdüngern vorgegebener und auch konstanter Nährstoffkonzentrationen keine Möglichkeit besteht, sowohl bedarfsgerecht und damit betriebsmittelschonend, als auch ökologisch unbedenklich zu düngen. Aus diesen Erkenntnissen resultieren geänderte Ansprüche sowohl an die chemischen Eigenschaften wie z.B. geringe Schadstoffbelastung eines Düngers, als auch an die physikalische Beschaffenheit zur Sicherung einer exakten Dosier- und Verteilbarkeit.

Darauf aufbauend müssen verfahrenstechnische Möglichkeiten geschaffen werden, um den Erfordernissen einer dynamischen Einzelnährstoffkomponentenapplikation Rechnung zu tragen. Die Düngerverteiltechnik muß demnach in der Lage sein, Einzelkomponenten bedarfsgerecht in einem dynamischen Prozeß zu mischen und teilflächenspezifisch zu verteilen.

## **2.3 Verfahrenstechnische Ansätze zur bedarfsorientierten Düngung**

### **2.3.1 Dezentral und stationär hergestellte Düngermischungen (bulk blending)**

Wird mit Volldüngern eine bedarfsgerechte Düngung nicht erreicht, so besteht die Möglichkeit, mit Einzelnährstoffdüngern in mehreren Arbeitsgängen zu düngen. Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen wurde in den USA 1947 erstmals damit begonnen, dezentral und stationär Düngermischungen herzustellen. Mit der Einführung der losen Düngerkette stieg damals auch die Anzahl der dezentralen Mischstationen bis 1970 auf über 5 000 an [35, 88].

Neben den arbeitswirtschaftlichen Vorteilen wurden bald auch die Möglichkeiten der Mischdünger bezüglich ihrer Variabilität erkannt. Die Landwirtschaft konnte erstmals die Applikation von Mischdüngern am Bedarf an Einzelnährstoffen ausrichten [35].

Diese Vorgehensweise wurde in den USA durch die großen Entfernungen der Produktionsstandorte für die Hauptmischkomponenten Phosphat, Kali und Stickstoff sowohl untereinander, als auch zum Verbraucher aus zweierlei Gründen begünstigt. Zum einen waren aufgrund der hohen Belastung mit Transportkosten Einzelnährstoffdünger hoch konzentriert und mit der Zeit den Erfordernissen der Mischstationen angepaßt, zum anderen waren Mehrnährstoffdünger im Verhältnis dazu wesentlich teurer. Für die weitere Verbreitung dezentral hergestellter Mischdünger war dies der entscheidende Wettbewerbsvorteil [88, 45].

Wenn sich dezentrale Mischstationen hinsichtlich der Anlagenausführung (horizontaler oder vertialer Materialfluß) auch stark unterscheiden können, so basieren sie doch letztendlich auf einem einheitlichen Ablaufprinzip. Der Lagerung der Einzelnährstoffkomponenten folgt die Dosiereinrichtung. Nach der Dosierung wird die Mischung der Einzelnährstoffkomponenten entweder in einem absätzigen Arbeitsgang oder im Durchflußverfahren durchgeführt. Nach dem Mischprozeß kann der gewonnene Mehrnährstoffdünger transportiert und ausgebracht werden. Für die Beurteilung der Güte der dezentral hergestellten Düngermischung sind die Dosierung und Mischung der Einzelnährstoffkomponenten von Bedeutung.

### **2.3.1.1 Dosierung von Einzelnährstoffkomponenten**

Den wichtigsten Beitrag zum Erfolg der Herstellung einer dezentralen Düngermischung leistet die Dosierung. Je exakter die Dosierung der Einzelnährstoffkomponenten erfolgen kann, desto leichter wird es sein, eine hohe Mischgüte zu erreichen.

Im allgemeinen wird unter Dosierung die Abtrennung von Teilmengen oder Dosen aus einem Vorrat von Schüttgut verstanden [36]. Das Dosieren wird vor allem zur Zugabe verschiedener Komponenten in definierten Mengen verwendet. Diesem entscheidenden verfahrenstechnischen Schritt bei der Verarbeitung von Schüttgütern folgt in der Regel ein Mischprozeß [92], wie dies auch bei der dezentralen Herstellung von Düngermischungen der Fall ist. In modernen Anlagen wurden die Dosiereinrichtungen mit fortschreitender Automatisierung durch elektronische Komponenten moderner Prozeßsteuerung ergänzt.

Die Prozeßtechnik erlaubt die quantitative Abgrenzung oder das Messen einer charakteristischen Größe wie beispielsweise dem Dosierstrom oder der Dosiermenge. Sie dient dem Rechner als Regelgröße und bewirkt durch ständigen Ist - Sollwertvergleich die Einhaltung der Dosiervorgabe. Die Dosierung kann dann entweder in einer kontinuierlichen oder einer diskontinuierlichen Fahrweise ablaufen [89].

Die **kontinuierliche** Fahrweise erzeugt dabei gleichmäßige Massenströme. Die **diskontinuierliche** arbeitet dagegen absätzig oder auch portionierend [36]. Hier ist je nach Anforderungen des gesamten Arbeitsablaufes die geeignete Fahrweise auszuwählen. Bei höchsten Genauigkeitsansprüchen wird die chargenweise Dosierung vorgezogen, bei allen Durchflußverfahren und elektronisch geregelten Prozessen eignet sich die kontinuierliche Dosierung besser. In beiden Fällen können dabei volumetrische oder gravimetrische Dosierverfahren Anwendung finden.

Die überwiegende Anzahl von Feststoffdosierern arbeitet **volumetrisch** [92]. Der Grund dafür ist die relativ einfache und meist kostengünstige konstruktive Gestaltung. Die volumetrische Dosierung setzt allerdings eine möglichst gleichmäßige Schüttdichte und den ungestörten Zufluß im Vorratsbehälter voraus. Die Schüttgutdosierung erfolgt durch eine reproduzierbare Volumenabgrenzung, nicht jedoch durch eine Volumenmessung im physikalischen Sinn.

Bei hoher Reproduzierbarkeit und entsprechender Kalibrierung (Abdrehprobe) wird der Massenfluß über eine Hilfsgröße, beispielsweise die Drehzahl eines Zellenrades oder die Geschwindigkeit eines Förderbandes, ermittelt. Beispiele für volumetrische Dosierer sind Dosierschnecken, Dosierbänder, Dosierteller und Vibrationsrinnen, bei denen die Schichtdicke des Fördergutes meist durch geeignete verstellbare Schieber bestimmt werden kann oder durch Kammer- beziehungsweise Zellenräder in horizontaler oder vertikaler Lage sowie Dosierkolben [90].

Die **gravimetrischen** Dosierorgane bieten ein Höchstmaß an Dosiergenauigkeit [91, 92]. Störungen im Zufluß oder unterschiedliche Schüttdichten im Vorratsbehälter wirken sich nicht mehr aus, denn die Massenmessungen sind durch hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit gekennzeichnet. Diese Dosierorgane sind jedoch konstruktiv wesentlich aufwendiger und durch den Einsatz der Wägetechnik entsprechend teurer als volumetrische. Darüberhinaus sind meist noch zusätzliche Fördersysteme zur Schüttgutzufuhr notwendig.

Die weiteste Verbreitung im Bereich der gravimetrischen Dosierung hat die DMS-Wiegezele erlangt [92]. Die Dehnungsmeßstreifen erreichen selbst bei sehr geringen Meßwegen hohe Genauigkeiten. Sie eignen sich aufgrund ihrer Unempfindlichkeit und Anspruchslosigkeit als preiswerte Elektronikkomponente für die Einbindung in die Dosierprozeßsteuerung bei der Düngermischung. Unmittelbar im Anschluß an die Dosierung erfolgt die Mischung der Einzelnährstoffkomponenten.

### **2.3.1.2 Mischung von Einzelnährstoffkomponenten**

Nach der Dosierung der Einzelnährstoffkomponenten ist das Ziel eines Mischvorganges, daß kleine Teilmengen die zu vermischenden Komponenten in möglichst der Zusammensetzung und den Anteilen enthalten, die dem Sollwert entsprechen. Eine reale Mischung erfüllt diese Forderung aber nur selten. Jede Teilmenge weicht in ihrer Zusammensetzung mehr oder weniger stark von der Gesamtmenge ab. Je größer dabei diese Abweichung ist, desto schlechter ist die Mischung. Der Grad der Abweichung wird damit zum Maß für die Mischgüte.

Ein mechanisches Mischen erfolgt durch eine verursachte Zufallsbewegung. Die Bewegung der Einzelkomponentenelemente erfolgt stochastisch. Der Mischvorgang ist quasi ein Konzentrationsausgleich, der durch die Partikelbewegung verursacht wird. Die bestmögliche Mischung, die gleichmäßige Zufallsmischung, ist dann erreicht, wenn nach relativ großen Mischzeiten eine zeitlich und örtlich stabile Konzentration erreicht ist [78, 79].

Bei Probenahmen zeigt sich, daß Schwankungen zufällig, innerhalb gewisser Grenzen um die gleichmäßige Zufallsmischung vorliegen. Abweichungen der Vertrauensbereiche deuten dann darauf hin, daß entweder noch ungenügend gemischt wurde oder aber Entmischungerscheinungen verhindern, daß das bestmögliche Ergebnis eintritt [81].

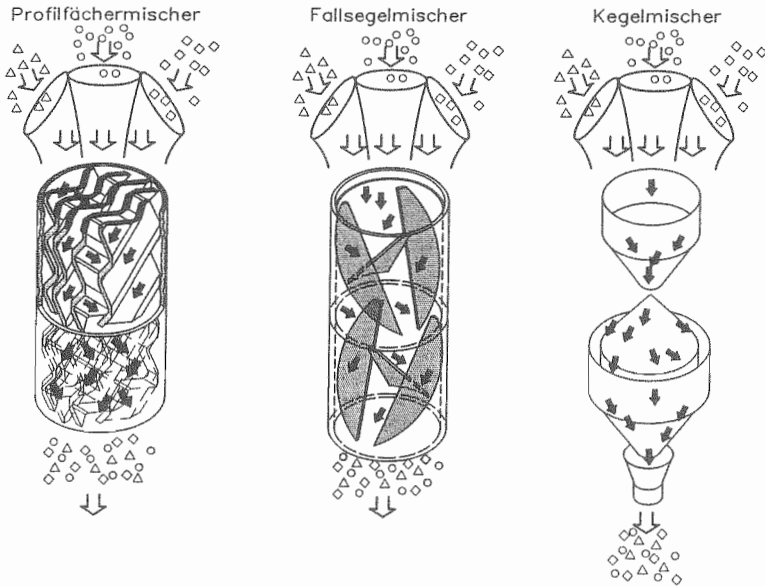
Die Vielfalt der Mischertypen für Feststoffe macht ihre systematische Einordnung schwierig. Die Verfahrenstechnik erlaubt, ähnlich wie bei den Dosierorganen, eine Gruppierung in **kontinuierliche** oder Durchflußmischverfahren und **diskontinuierliche**, also absätzig Verfahren.

Für die Mineraldüngerausbringung sollte ein Mischer ausgewählt werden, der bei minimalem Energieeintrag zur bestmöglichen Homogenisierung führt, damit die Rohmaterialien nicht zu hohen Scherspannungen ausgesetzt und Abrieb oder Bruch verhindert werden. Das ist entscheidend für das an die Mischung anschließende Verteilverfahren (Wurfeigenschaften) und grenzt die Auswahl ein.

Die **kontinuierliche** Fahrweise kann mit **statischen**, (ohne Energieeintrag), oder **dynamischen** Mischern, die **diskontinuierliche** nur mit **dynamischen**, (mit Energieeintrag) erfolgen. Die Voraussetzung für die Funktionssicherheit von statischen Mischern ist, daß das Mischgut nicht kohäsiv ist. Dies trifft für mineralische Rohdünger mit Ausnahme von Mehlen und Stäuben zu. Statische Mischer sind Türme oder vertikale Schächte mit Einbauten, wie Fallsegel oder Kombinationen aus Trichtern und darunterliegenden Kegeln (Abb.11).

Die Mischung wird durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten aufgrund verschiedener Korngrößen erreicht. Zur Bewegung der Partikel wird die Gravitationskraft ausgenutzt. Die Mischgüte der statischen Mischer hängt von der Anzahl der Einbauteile, der Anzahl der Stufen, in denen das Mischgut umgelenkt und damit von der Bauhöhe des Mixers ab. Daraus ist abzuleiten, daß statische Mischer nur in stationären Anlagen eingesetzt werden können.

Verbreiteter sind jedoch die dynamischen Mischer. Hier nimmt die Mischgüte mit der Verweildauer des Rohmaterials im Mischer zu [81]. Dabei erhöht sich aber die Energie, die während des Mischvorganges auf das Rohmaterial übertragen wird. Die Folge sind unkalkulierbarer Abrieb und eine Erhöhung des Bruchkornanteiles. In fast allen Fällen wird bislang die diskontinuierliche Fahrweise eingesetzt. Die Mischung der Kom-



**Abbildung 11:** Schema ausgewählter statischer Mischer mit Einbauteilen.

ponenten erfolgt mit Geräten mit rotierenden Behältern (Trommel-, Taumel- und Konusmischer etc.) und/oder mit rotierenden Werkzeugen (Schub-, Kegelschnecken-, Paddel-, Bänder- oder Pflugscharmischer). Die Vielzahl der Apparate und Bauformen erlaubt nur die Darstellung einer begrenzten Auswahl (Abb.12).

Diskontinuierlich arbeitende Mischer gestatten lediglich die Vorfertigung eines Mehrnährstoffdüngers konstanter Nährstoffgehalte in stationären, hofnahen Anlagen, nicht jedoch die Herstellung von Mischungen variabler Nährstoffverhältnisse während der Fahrt. Hierzu sind für kontinuierliche Fahrweise geeignete dynamische Mischer erforderlich. Das kontinuierliche Mischen stellt aber insbesondere an die Dosierung hohe Ansprüche, da sie die Mischgüte unmittelbar beeinflusst [36]. Zusätzlich werden die physikalischen Eigenschaften der Mischungskomponenten und die Verweildauer im Mischer die Mischgüte stets beeinflussen [80].










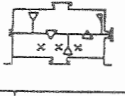
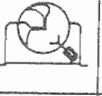



Apparatetyp				Bewegung gekennzeichnet durch	$Fr = R\omega^2/g$	Baugrößen ca. $m^3$	Leistung $kW/m^3$
				freien Fall	< 1	< 2 (10)	< 1-2
				Schub	< 1	< 30	3-10
				Wurf, (Schub)	> 1	< 30	20
				Fliehkraft	>> 1	< 1,5	< 500 (Mischschnecke) 20

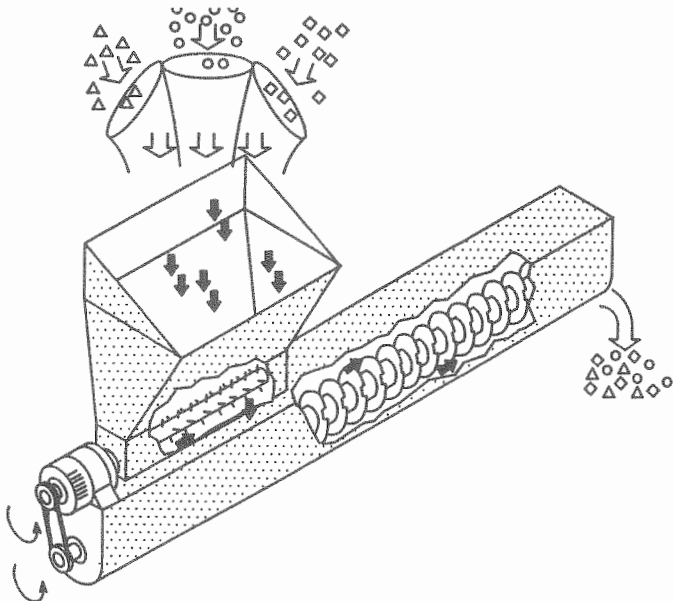
Abbildung 12: Feststoffmischer mit rotierenden Behältern und/oder rotierenden Werkzeugen.

Ein Beispiel für die kontinuierliche Mischung ist die in Düngermischanlagen häufig eingesetzte Mischschnecke (Abb. 13). Durch Einkerbungen im Fördergewinde kommt es je nach Länge und Steigung der Schnecke zu einer mehr oder weniger guten Mischung der Einzelkomponenten. Je besser die Mischgüte, desto geringer ist hier die Förderleistung. Mischschnecken mischen nicht nur in radialer sondern auch in axialer Richtung. Dies führt zu längeren Reinigungszeiten und verhindert eine zeitlich scharfe Abgrenzung bei Einstellungsänderungen.

Zusätzlich kommt es beim Mischvorgang durch die mahlende Wirkung des Fördergewindes zu einer nicht unerheblichen physikalischen Veränderung des Rohmaterials. Diese ist unter anderem abhängig von der Kornhärte, der Kornform, der Oberflächenbeschaffenheit und der Feuchte des Düngers.

Ein weiterer Nachteil ist darin zu sehen, daß der Massenstromverlauf von Dosier- und Mischschnecken gleichermaßen von lastabhängigen Schüttgutdichteänderungen [90]





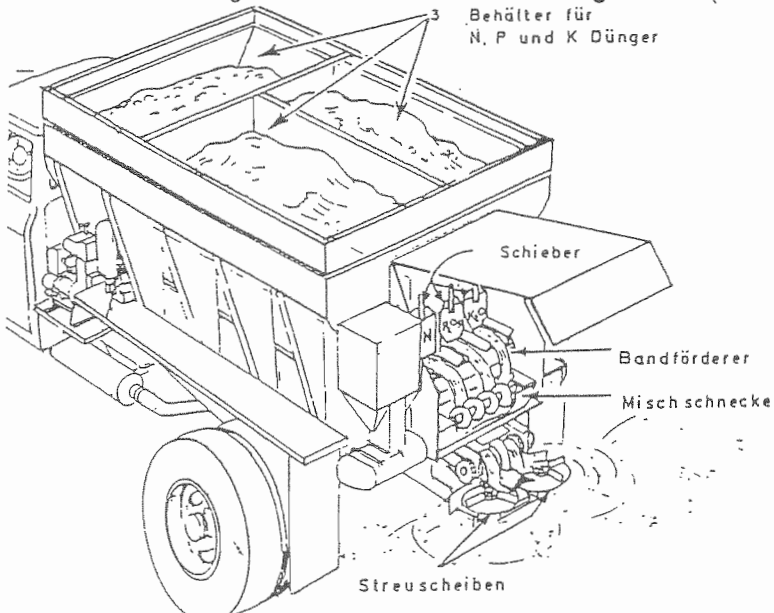
**Abbildung 13:** Mischschnecke (nach FRIZEN, 1974).

geprägt ist und bedingt durch einen meist ungleichmäßigen Austrag des Schneckengewindes vielmehr die Bezeichnung "periodisch kontinuierlich" verdient.

Bauartbedingt wird durch das Ende des Schneckengewindes in Abhängigkeit vom Füllgrad das Dosier- oder Mischgut mehr oder weniger nur periodisch ausgeworfen. Im mobilen Einsatz bedeutet eine derartige Versorgung der Verteilorgane stets erhebliche Einbußen für die angestrebte gleichmäßige Längs- und Querverteilung. Einer freien Disposition von Einzelnährstoffen stehen Einbußen bei der Dosier- und Mischgüte gegenüber. Gerade die Mischschnecken wurden aber bei den Mehrsortendüngerstreuern, wie sie in den USA eingesetzt wurden, immer wieder verwendet [43].

### 2.3.2 Dezentral und mobil während der Applikation hergestellte Düngermischungen

Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen, aber auch um die Nährstoffverhältnisse an den Bedarf verschiedener Teilflächen anpassen zu können, wurde in den USA Anfang der 70er Jahre begonnen, Einzelkomponenten mit Mehrsortendüngerstreuer während der Düngerausbringung zu mischen und zu verteilen [43, 35]. Dieses **site specific** oder **grid farming**, also die lage- und standortspezifische Düngerausbringung, konnte mit stationären Anlagen nicht mehr durchgeführt werden. Die dezentrale und mobile Einheit war das Ziel. Das Ergebnis waren erste **Mehrsortendüngerstreuer** (Abb 14).



**Abbildung 14:** Mehrkammerdüngerstreuer mit Schleuderscheiben (nach FRIZEN, 1974).

Die ersten Fahrzeuge für die Ausbringung der Nährstoffkomponenten waren mit drei Kammern für die drei Hauptnährstoffe N/P/K ausgerüstet. Die Dosierung erfolgte durch Flachschieber über Transportbändern, die die Einzelkomponenten einer horizontal

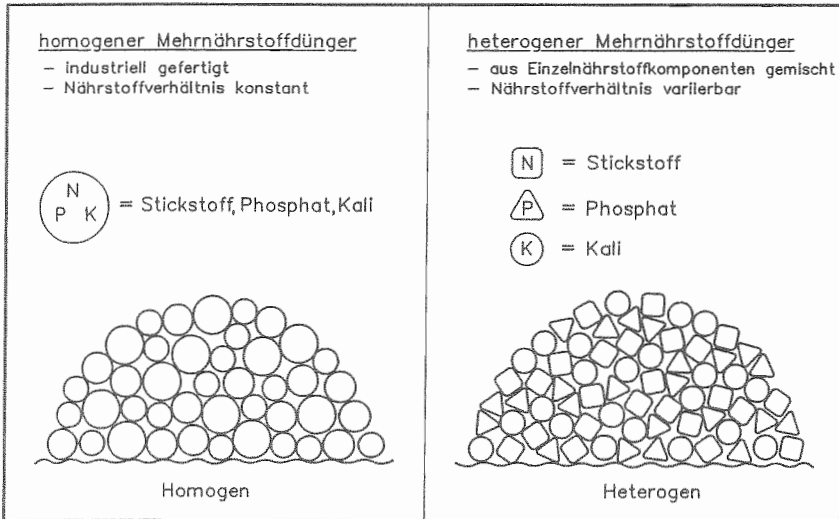
liegenden Mischschnecke zuführten. Die Mischung entstand unmittelbar vor der Ausbringung und wurde durch die nachfolgenden Schleuderscheiben verteilt [35].

Dadurch sollte eine Anpassung der Nährstoffverhältnisse an den Bedarf verschiedener Teilflächen während der Applikation erreicht werden und die eingestellte Konzentration auch während des Verteilvorganges erhalten bleiben. Es traten aber bei beiden Verfahren Probleme in mehrfacher Hinsicht auf [41, 46].

### **2.3.3 Probleme bei der Verwendung von dezentral hergestellten Mehrnährstoffdüngern**

In industriellen Großanlagen, mit chemisch technisch hohem Aufwand hergestellte Mehrnährstoffdünger weisen in jedem Partikel das gleiche Nährstoffverhältnis auf. Sie sind **homogen** [44]. Selbst eine Sortierung der Korngrößen im Laufe der Verfahrenskette hätte darauf keinen nennenswerten Einfluß (Abb. 15). Nur langwierige Verluste durch Veratmung oder nahezu irreversible Bindungsvorgänge von Nährstoffen, beispielsweise die Entstehung von Calciumnitrat, bilden eine Ausnahme, sind aber zu vernachlässigen.

Dezentral hergestellte Mehrnährstoffmischdünger dagegen erreichen die bestmögliche durchschnittliche Nährstoffkonzentration erst am Ende eines Mischvorganges der Einzelkomponenten. Sie sind **heterogen** [44]. In diesem prinzipiellen Unterschied liegt die Ursache für eine Reihe von Problemen, wie sie bei dezentral hergestellten Düngermischungen auftreten können. Die wichtigsten sind dabei die Entmischung, der Zeitbedarf für die Herstellung einer möglichst idealen Mischung und die mechanische Beanspruchung der Einzelkomponenten. Diese Größen stehen in Wechselwirkung untereinander und mit der Arbeitsweise des Mischaggregates. Folglich sind sie schwer kalkulierbar.



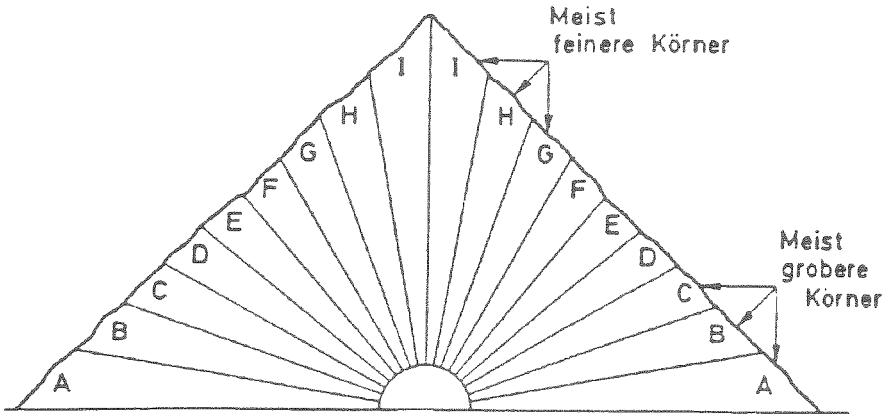
**Abbildung 15:** Homogene und heterogene Mehrnährstoffdünger im Vergleich.

### 2.3.3.1 Entmischung durch Schüttkegelbildung

Sind für die Lagerung oder Ausbringung der heterogenen Mehrnährstoffdünger zusätzlich Verlade- oder Transportvorgänge notwendig, so besteht die Gefahr der **Entmischung durch Schüttkegelbildung**. Physikalische Eigenschaften der Einzelkomponenten, wie zum Beispiel unterschiedliche **Korngrößen**, **Korngrößen-spektren** oder **Kornformen**, sind die Hauptursachen für diese Entmischungen [87]. Die Korndichte sowie die statische oder auch dynamische Bruchfestigkeit, die Verdichtungsfähigkeit, der Schüttwinkel, das Reibungsverhalten und die Hygroskopizität sind dagegen von untergeordneter Bedeutung für diese Art der Entmischung [47].

Die klassischen Entmischungsversuche nach HOFFMEISTER et al. [47, 48] zeigen, daß während der Schüttkegelbildung kleinere Körner vornehmlich im Kern und an der

Spitze des Kegels abgelagert werden, größere dagegen vorwiegend zum Fuß des Kegels rollen. Sie befinden sich hauptsächlich im Kegelmantel (Abb. 16).



**Abbildung 16:** Versuchsaufbau zur Erfassung der Entmischung nach Korngrößen (nach HOFFMEISTER et al. 1964) [48, 47].

Besteht der heterogene Mehrnährstoffdünger aus einer feinkörnigen und einer grobkörnigen Einzelkomponente, so wird im Kern des Kegels die feinkörnige deutlich über der durchschnittlichen Konzentration liegen. Mit Zunahme der radialen Entfernung um den Kern, bis hin zum Fuß des Kegels, erhöht sich entsprechend der Anteil der grobkörnigen Komponente.

Die Trennung der beiden Einzelkomponenten wird dabei umso deutlicher, je gravierender sich ihre Korngrößenspektren voneinander unterscheiden. Je mehr die Korngrößenspektren ineinandergreifen, desto geringer ist der Entmischungseffekt. Bei völliger Übereinstimmung der Korngrößen zweier Komponenten ist eine Entmischung durch Schüttkegelbildung nahezu auszuschließen [45, 10].

Werden Komponenten gleichen Korngrößenspektrums und ähnlicher Kornform, jedoch unterschiedlicher Korndichte gemischt, so ist die Entmischung bei der Schütt-

kegelbildung von untergeordneter Bedeutung und kann vernachlässigt werden [10]. Da sich jedoch eine Anpassung der Einzelkomponenten diesbezüglich nicht erreichen ließ, empfehlen die Hersteller dezentraler Mehrnährstoffdünger, durch geeignete Maßnahmen die Schüttkegelbildung zu vermeiden. So sollte beispielsweise der Auslauf des Mixers beim Beladen des Anhängers ständig bewegt und dadurch die Entmischungsrate verringert werden [98].

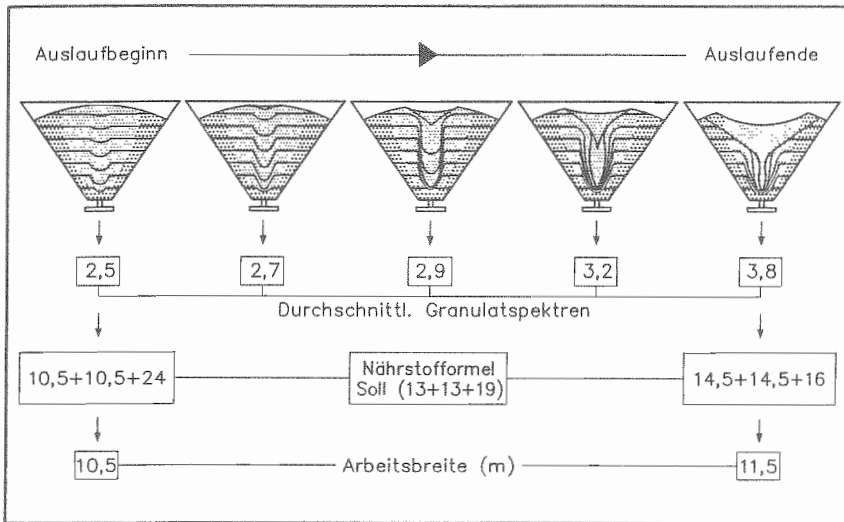
Spätestens beim Überladen vom Anhänger in den Streuer wird aber erneut ein Schüttkegel aufgebaut. Welche Konsequenzen diese Entmischung hat, zeigt ULLRICH [88] an einem Versuch mit einer Mischung der beiden Einzelkomponenten Nitrophos 20+20+0 und Kali (grob) 0+0+50, mit dem angestrebten Nährstoffverhältnis 13+13+19. Liegt dem Streuerbehälter beim Auslaufen Kernfluß zugrunde (das bedeutet, es fließt zunächst der Kern und zum Auslaufende der Mantel des Schüttkegels aus) und werden über die gesamte Dauer des Auslaufes in gleichmäßigen Abständen Proben gezogen, so läßt sich folgendes erkennen (Abb. 17):

Vom Beginn des Auslaufes an nimmt die durchschnittliche Korngröße von zunächst kleineren Körnern, aus dem Kern des Schüttkegels bis hin zu den größeren Körnern, die gegen Ende des Auslaufes von der Behälterwand nachlaufen, zu [47, 88]. Entsprechend der Zunahme der Korngrößen, verändert sich auch die Nährstoffzusammensetzung mit der Dauer des Auslaufes. Anfangs ist mit den kleineren Korngrößen das Nährstoffverhältnis zugunsten von Kali verschoben und beträgt 10,5+10,5+24<sup>1</sup>. Gegen Ende der Auslaufzeit verschiebt sich die Düngung mit der Nährstoffformel 14,5+14,5+16 zu Gunsten des Nitrophos.

Der Vergleich mit der Sollformel 13+13+19 zeigt eine Verschiebung der Nährstoffzusammensetzung von nahezu 30 - 40 % über die gesamte Auslaufzeit. Als Ursache ist die Entmischung nach Korngrößen im Schüttkegel anzuführen. Größere und rundlichere Granulateilchen rieseln nach außen zum Fuß des Kegels ab, während

---

<sup>1</sup> *Internationale Schreibweise für das Verhältnis der Nährstoffe N/P/K, auch Nährstoffformel oder Nährstoffkonzentration.*



**Abbildung 17:** Auslauf- und Streuergebnis einer Düngermischung aus Nitrophos und Kali (geändert nach ULLRICH, 1979).

kleinere Teilchen und die rauhen, kantigen und dadurch weniger rieselfähigen Kalipartikel im Kern des Kegels konzentriert sind.

### 2.3.3.2 Entmischung während des Verteilvorganges

Die durch eine Entmischung im Schüttkegel bedingte Änderung der Korngrößen während der Auslaufzeit ist zusätzlich durch die unterschiedliche Wurfweite der kleineren Partikel im Kegelmantel und der größeren im Kegelmantel, die nacheinander ausgebracht werden, von einer unerwünschten Veränderung der Arbeitsbreite begleitet [88]. Eine gleichmäßige Querverteilung ist damit nicht mehr gewährleistet. Aufbauend auf diese Erkenntnisse muß die Düngung mit dezentral hergestellten Mehrnährstoffdüngern hinsichtlich ihrer Applikationsqualität in Frage gestellt werden [94, 95, 96].

Es wurde dargelegt, daß Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften der Einzelkomponenten und der Verteilgenauigkeit der Mischdünger bei der Applikation mit den Schleuderscheiben bestehen. Streumengenabweichungen sind nachgewiesenermaßen ertragsrelevant. Dabei nimmt mit einem Anstieg des Streumengenfehlers der Ertragsverlust überproportional zu [51, 101].

Neben der Korngröße, als Hauptursache für Entmischungen im Schüttkegel, sind bei der Entmischung während des Verteilvorganges Kornhärte, Kornfestigkeit, Kornform, Dichte, Oberflächenbeschaffenheit, Reibverhalten und Hygroskopizität bedeutende Einflußfaktoren [17]. Sie stehen in Wechselwirkung zueinander und erschweren eine Quantifizierung von Einzeleinflüssen [52].

Prinzipiell werden größere Teilchen aufgrund ihres höheren Impulses weiter nach außen geschleudert. Der Feinkornanteil erreicht nur geringere Flugweiten. Kleinere Düngerpunkte (< 1,5 mm) werden durch den Luftwiderstand überproportional stärker abgebremst, als jene im Korngrößenspektrum von 1,5 mm - 3,5 mm [39, 49].

Liegen Einzelkomponenten mit geringer (< 1,5 mm) **Korngröße** und sehr engem **Korngrößenspektrum** vor, so ist die Wurfweite stark reduziert und eine gleichmäßige Verteilung nicht mehr möglich. Korngrößen von etwa 1,5 mm bis 4 mm mit einem Spektrum, das annähernd der Normalverteilung entspricht, liefern gute Verteilergebnisse. Werden nun zwei derart unterschiedliche Einzelkomponenten gemischt, muß es aufgrund des unterschiedlichen ballistischen Verhaltens zur **Entmischung** der Einzelkomponenten **während der Streuarbeit** kommen. Der Entmischungseffekt wird demnach begünstigt, wenn Einzelkomponenten in unterschiedlichen Korngrößenbereichen liegen [49, 44].

Ähnlich verhält es sich mit Einzelkomponenten gleicher Korngrößen aber deutlich voneinander abweichender **Dichten**. Komponenten mit hoher Dichte werden weiter, solche mit geringerer Dichte entsprechend weniger weit geschleudert [20, 88].



Ein erhöhtes **Reibverhalten** einer Komponente führt neben der Reduzierung der Wurfweite noch dazu, daß die Partikel aufgrund höherer Verweildauer auf der Schleuderscheibe in bevorzugte Richtungen abgelenkt werden. Es kommt zur Entmischung aufgrund zweier verschiedener und voneinander unabhängiger physikalischer Ursachen [20, 88].

Während die statische **Bruchfestigkeit** eine kalkulierbare Größe ist, hängt die dynamische Bruchfestigkeit wiederum von der Förderrate also der Ausbringung ab. Mit zunehmender **Förderrate** kommt es zur Dämpfung der impulsartigen Beschleunigung. Dieser Abstützeffekt reduziert den Bruchkornanteil und reduziert indirekt den Streumengenfehler. Ob dadurch die Ursache für den Mengeneffekt (Abb. 18), eine Erhöhung der Streugenaugigkeit aufgrund ansteigender Förderrate ist, konnte noch nicht endgültig geklärt werden.

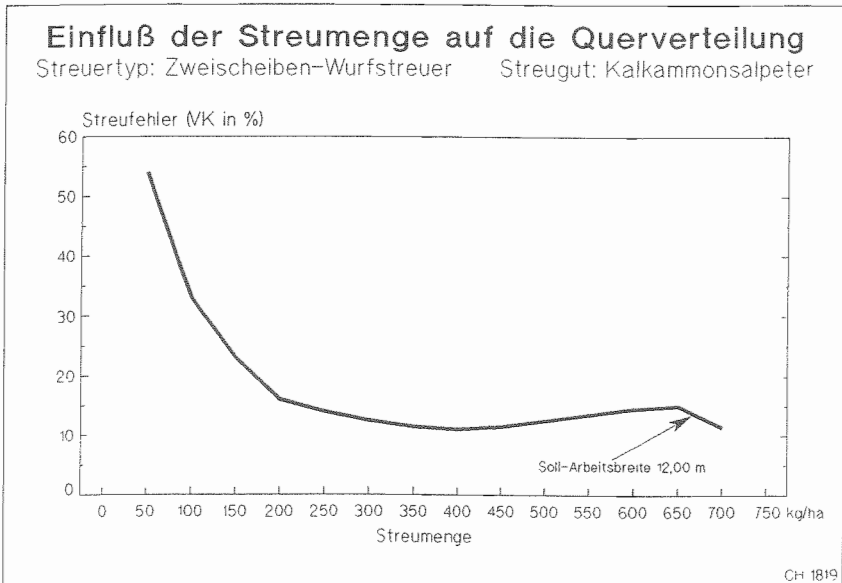
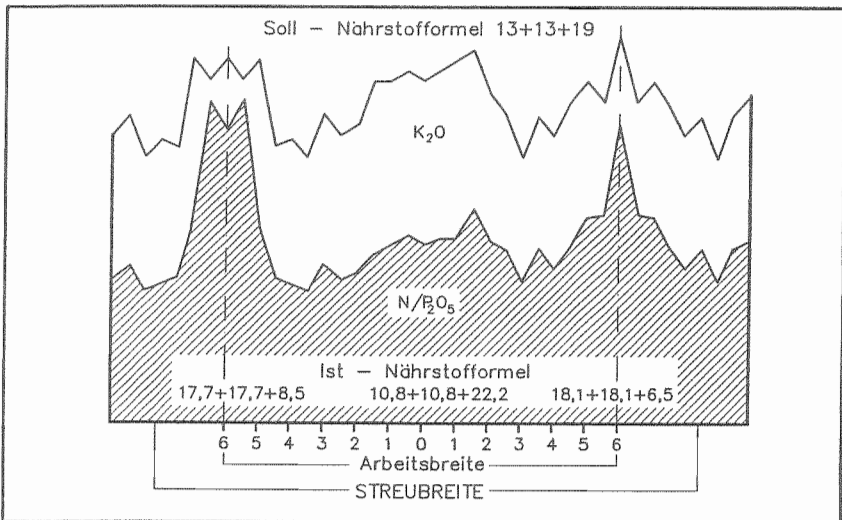


Abbildung 18: Mengeneffekt (nach ULLRICH, 1984).

In diese Überlegungen sind auch **Hygroskopizität** und **Bruchfestigkeit** miteinzubeziehen. Diese beiden Eigenschaften stehen in Wechselwirkung mit den bisher genannten. Sie fördern Streumengenabweichungen und Entmischungseffekte gleichermaßen [94].

An einer Düngermischung aus den Komponenten Nitrophos 20+20+0 und Kali (grob) 0+0+50 mit der Sollnährstoffformel 13+13+19 wurde die ballistische Entmischung, die Streumengenabweichung und die zonale Verteilung der Einzelkomponenten untersucht. Erwartungsgemäß hat sich das Nährstoffverhältnis im mittleren Bereich hinter dem Streuer zugunsten des Kali verschoben. Die Nährstoffformel beträgt in dieser Zone 10,8+10,8+22,2. An den Randzonen hat sich das Nährstoffverhältnis umgekehrt. Die Formeln lauten im Überlappungsbereich 17,7+17,7+8,5 bzw. 18,1+18,1+6,5 (Abb. 19).



**Abbildung 19:** Nährstoffverteilung einer Düngermischung aus Nitrophos und Kali bei der Ausbringung mit einem Zweischeibenstreuer (geändert nach ULLRICH, 1979).

Ein Ausgleich der Konzentrationen durch die Überlappung ist nicht zu erwarten. In diesen Bereichen kommt es vielmehr zu einer Fehleraddition. Allein aufgrund der ballistischen Entmischung hat sich das Nährstoffverhältnis zonal unterschiedlich um 30 - 70 % verschoben [88].

Diese Erkenntnisse erlauben die Schlußfolgerung, daß generell Düngermischungen von Einzelkomponenten, die nicht in allen physikalischen Eigenschaften völlige Übereinstimmung aufweisen, nicht mit Schleuderstreuern ausgebracht werden dürfen. Alle andere Techniken kommen nur in Betracht, wenn sich während der Querverteilung durch ein Fördersystem Entmischungsvorgänge vermeiden und Wurfweiten beschränken lassen [45].

### **2.3.3.3 Mechanische Veränderung des Rohmaterials**

Das Erreichen einer hohen Mischgüte während eines zeitlich definierten Mischvorganges bedingt die mechanische Stabilität des Rohmaterials. Ein Maß dafür ist die Bruchfestigkeit (Kapitel 2.3.3.2). Sie ist eine Kenngröße der Einzelkomponenten und kann herstellungsbedingten Schwankungen unterliegen [17]. Eine Zunahme des Bruches erschwert die Herstellung des heterogenen Mehrnährstoffdüngers in allen Phasen des Mischens. Die Mischgüte nimmt ab.

Eine Optimierung ist nicht nur bei den eingesetzten Rohmaterialien, sondern auch bei der Auswahl des Mischsystems und seiner Arbeitsweise erforderlich. Mischsysteme mit hoher Energieübertragung auf das Rohmaterial und der damit verbundenen Erhöhung des Bruchkornanteiles oder sogar der Vermahlung, scheiden deshalb aus. Aufbauend auf diese Erkenntnisse sollten Dosier- und Mischschnecken auch aus diesem Grund nicht verwendet werden.

#### **2.3.3.4 Zeitbedarf für die Mischung und Zuteilung**

Bei den herkömmlichen Mischaggregaten ist eine Erhöhung der Mischgüte mit erhöhtem Zeitbedarf verbunden. Die Nachteile einer verlängerten Mischzeit bestehen darin, daß

- mit der erhöhten Verweildauer des Rohmaterials im Mischer der Bruchkomanteil und die Vermahlung zunehmen,
- durch hohen Zeitbedarf für das Mischen die Reaktionsgeschwindigkeit des Gesamtsystems herabgesetzt wird,
- dynamische Mischer in der Regel einen diskontinuierlichen Massenstrom verursachen und deshalb eine kontinuierliche Zuführung zu den Verteilorganen nicht gewährleistet werden kann.

Diese Gründe stehen einer reaktionsschnellen Nährstoffänderung und einer sicheren Querverteilung des Düngers entgegen.

#### **2.4 Aktueller Entwicklungsstand in den USA**

Gestützt auf die bisherigen Erkenntnisse wurde in den USA Ende der 80er Jahre ein Gesamtkonzept zur teilflächenspezifisch bedarfsgerechten Applikation von heterogenen Mehrnährstoffdüngern auf der Basis eines neuentwickelten Mehrkammerdüngerstreuers vorgestellt. Zunächst erfolgt, meist nach Infrarotluftbildauswertung, die Erfassung ertragsrelevanter Einflußgrößen in Boden- und Nährstoffkarten. Anschließend wird der Düngeplan berechnet. Eine Karte für den Nährstoffbedarf der verschiedenen Teilflächen dient als Grundlage für die Düngerapplikation. Die Datenerfassung ist gestützt auf die Satellitenortung zur Lokalisierung der Bodenunterschiede. Die Düngerausbringtechnik wird dann mit Hilfe der Satellitennavigation gesteuert. Der Fahrer übernimmt lediglich die Überwachung des Gerätes, da der Prozeß durch die Möglichkeit der Datenübertragung vom Betriebs-PC auf den mobilen

Agrarcomputer zur Steuerung des Düngerstreuers weitgehend automatisiert werden konnte.

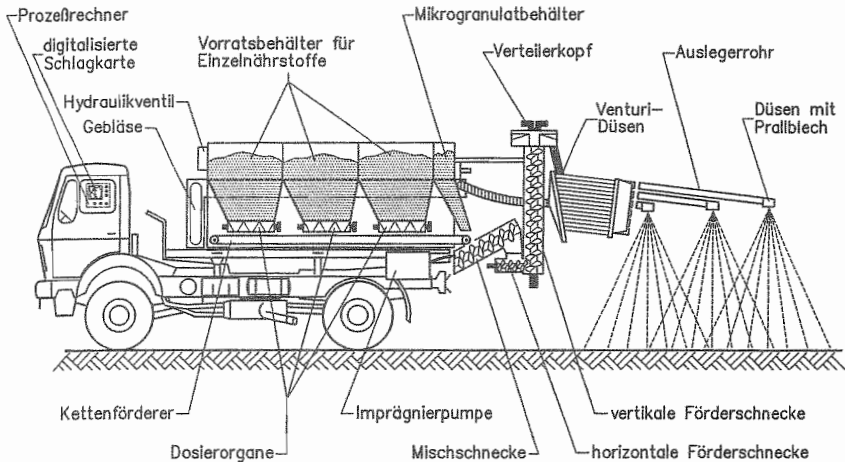
Der Mehrkammerdüngerstreuer besteht aus Düngerbehältern, in denen bis zu sechs verschiedene Düngerarten mitgeführt werden können (Abb. 20). Darunter befinden sich die Dosierorgane, ausgeführt als ölhydraulisch angetriebene und geregelte Zellenräder. In neueren Versionen werden wieder Banddosierer verwendet. Der ausgetragene Dünger wird von einem Trogkettenförderer zum Heck des Fahrzeuges transportiert und dem Mischorgan, einer schräg angestellten Mischschnecke, zugeführt. Der hergestellte heterogene Mehrnährstoffdünger wird nach Durchlaufen einer horizontal eingebauten Zuführschnecke mit einer vertikalen Förderschnecke zum Verteilkopf hochgefördert. Im Verteilkopf wird der Dünger durch rotierende Paddel je nach Arbeitsbreite auf bis zu 20 getrennte Kammern verteilt. Die Kammern münden in die Düsenendrohre des pneumatischen Auslegers. Durch die hohe Strömungsgeschwindigkeit wird der Dünger zu den Düsen gefördert und dort verteilt.

Bauartbedingt ergeben sich für den Fluß des Rohmaterials in diesem Mehrkammerdüngerstreuer folgende Probleme:

- Die langen Wege führen zu Zeitverlust.
- Durch die Aneinanderreihung mechanischer Baugruppen mit Energieeintrag und deren Übergabestellen ist die Gefahr einer strukturellen Veränderung des Rohmaterials gegeben.
- Als Mischorgan wird eine Mischschnecke eingesetzt. Der Zeitaufwand wird dadurch zusätzlich erhöht.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Sowohl die Mischgüte, als auch die mechanische Beanspruchung des Düngers sind von der Durchsatzleistung und der Förderrate abhängig. Auf Auswirkungen einer Erhöhung des Feinkornanteils wurde bereits hingewiesen.



**Abbildung 20:** Mehrkammerdüngerstreuer (geändert nach THE NEW LOR\*AL, 1990).

- Mischschnecken sind nicht selbstreinigend. Sie neigen dazu, nicht nur radial, sondern auch axial zu mischen. Dadurch besteht die Gefahr der Verschleppung zudosierter Komponenten in Bereiche, in denen sie nicht ausgebracht werden sollen.
- Der Auf- und Abbau von Konzentrationsänderungen ist verzögert.
- Der umfangreiche Bauaufwand führt zu hohen Kosten. Verschleiß und Wartungsaufwand werden ebenfalls erhöht.

## 2.5 Einordnung der Grundlagen

Das Studium von Bodenkarten, Bodenuntersuchungen, Ertragskarten und Luftbildern zeigt die Notwendigkeit einer bedarfsgerechten, teilflächenbezogenen Düngung auf. Industriell chemisch und technisch aufwendig hergestellte Mehrmährstoffdünger sind dafür nicht geeignet. Herstellungsbedingt sind sie homogen, das heißt, daß, mit

geringen Abweichungen, jeder einzelne Partikel stets das Nährstoffverhältnis der Gesamtmenge enthält. So bleibt auch nach Entmischungsvorgängen, wie sie beim Verladen und Verteilen des Düngers auftreten, die Nährstoffformel konstant. Eine Anpassung der Einzelnährstoffe während der Fahrt an den teilflächenspezifischen Bedarf ist mit homogenen Mehrnährstoffdüngern jedoch nicht möglich.

Anders verhält es sich mit den dezentral hergestellten Mehrnährstoffdüngern. Sie bestehen aus Einzelnährstoffkomponenten, die in stationären Anlagen vor der Düngerausbringung oder in mobilen Geräten während der Applikation zum Mehrnährstoffdünger zusammengemischt werden. Auf diese Weise hergestellte Dünger sind heterogen. Auch in stationären Anlagen vorgemischte Dünger erlauben lediglich eine Verbesserung der Düngung auf einzelnen Schlägen, jedoch noch keine Optimierung auf den Teilflächen. Demnach kommen für die bedarfsgerechte und teilflächenspezifische Mineraldüngerausbringung nur mobile Mischsysteme in Betracht, die während der Applikation Dünger beliebiger Nährstoffanteile herstellen können.

Die großflächige Landwirtschaft in den USA mit ihrer extensiveren Wirtschaftsweise und den notwendigen hohen Flächenleistungen begünstigte den Einsatz und die Entwicklung dieser Techniken. Die Düngung wird durch die langjährigen positiven Erfahrungen mit dezentral hergestellten Mehrnährstoffdüngern überwiegend an Dienstleistungsunternehmen abgegeben. Diese setzen auf eine hohe arbeitswirtschaftliche Effektivität. Hohe Fahrgeschwindigkeiten und Flächenleistungen sind für den wirtschaftlichen Einsatz dieser Systeme erforderlich.

Durch die jahrzehntelangen Erfahrungen im "bulk blending" wurde durch eine gezielte Auswahl der Mischkomponenten bei der chemischen Industrie eine Anpassung der physikalischen Eigenschaften erreicht. Sie verlieren deshalb an Bedeutung für die Hersteller zukunftsorientierter Applikationstechniken.

Anders ist die Situation in Mitteleuropa zu beurteilen. Dezentrale Mischstationen haben sich trotz mehrerer Anläufe nicht durchsetzen können. Die kleinparzellierte Landwirt-

schaft wurde aus Gründen der Herstellungskosten nicht mit Einzelnährstoffkomponenten, die physikalisch aufeinander abgestimmt waren, beliefert. Stets bestand deshalb die Gefahr der Entmischung bei Verladevorgängen oder beim Streuen von heterogenen Düngern. Die Hersteller von Volldüngern korrigierten die Preise ihrer Produkte, so daß aus Kostengründen kein Anreiz für die Landwirtschaft gegeben war, auf Mischdünger umzusteigen. Die Forderung nach teilflächenspezifisch bedarfsgerechter Düngung konnte ohnehin mit dezentral hergestellten Düngern nicht zufriedenstellend erfüllt werden, weil es bislang an technischen Lösungen zur Mischung und Verteilung während der Fahrt fehlte.

Erst die jüngsten Erfolge der Prozeßtechnik in der Außenwirtschaft und die ökologisch wie ökonomisch dringend notwendige Ausrichtung der Düngung auf den Bedarf von Teilflächen, fordern trotz der, mit den USA verglichen, weitaus ungünstigeren Voraussetzungen, die Schließung dieser applikationstechnischen Lücke. Infolgedessen muß die zentrale Einheit eines Mehrkammerdüngerstreuers, das Mischorgan, von seinem Design und seiner Leistungsfähigkeit so ausgelegt werden, daß die ungünstigeren Voraussetzungen durch nicht angepaßte Düngersorten kompensiert werden können. Bauaufwand und Reaktionsgeschwindigkeiten sind auf die hohen Ansprüche und Erfordernisse der mitteleuropäischen Landwirtschaft abzustimmen.



### 3 Zielsetzung

Die zukunftsorientierte Mineraldüngeranbringung ist als ein dynamischer Prozeß anzusehen. Der Nährstoffbedarf von Teilflächen eines Feldes kann je nach Versorgungszustand und Nährstoffverfügbarkeit erheblichen Schwankungen unterliegen. Es ist daher erforderlich, das Nährstoffverhältnis in Mischdüngern permanent und mit hoher Genauigkeit dem jeweils aktuellen Bedarf anzupassen.

Darüber hinaus erfordert die konsequente Einbindung der Mineraldüngeranbringung in das Gesamtkonzept einer teilschlagspezifischen Durchführung aller produktionstechnischen Maßnahmen den raschen Wechsel zwischen unterschiedlichen Nährstoffverhältnissen in einem Mischdünger und Nährstoffausbringmengen pro Flächeneinheit. Dabei sind die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen, die an die Zusammensetzung von Mehrnährstoffdüngern gestellt werden.

Stationäre Mischanlagen sind nicht oder nur unzureichend in der Lage, diese zentralen Forderungen zu erfüllen. Deshalb ist die Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen während der Applikation anzustreben. Dies erfordert die Verwendung von Mehrsorten-Düngerstreuern. Vorläufige Erfahrungen und Erkenntnisse mit der Verwendung derartiger Geräte aus den USA lassen jedoch erkennen, daß diese Konstruktionen für die speziellen Einsatzverhältnisse in Mitteleuropa gravierende mischungs- und verfahrenstechnische Nachteile aufweisen.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht deshalb in der technischen Entwicklung und Erprobung, sowie der verfahrenstechnischen Einordnung eines mobilen Gerätes zur Herstellung von Mineraldüngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen während des Ausbringvorganges. Die Schwerpunkte der Arbeit wurden auf die gezielte Auswahl, Weiterentwicklung und Erprobung der wichtigsten **technischen** Bauteile gelegt, insbesondere der *Düngervorratsbehälter*, der *Dosierorgane*, des *internen Förderorganes*, sowie des *Mischorganes*.

Dabei bestand ein vorrangiges Ziel darin, auch unter ungünstigen Einsatzbedingungen die aktuellen **verfahrenstechnischen** Forderungen nach

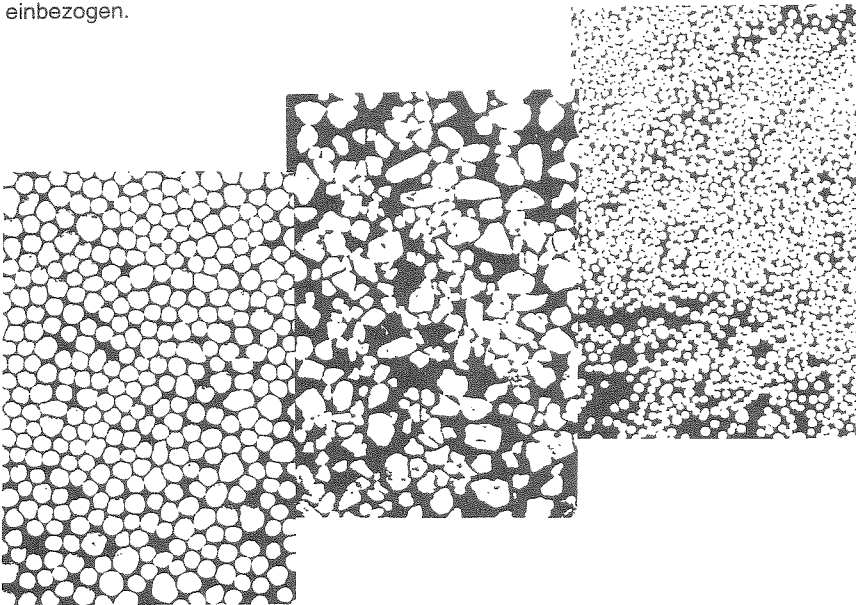
- raschem Wechsel der Nährstoffzusammensetzung,
- sicherem Einhalten der vorgegebenen Nährstoffgehalte in der Mischung,
- Einhalten der gesetzlich zugelassenen Grenzwerte,
- schonender Behandlung der Einzelnährstoffkomponenten,
- ausschließlich radialer Mischung der Einzelnährstoffkomponenten,
- sowie rascher und vollständiger Selbstreinigung zur scharfen Abgrenzung definierter Einstellungen
- und die Möglichkeit der Einbindung dieses Düngerausbringsystems in künftige Verfahren einer rechnergestützten Abwicklung der Bestandesführungsmaßnahmen

mit hoher Sicherheit zu realisieren. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, daß sich die grundlegenden Unterstellungen der Arbeit an praxisüblichen Anforderungen orientieren.

## 4 Versuche zur technischen Entwicklung eines Gerätes für die mobile Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen

### 4.1 Auswahl und Kenndaten der Einzelnährstoffkomponenten

Das Gesamtergebnis dieser Entwicklungsarbeit wird im wesentlichen durch Beherrschung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Mischungspartner bestimmt. Nach eingehender Beratung mit Experten der chemischen Industrie kann festgestellt werden, daß für den Einsatz in mobilen Mischsystemen nur Granulate, Kompaktate und Prills in Frage kommen (Abb. 21). Mehle und Stäube sind nicht geeignet und von vorneherein auszuschließen. Die Kristalline sind zwar einsetzbar, jedoch von untergeordneter praktischer Bedeutung und werden in die Versuche nicht einbezogen.



**Abbildung 21:** Für die Versuche wurden (von links) Granulat, Kompaktat und Prill ausgewählt.

Bei der Auswahl der Düngemittel wurden zwei Ziele verfolgt:

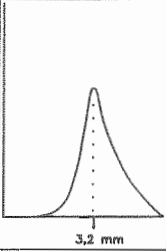
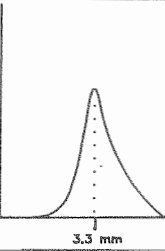
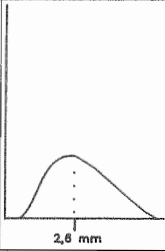
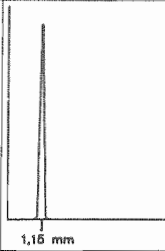
1. Mit den ausgewählten Einzelnährstoffdüngern mußten alle praxisrelevanten Nährstoffverhältnisse hergestellt werden können.
2. Das Spektrum der physikalischen Eigenschaften der Dünger sollte durch die Auswahl hinreichend repräsentiert sein, um gegebenenfalls Einsatz einschränkungen aufzuzeigen.

In den Versuchen kamen Kalkammonsalpeter, Cederan P 23, 40er Kali und Harnstoff zum Einsatz. Für die Herstellung der bedarfsgerechten Mischungen im Hauptversuch genügten Kalkammonsalpeter, Cederan P 23 und 40er Kali. Die Kenngrößen der eingesetzten Düngemittel lassen erkennen, für welche Vielfalt die Dosier-, Misch- und Verteiltechnik geeignet sein muß (Tab.5).

Die Gehalte der Einzelnährstoffdünger entsprechen in der Regel den Herstellerangaben. Offensichtlich sind in der chemisch industriellen Fertigung die Nährstoffgehalte so präzise einzustellen, daß sogar die gesetzlich vorgegebenen Toleranzbereiche noch ausgeschöpft werden können. Nach Auskunft der Kontrollbehörden lagen 65 % der Chargen im Toleranzbereich. Nur 5 % haben ihn unterschritten. 30 % der geprüften Einzelnährstoffdünger entsprechen demnach den Herstellerangaben oder weisen etwas höhere Nährstoffkonzentrationen auf. Diese Angaben beziehen sich auf inländische Erzeugnisse.

In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, daß nur noch 30 % des gesamten Düngemittelverbrauches in Deutschland aus deutscher Produktion gedeckt werden. Nach Auskunft von Experten des Industrieverbandes Agrar werden von den 1 500 000 t N-haltiger Düngemittel ca. 70 % importiert, von 640 000 t  $P_2O_5$ -haltiger Dünger ca.

**Tabelle 5:** Kenngrößen ausgewählter Düngemittel.

Kenngröße	Düngemittel			
	Kalkammonsalpeter	Cederan P 23	40er Kali	Harnstoff
Name	Kalkammonsalpeter	Cederan P 23	40er Kali	Harnstoff
Form	Granulat	Granulat	Kompaktat	Prill
Partikel	kugelhähnlich	kugelhähnlich	unregelmäßig	kugelig
Oberfläche	glatt	rauh	rauh	glatt
Nährstoffgehalt	27 % N	23 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40 % K <sub>2</sub> O	46 % N
Schüttgew. (t/m <sup>3</sup> )	0,95	1,15	1,01	0,7 - 0,8
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,5 - 2,0	1,5 - 2,0	2,0 - 2,3	1,3 - 2,0
Anteil (Gew. %) mit Korngrößen (mm)	90	90	75	98 - 100
mittl. Größe (mm)	2,0 - 5,0	2,0 - 5,0	1,6 - 4,0	1,0 - 1,3
Verteilung der Korngrößen (schematisch)				
Toleranz (%) <sup>1</sup>	- 0,8	- 0,8	- 1,5	- 0,4

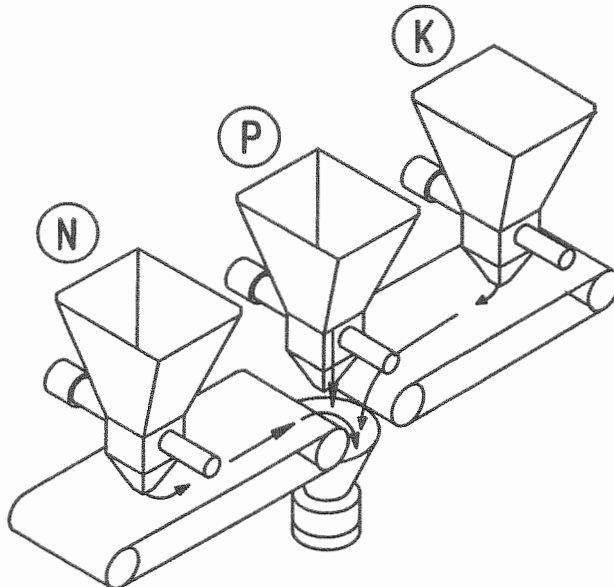
<sup>1</sup> Zulässige Toleranzen für Einzelnährstoffdünger nach Düngemittelverordnung §6.

65 % und von 850 000 t K<sub>2</sub>O-haltiger Dünger ca. 35 %. Die Lieferung erfolgt bei phosphat- und kalihaltigen Düngemitteln zu 85 - 90 % lose, bei den stickstoffhaltigen sind es nur 70 %. Die Ursache dafür ist, daß Harnstoff nur zu 100 % abgesackt geliefert werden kann.

Die Düngemittel wurden unmittelbar vor Versuchsbeginn direkt vom Hersteller bezogen, trocken und dunkel gelagert. Veränderungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften sollten dadurch vermieden werden.

#### 4.2 Schematischer Aufbau eines Gerätes für die mobile Herstellung variabler Düngermischungen

Für die Herstellung von heterogenen Mischdüngern mit variablen Nährstoffanteilen sind fünf Module von Bedeutung (Abb. 22). Ob diese Technik als Selbstfahrer, gezogen oder im Anbau des Heckkrafthebers eingesetzt, wird ist dabei zunächst nicht von Bedeutung. Grundsätzlich ist für jede Einzelnährstoffkomponente ein separater Vorratsbehälter vorhanden. Jeder dieser Vorratsbehälter wird mit einer Dosiereinrichtung versehen, um jeden Nährstoff unabhängig auszutragen.



**Abbildung 22:** Schematischer Aufbau eines Gerätes für die Herstellung variabler Düngermischungen.

Die Aufgabe der Einzelnährstoffdünger erfolgt auf ein internes Förderorgan, das den Gutstrom zum Misch- und Verteilorgan aufrechterhält. Der Dosierung und Zusammenführung folgt die Mischung und Verteilung der Einzelnährstoffkomponenten.

Kernstück ist das Mischorgan. Seine Mischgüte wird als Maß für die Arbeitsqualität des Gesamtsystems herangezogen. Zur Ausschöpfung seiner Leistungsmerkmale ist das Mischorgan aber auf eine gleichmäßige und sichere Beschickung durch die vorgeschalteten Organe angewiesen.

Eine Beurteilung der Mischgüte als Maß für die Mischerleistung kann nur nach Überprüfung des Auslaufes aus dem Vorratsbehälter, der Dosierorgane und der internen Fördereinrichtung vorgenommen werden. Deshalb wurden in Vorversuchen die Massenströme der ausgewählten Einzeldünger beim Auslaufen, die Kenngrößen der Dosierorgane und die Gleichlaufschwankungen des internen Förderorganes ermittelt. Alle Versuche wurden bereits mit den für den späteren verfahrenstechnischen Mischversuch relevanten Einzelnährstoffkomponenten durchgeführt.

#### **4.2.1 Auswahl und technischer Aufbau geeigneter Vorratsbehälter**

Für eine sichere Beurteilung des Gesamtsystems ist entscheidend zu beachten, daß die ersten Einflüsse bereits von der Art und Weise der Befüllung und Entleerung der Vorratsbehälter ausgehen. Aufbauend auf die unter Kapitel 2.3.3.1 beschriebene Problematik des Entmischens durch Schüttkegelbildung kann es auch bei Einzelnährstoffdüngern zur Entmischung nach Korngrößen kommen. Dies würde sich nicht analog den heterogenen Mischdüngern in Form einer Veränderung der Nährstoffanteile der Einzelnährstoffkomponenten niederschlagen, sondern in einem negativen gravimetrischen Einfluß auf die Dosiergenauigkeit durch eine Veränderung des Dosierstromes, während der nachfolgenden sensiblen Mischung und Verteilung.

Neben ausreichendem Fassungsvermögen, stabiler Bauweise und Korrosionsbeständigkeit sind in diesem Zusammenhang an die Vorratsbehälter weitere wichtige Forderungen zu stellen. Im Einzelnen sind dies

- Vorkehrungen beziehungsweise Einbauten, durch die eine Entmischung nach Korngrößen wirksam verhindert werden kann,
- Vermeidung von Brückenbildung durch geeignete Austragshilfen [30] und
- Maßnahmen, die einen gleichmäßigen Auslauf ermöglichen.

Um den möglichen Einfluß der Entmischung im Schüttkegel auf die Dosierung der Einzelnährstoffkomponenten deutlich zu machen, wurden Untersuchungen an einem Schrägbodenbehälter durchgeführt, dessen Auslaufverhalten durch Kernfluß gekennzeichnet ist.

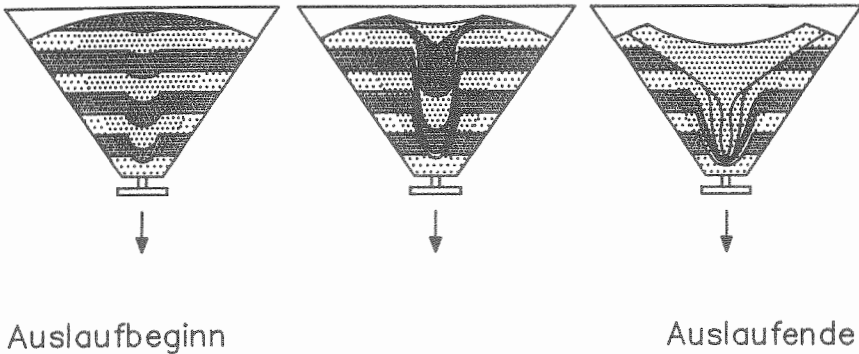
#### **4.2.1.1 Versuche zur Ermittlung der Massenströme aus einem Vorratsbehälter beim Einsatz ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten**

Als Nachweis für das Kernflußverhalten wurden zunächst zwei unterschiedlich gefärbte Düngerkomponenten abwechselnd horizontal übereinander geschichtet. Die Schichtdicke betrug etwa 2 - 3 cm. Durch diese Schichtung konnte über die gesamte Auslaufdauer das häufig auftretende Kernflußverhalten in trichterförmigen Vorratsbehältern dokumentiert werden (Abb. 23).

Dieses Ergebnis diente als Grundlage für die weiteren Versuche. Sie sollten erkennen lassen, ob ein gleichmäßiges Auslaufverhalten und somit eine gleichmäßige Dosierung der ausgewählten Einzelnährstoffe über die Gesamtversuchsdauer überhaupt möglich war. Die Untersuchungen wurden mit Kalkammonsalpeter, 40er Kali und Harnstoff durchgeführt. Somit waren die praxisrelevanten Düngerformen Granulat, Kompaktat und Prill in die Versuche einbezogen.

Der methodische Aufbau der Versuche bestand aus einem Schrägbodenbehälter mit einem zentralen Einlauf zur Förderung der Entmischung durch Schüttkegelbildung und einem zentralen Auslauf zur Unterstützung des Kernflusses. Dieser Behälter wurde mit drei Drahtseilen in eine Wiegezelle eingehängt (Abb. 24).





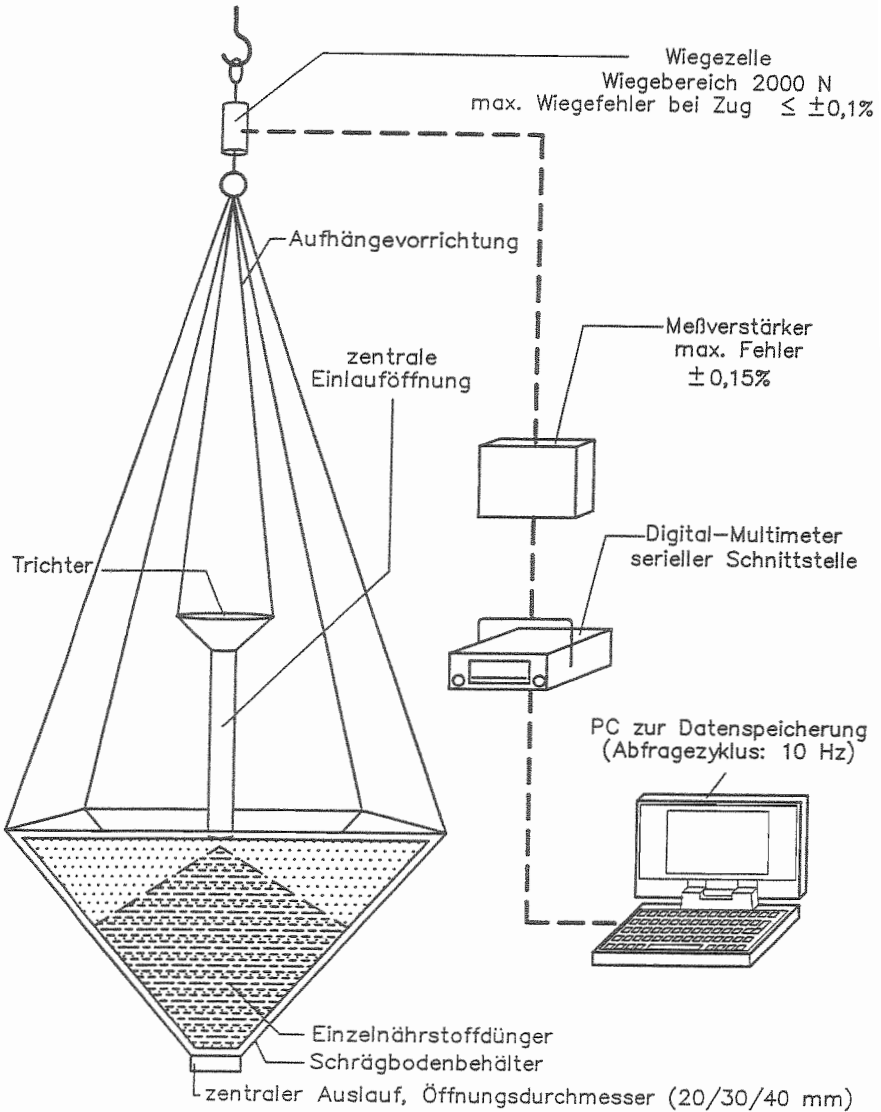
## Kernfluß

**Abbildung 23:** Auslaufverhalten eines ausgewählten Schrägbodenbehälters.

Die Wiegezone mit einem Wiegebereich von 2000 N und einem maximalen Fehler bei Zug von  $< 0,1 \%$  wurde während der Versuche mit maximal 50 % des Wägebereiches belastet. Nach der elektronischen Signalverstärkung und Digitalisierung wurde mit einem Abfragezyklus von 10 Hz das Gesamtgewicht des Behälters dynamisch erfaßt und die ungefilterten Meßsignale mit Hilfe eines Personal Computers abgespeichert.

Aus den erfaßten Gewichtsdaten wurde über die gesamte Auslaufdauer der gleitende Mittelwert aus je 10 Einzelwerten gebildet. In die weiteren Berechnungen wurde nur jeder fünfte dieser Mittelwerte einbezogen. Diese Werte wurden nach der Zeit differenziert und so der Massenstrom errechnet.

Die Massenstromdaten konnten anschließend in einer linearen Regressionsanalyse verrechnet werden. Die lineare Regression wurde gewählt, um näherungsweise den Trend des Massenstromes über die gesamte Auslaufzeit zu ermitteln, nicht aber um das Verhalten während des Auslaufes durch eine Funktion möglichst exakt zu



**Abbildung 24:** Versuchsaufbau zur Ermittlung des Massenstromes ausgewählter Einzelnährstoffdünger bei Kernfluß mit verschiedenen Auslauföffnungen.

beschreiben. Diese Verfahrensweise erscheint gerechtfertigt, da weniger die absolute, sondern vielmehr die qualitative Änderung des Massenstromes von Interesse ist.

Der Versuch wurde mit Auslauföffnungen (runden Bohrungen) vom Durchmesser 20, 30 und 40 mm wiederholt. Es sollte untersucht werden, welchen Einfluß die Düngerform und die Förderrate auf den Massenstrom oder seine Veränderungen hat.

#### **4.2.1.2 Ergebnisse der Vorratsbehälterauslaufversuche**

Zunächst wurde der Versuch mit Harnstoff, einem Prill mit glatter Oberfläche und sehr engem Korngrößenspektrum sowie einer Auslauföffnung von 20 mm Durchmesser durchgeführt. Aufgrund seiner physikalischen Kenngrößen war mit einer Entmischung des Harnstoffes nach Korngrößen nicht zu rechnen. Dennoch nahm über einer Auslaufdauer von 800 Sekunden der Massenstrom von durchschnittlich 58 g/s auf 52 g/s um mehr als 10 % ab (Abb. 25).

Dies wird am fallenden Kurvenverlauf einer linearen Regression sichtbar. Die relativ hohen Änderungen des Massenstromes lassen bereits die Probleme dieser Methode der Einzelnährstoffdosierung selbst bei gleichmäßigem Ausgangsmaterial erkennen. Auch eine Erhöhung der Förderrate führte nicht zu einem gleichmäßigeren Massenstrom (Abb. 26).

Dies wird am Anstieg des Regressionskoeffizienten bei einem Vergleich der Kurvenverläufe mit den Auslauföffnungen von 20 und 30 mm deutlich. Darin steigt der Koeffizient von -0,007 auf -0,03, das heißt, durch die Erhöhung der Förderrate nahm der Massenstrom verstärkt ab.

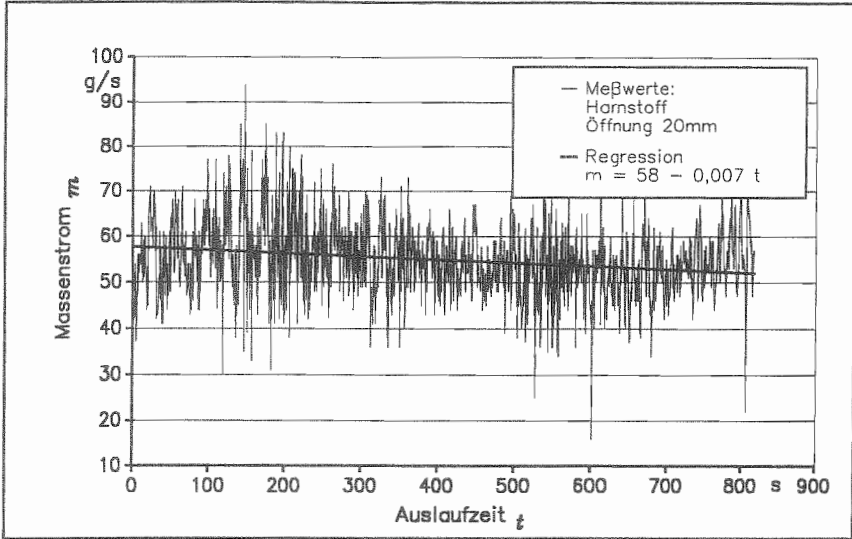


Abbildung 25: Schrägbodenauslaufversuch mit Harnstoff bei 20 mm Öffnung.

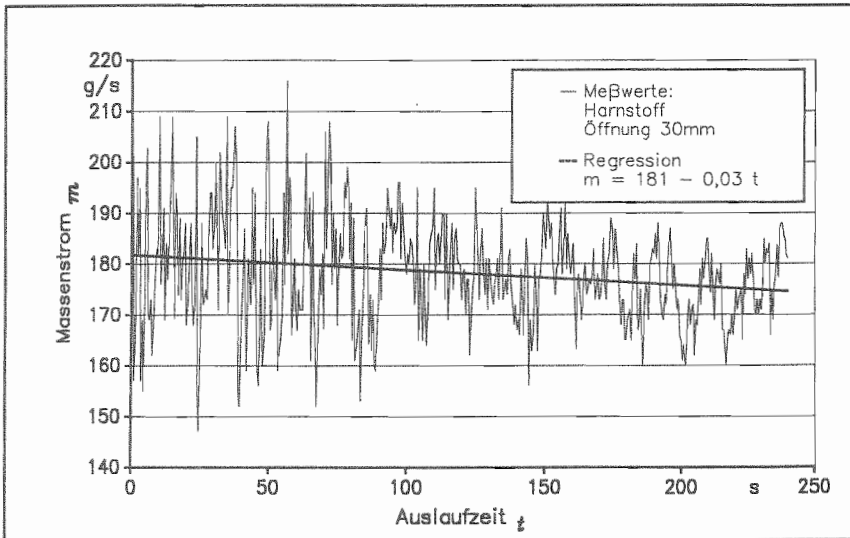
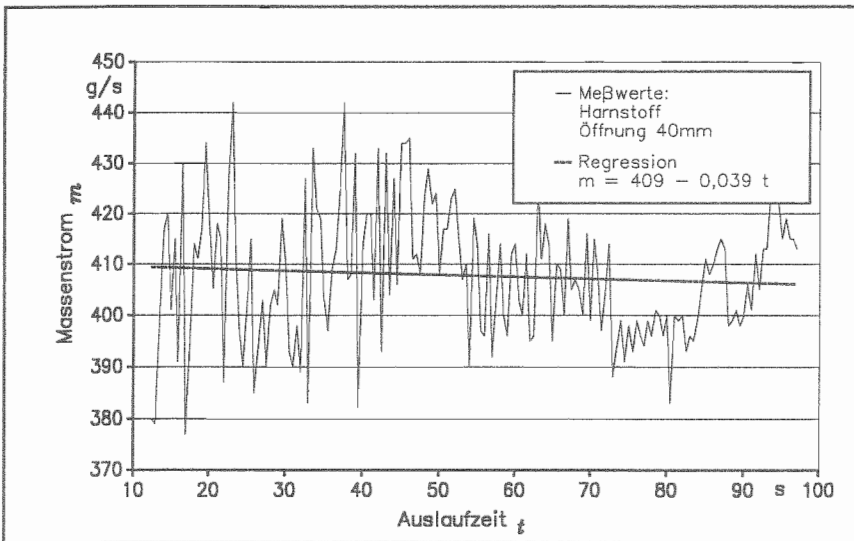


Abbildung 26: Schrägbodenauslaufversuch mit Harnstoff bei 30 mm Öffnung.

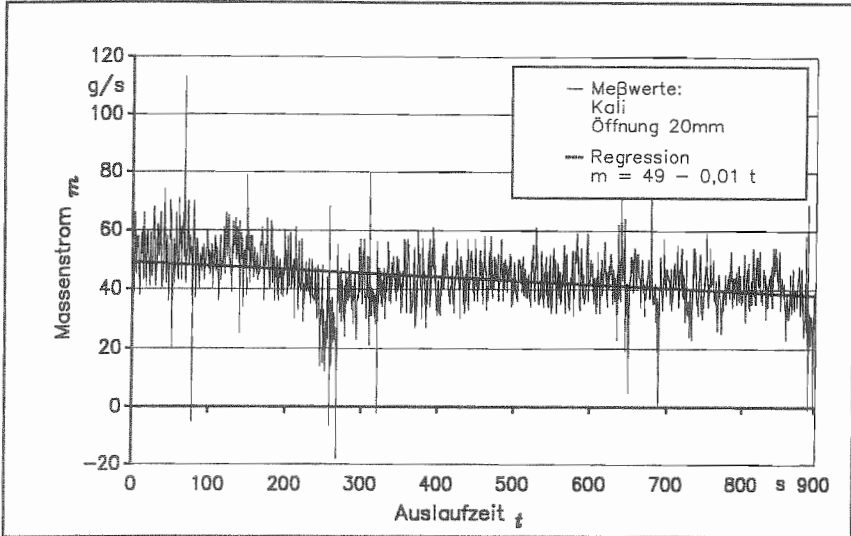
In einer Gesamtauslaufdauer von etwa 250 Sekunden ging der Massenstrom bei einer Auslauföffnung von 30 mm von 183 g/s auf 174 g/s um etwa 5 % zurück. Ein Vergleich mit der Variante von 40 mm Öffnung (Abb. 27) zeigt einen Rückgang in nur 100 Sekunden Auslaufzeit von 410 g/s auf 405 g/s, also ca. 1,5 %. Dies erscheint zunächst gering. Tatsächlich ist jedoch auch diese Vergrößerung der Auslauföffnung die Ursache für eine weitere Ausprägung der Massenstromabnahme je Zeiteinheit, denn der Regressionskoeffizient fällt auf den Wert  $-0,039$ .



**Abbildung 27:** Schrägbodenauslaufversuch mit Harnstoff bei 40 mm Öffnung.

Da eine Entmischung nach Korngrößen als Ursache fast ausgeschlossen werden kann, liegt die Vermutung nahe, daß die Säule von Harnstoffpartikeln über der Auslauföffnung einen Druck, ähnlich dem Druck einer Wassersäule, aufbaut der den Massenstrom mit zunehmender Dauer des Auslaufes zurückgehen läßt. Dieser Effekt gewinnt mit zunehmender Förderrate und damit gekürzter Auslaufzeit an Gewicht.

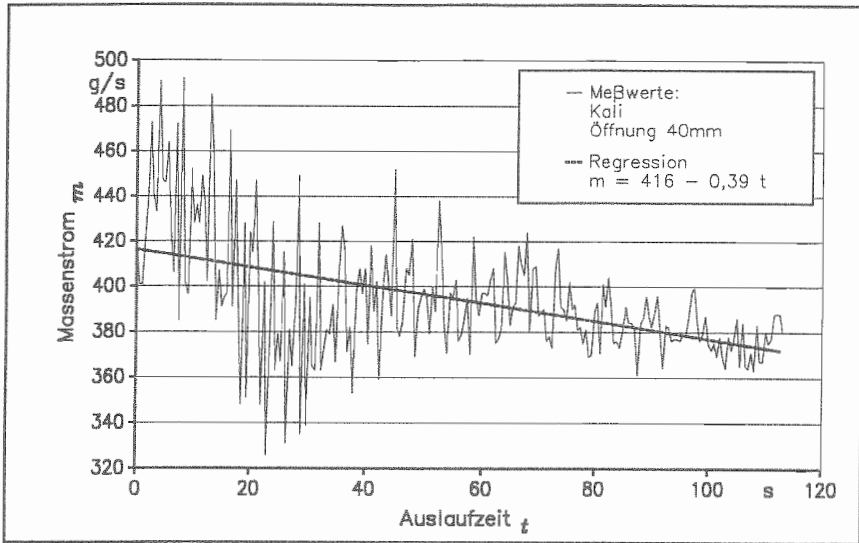
In der gleichen Reihenfolge wurden die Auslaufversuche mit Kali durchgeführt. Bei einer Auslauföffnung von 20 mm geht der Massenstrom in etwa 900 Sekunden von 50 g/s auf 38 g/s um etwa 25 % zurück (Abb. 28).



**Abbildung 28:** Schrägbodenauslaufversuch mit Kali bei 20 mm Öffnung.

Bei den Auslaufzeitpunkten  $t = 80, 250, 280$  und  $690$  Sekunden geht der Massenstrom für einen Moment gegen Null. Es kam zu kurzzeitigen Brückenbildungen während des Nachfließens. Das ist auf die rauhen Oberflächen und die kantigen Formen des Kompaktates zurückzuführen.

Wird die Öffnung auf 30 mm vergrößert, ist der Effekt der Brückenbildung kaum noch erkennbar. In 260 Sekunden nimmt der Massenstrom von durchschnittlich ca. 175 auf 150 g/s ab. Eine weitere Vergrößerung der Auslauföffnung auf 40 mm verkürzt die Auslaufzeit des Kali Kompaktates auf unter 120 Sekunden. Der Massenstrom geht von anfangs ca. 420 g/s auf 370 g/s zurück. Das entspricht einer Massenstromänderung von mehr als 12 % innerhalb dieses Zeitraumes (Abb. 29).

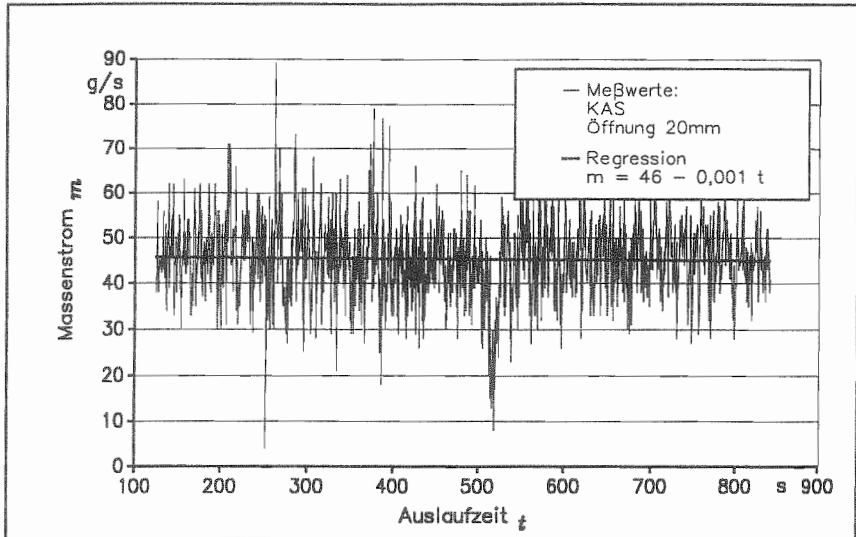


**Abbildung 29:** Schrägbodenauslaufversuch mit Kali bei 40 mm Öffnung.

Die Erhöhung der Förderrate war besonders bei Kali von einem deutlichen Anstieg des Regressionskoeffizienten gekennzeichnet. Eine Vergrößerung der Auslauföffnung hatte demnach auch eine Zunahme der Massenstromänderung je Zeiteinheit zu Folge.

Völlig anders verhält sich dagegen der Massenstrom beim Auslauf von Kalkammonsalpeter. Eine Entmischung im Schüttkegel nach Korngrößen konnte visuell zweifelsfrei festgestellt werden. Wie erwartet, lagerten sich die kleineren Partikel im Kern, die größeren im Mantel des Kegels ab. Dennoch wirkte sich diese Entmischung kaum auf den Massenstrom aus. Dieser blieb über die gesamte Auslaufzeit von 850 Sekunden nahezu konstant. Die Störung im Auslaufintervall zwischen  $t = 500$  und  $550$  Sekunden bewirkte ebenfalls nur einen kurzfristigen Rückgang des Massenstromes. Sie ist vermutlich auf eine Brückenbildung oder eine Verklumpung einiger Körner zurückzuführen, die den Auslauf kurzzeitig behinderte (Abb. 30).

Durch eine Vergrößerung der Auslauföffnung auf 30 mm Durchmesser trat ebenfalls keine relevante Änderung des Massenstromes auf. In den 300 Sekunden Auslaufzeit



**Abbildung 30:** Schrägbodenauslaufversuch mit Kalkammonsalpeter bei 20 mm Öffnung.

ging der Massenstrom nur unwesentlich von ca. 162 auf 158 g/s um ca. 2 % zurück. Diese Änderung des Massenstromes hätte unter praktischen Verhältnissen toleriert werden können (Abb. 31).

Die durchschnittliche Änderung des Massenstromes bei einer Öffnung von 40 mm Durchmesser lag bei 1% und erscheint zunächst gering. Jedoch ist sie in Relation zu der sehr kurzen Auslaufzeit von knapp mehr als 100 s zu sehen, die durch die hohe Förderrate zustande kommt

Aussagekräftiger ist am Beispiel des Kalkammonsalpeter wiederum der Vergleich der Regressionskoeffizienten, der eindeutig einen Anstieg der Massenstromänderung mit Zunahme der Förderrate bestätigt. Allerdings fällt dieser Anstieg im Vergleich zum Kali wesentlich geringer aus (Abb. 32).



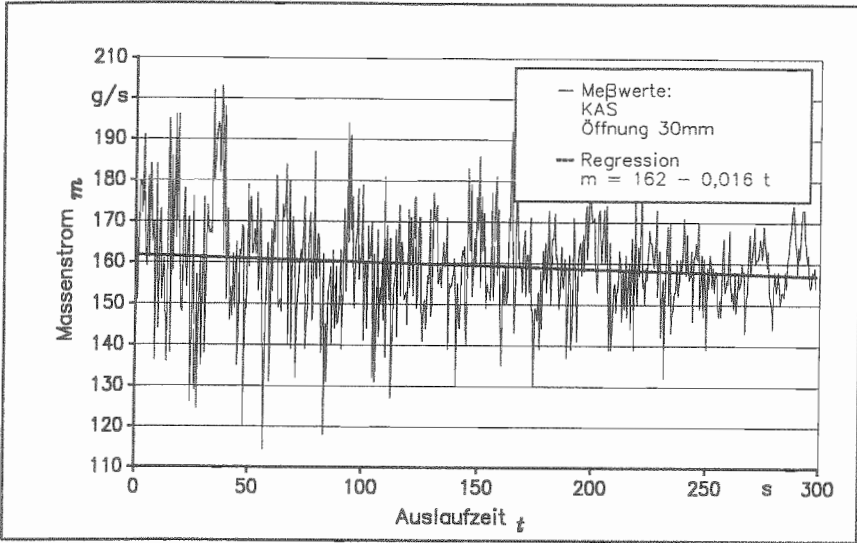


Abbildung 31: Schrägbodenauslaufversuch mit Kalkammonsalpeter bei 30 mm Öffnung.

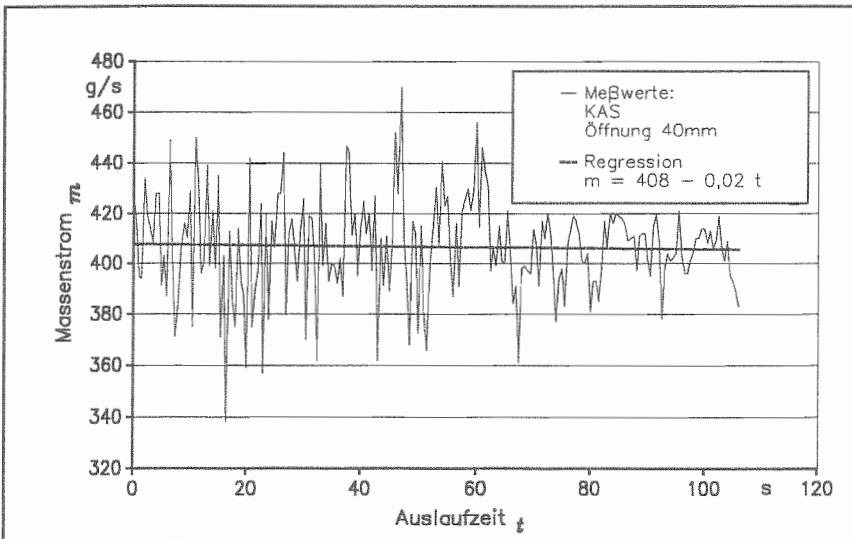


Abbildung 32: Schrägbodenauslaufversuch mit Kalkammonsalpeter bei 40 mm Öffnung.

Offensichtlich liegt bei Kalkammonsalpeter eine Verteilung von Korngrößen, gepaart mit Fließeigenschaften vor, die auch nach der Entmischung im Schüttkegel einen geringeren Einfluß auf die Kalibrierung ausübt. Fehler in der Dosierung sind aufgrund dieses Ergebnisses nicht bei den Vorratsbehältern zu suchen.

Die gesamte Versuchsreihe wurde anschließend bei erhöhtem Feuchtegrad des Rohmaterials und letztlich bei erhöhter Lagerungsdichte wiederholt. Die Verdichtung wurde mit einem Flaschenrüttler vorgenommen. Diese Maßnahmen führten jedoch zu keinen wesentlichen Abweichungen der Ergebnisse und nicht zu weiteren Erkenntnissen.

Als **Fazit** dieser Versuche kann festgehalten werden:

- Die zentrale Befüllung eines Düngerbehälters führt ohne geeignete Gegenmaßnahmen, beispielsweise dem Einbau von Trennblechen, zur Entmischung nach Korngrößen.
- Diese Entmischung nach Korngrößen kann auch bei Einzelnährstoffen eine Veränderung des Massenstromes zur Folge haben.
- Veränderungen des Massenstromes sind abhängig vom Rohmaterial, von seinem Entmischungsgrad und von der Förderrate (Auslauföffnung).
- Die Vielzahl der Einflußgrößen und ihre Abhängigkeit untereinander machen den Massenstrom unter diesen Voraussetzungen schwer kalkulierbar.
- Eine exakte und gleichmäßige Dosierung über einen längeren Zeitraum ist folglich nicht möglich.

Aus diesen Gründen sind geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen, die eine Entmischung nach Korngrößen, vor allem bei Einzelnährstoffkomponenten mit differierenden Korngrößen, im Schüttkegel verhindern um einen gleichmäßigen Auslauf der Rohmaterialien zu sichern. In diesem Zusammenhang sind zu nennen,

- Auswahl geeigneter Vorratsbehälterformen,
- Einbau von Trennblechen zur Verhinderung der Entmischung beim Befüllen der Behälter,
- geschickte Lenkung des Gutstromes beim Befüllen zur Vermeidung der Schüttkegelbildung,
- Verwendung von Austragshilfen zur Vermeidung von Brückenbildungen,
- konsequente Einhaltung definierter Füllstände zur Kalibrierung und zu Versuchsbeginn und
- die Ausnutzung aller sonstiger Effekte, die das Dosierorgan gleichmäßig mit dem Dosiergut versorgen.

Die Untersuchungen zeigten, daß durch diese Maßnahmen eine gleichmäßige und kontinuierliche Beschickung der Dosierorgane und folglich gute Voraussetzungen für die Dosierung zu erzielen ist.

#### **4.2.2 Auswahl und technischer Aufbau eines geeigneten Dosiersystems zum Einzelnährstoffaustrag**

Prinzipiell wird unter dem Begriff Dosieren die Abgabe von Teilmengen aus einem Vorrat von Schüttgut verstanden. Dieser Austrag kann kontinuierlich oder diskontinuierlich ablaufen. Zur Einbindung in Regelsysteme werden Messungen und Ist-Sollwertvergleiche entweder gravimetrisch oder volumetrisch durchgeführt. Der definierte Einsatzbereich läßt aus der Vielzahl von Dosierverfahren jedoch nur eine begrenzte Auswahl zu. Allein dadurch, daß das Gesamtsystem für den mobilen Feldeinsatz geeignet sein muß, scheidet alle gravimetrischen Dosierverfahren aus. Eine dynamische Gewichtserfassung ist derzeit noch zu ungenau und würde den Dosierfehler erhöhen.

Zusätzlich muß das Gesamtsystem nach dem Durchflußprinzip arbeiten und eine gleichmäßige Längs- und Querverteilung sicherstellen. Aus diesem Grund darf die

Dosierung nur kontinuierlich ablaufen. Als zentrale Forderungen an die Dosiersysteme sind darauf aufbauend die

- Einhaltung eines gleichmäßigen Dosierstromes,
- exaktes Einhalten einer definierten Menge,
- geringer Zeitbedarf für Mengenänderungen und die
- Möglichkeit der Einbindung in rechnergestützte Systeme

zu nennen.

In die engere Auswahl kommen nur kontinuierliche und volumetrische Dosiervverfahren, wobei unter volumetrisch nicht "Volumen messend", sondern "Volumen abgrenzend" verstanden wird. Die wichtigsten sind:

- **Verdrängende Verfahren**

Beispiele für verdrängende Verfahren sind Schneckendosierer. Sie führen aber den Mischkomponenten Energie zu und verändern sie dadurch physikalisch. Darüberhinaus ist die Dosierung nicht kontinuierlich, sondern, wie in Kapitel 2.3.1.1 und 2.3.1.2 ausgeführt, bedingt durch das Schneckengewinde lastabhängig periodisch kontinuierlich. Dieses Verfahren wurde deshalb nicht eingesetzt.

- **Stetig Volumen abgrenzende Verfahren**

Darunter fallen alle Dosiergeräte, die Fließschichten ausbilden. Das geschieht durch eine bewegte Behälterwand, beispielsweise einen Flachschieber (Schieberdosierung). Das Schüttgut kann dann entweder gravimetrisch oder durch ein Förderorgan, beispielsweise einem Banddosierer, ausgetragen werden. Diese Art der Dosierung überträgt keine Energie auf das Rohmaterial. Sie kann für die Untersuchungen verwendet werden.

● **Periodisch Volumen abgrenzende Verfahren**

Sie dosieren durch definierte Kammervolumina auf einer rotierenden Achse. Beispiele sind Zellenrad (Zellenraddosierung) und Nockenrad. Auch diese Dosiergeräte schonen das Schüttgut durch geringe Energieübertragung. Durch schraubenförmige, um die Walze angeordnete Kammern oder Zellen, durch sehr kleine Kammervolumina oder durch Aufbringung von Nocken können periodisch Volumen abgrenzende Verfahren einen sehr kontinuierlichen Gutstrom erzielen. Auch sie sind geeignet für die weiteren Untersuchungen.

In der Mineraldüngerausbringung haben sich im mobilen Einsatz zwei Möglichkeiten durchgesetzt die auszubringende Aufwandmenge einzustellen und mit Hilfe der Elektronik zu verändern: Die Schieber- und die Zellenraddosierung.

Die **Schieberdosierung** erfolgt durch einen variablen Fließspalt am Behälterboden. Je nach Öffnung des Schiebers kann mehr oder weniger Dünger ausgebracht werden. Der Schieber muß, um den Prozeß zu automatisieren, von einem Hubspindelmotor betätigt werden. Die Steuerung übernimmt ein mobiler Agrarcomputer, der je nach Bedarf die erforderliche Düngermenge einstellt.

Bei dieser Methode ist keine permanente Kontrolle des Düngerflusses möglich. Die Rückmeldung an den mobilen Agrarcomputer erfolgt entweder durch Gewichtskontrollen oder als Hilfsgröße über die Stellung des Hubspindel motors, der den Schieber betätigt. Allerdings ist darauf zu achten, daß der Hubspindelmotor entweder direkt am Schieber ansetzt, oder durch geeignete Maßnahmen Gelenkspiel oder Verbiegungen der Zwischenhebel ausgeschlossen sind. Andernfalls würde die Positionsrückmeldung des Aktors mit der tatsächlichen Schieberposition nicht übereinstimmen. Eine beträchtliche Abweichung der Dosierung vom Sollwert wäre die Folge.

Bei erschütterungsfreiem Betrieb und im verschleißfreien Zustand arbeitet diese Form der Dosierung mit Abweichungen zwischen 3 und 5 % vom Sollwert. Diese Werte sind für den praktischen Einsatz akzeptabel. Da die elektronisch gesteuerte Schieberdosie-

rung jedoch die erörterten Risiken im Bereich der Schieberbetätigung in sich birgt, kam sie für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit nicht zum Einsatz.

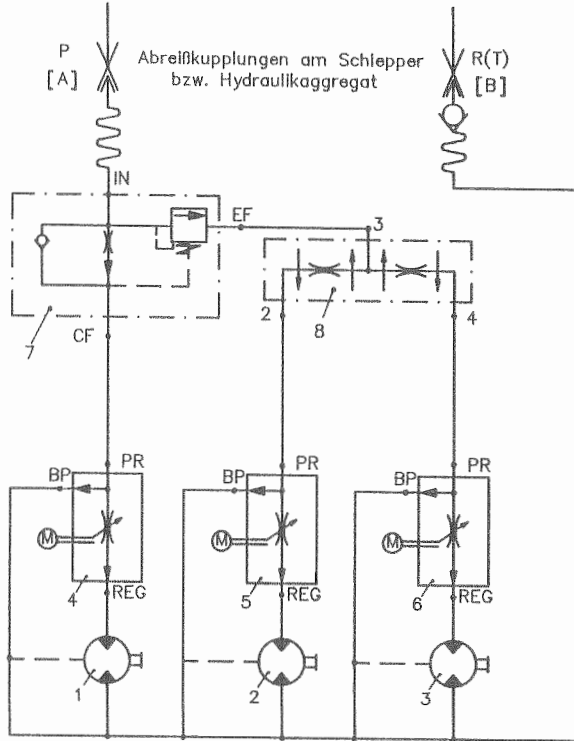
Im Gegensatz dazu gleicht die **Zellenraddosierung** mit ihren Zellen- oder Nockenrädern bzw. Dosierwalzen einer Zwangsvolumendosierung. Derartige Dosierorgane mit Elektromotoren anzutreiben ist nicht möglich, da unter praktischen Verhältnissen eine Lichtmaschinenleistung von maximal 400 W zur Verfügung steht. Besser geeignet ist die Auswahl eines hydrostatischen Antriebes. Bei den heute eingesetzten Traktoren steht an den Hydraulikabreißkupplungen eine hydrostatische Leistung von über 7 kW zur Verfügung.

Der Antrieb der Dosierorgane erfolgt in den Versuchen über Rollenketten durch je einen Hydraulikmotor OMP 200 (Danfoss). Auf jeder Motorwelle sitzt neben dem Antriebskettenrad ein weiteres als Impulsgeber für einen Näherungsinitiator. Damit wird die Drehzahl der Dosierorgane induktiv gemessen. Sie dient dem Prozeßrechner als Regelgröße.

Der Prozeßrechner ermittelt aus den Sensorimpulsen die aktuelle Motordrehzahl. Übersteigt die Differenz zwischen Motor - Istdrehzahl und Motor - Soll Drehzahl eine definierte Toleranz, so wird der Aktor, ein Gleichstrommotor zur Querschnittsänderung eines Drei-Wege-Stromregelventiles betätigt. Durch eine so induzierte Veränderung der Durchflußmenge  $Q_M$  (l/min) wird die Drehzahl der Hydraulikmotoren gesteuert. Durch diese Maßnahme ist die Zellenraddosierung in automatische Prozesse leicht einzugliedern. Um alle drei Stromregelventile gleichmäßig mit Hydrauliköl zu versorgen, wurde ein Prioritätsstromregler und ein Mengenteiler in der Druckleitung vorgeschaltet (Abb. 33).

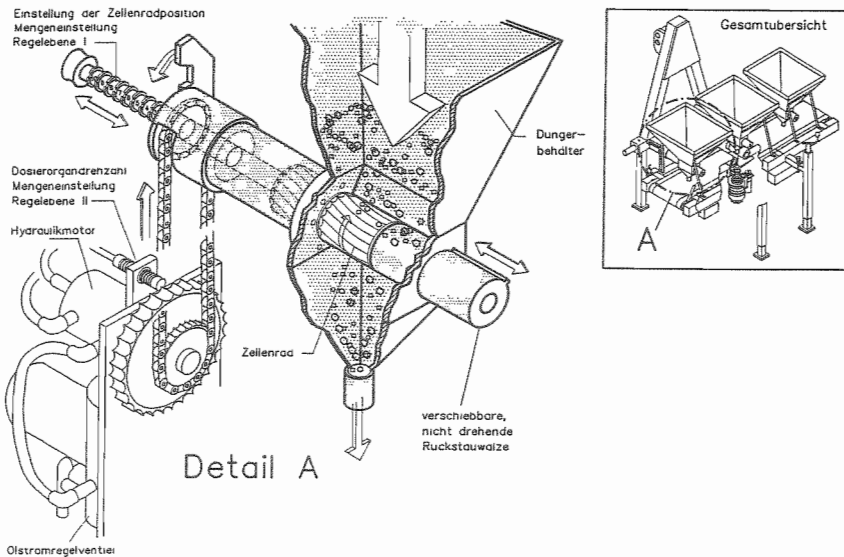
Durch definierte Kammervolumina und durch die Drehzahl des Dosierorganes ist die Ausbringungsmenge bestimmt. Die Regelkurve ist dabei eine Gerade. Einer Erhöhung der Dosierorgandrehzahl um den Faktor 2 entspricht normalerweise eine Verdoppelung der Austragsmenge. Diese Art der Dosierung nimmt aber je nach Grad der Mengen-

Abbildung 33: Hydraulischer Antrieb der drei Dosierorgane.



Stückliste für Hydraulikschaltplan Mehrkammerdüngestruer			
Pos.	Stck.	Bezeichnung	Bemerkung
1	1	Hydraulikmotor Danfoss OMP 200 max. Rücklaufdruck 50 bar, wenn Leckleistung in Rücklauf geführt wird	$V_S = 194,6 \text{ cm}^3$ $n_{\text{max}} = 310 \text{ 1/min}$ $P_{\text{max}} = 100 \text{ bar}$ $Q_{\text{max}} = 60 \text{ l/min}$ $M_{\text{max}} = 240 \text{ Nm}$
2	1	wie Pos. 1	wie Pos. 1
3	1	wie Pos. 1	wie Pos. 1
4	1	Dreiwege-Stromregelventil mit Stellmotor Bosch Typ HY/VHRM4	$Q_{\text{max}} = 120 \text{ l/min}$ $Q_{\text{Reg}} = 1...47 \text{ l/min}$ $P_{\text{max}} = 210 \text{ bar}$ $U = 12...24 \text{ V}$
5	1	wie Pos. 4	wie Pos. 4
6	1	wie Pos. 4	wie Pos. 4
7	1	Prioritätsstromregler SUN YFCP-LAN-AJ	$Q_{\text{max}} = 60 \text{ L/min}$ $Q_A = 0...25 \text{ l/min}$ $P_{\text{max}} = 200 \text{ bar}$
8	1	Mengenteiler SUN FSCS-XAN-MMV	Teilungsverhältnis 1:1 $P_{\text{max}} = 200 \text{ bar}$

änderung fünf bis zehn Sekunden in Anspruch. Das entspricht bei einer Geschwindigkeit von circa 8 km/h Fahrstrecken von bis zu 25 Metern. Für die intensive und teilflächenspezifische Düngerausbringung sind kürzere Regelzeiten vorteilhaft. Eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit wird dadurch erreicht, daß die Menge nicht nur über eine Änderung der Dosierorgandrehzahl, sondern zusätzlich auch durch eine Änderung des Kammervolumens eingestellt wird (Abb. 34).

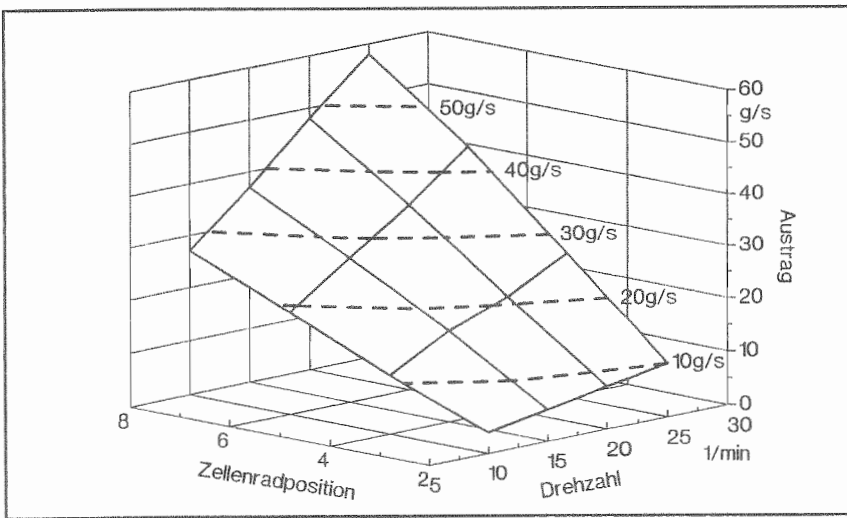


**Abbildung 34:** Ausgewähltes Dosierorgan für rasche Mengenänderung (SYSTEM NODET).

Die Kammervolumina werden durch eine Verschiebung der Zellenradachse im Schüttgut verringert oder erhöht. Daher wird dieses Verfahren auch als Schubraddosierung bezeichnet. Wird das Kammervolumen reduziert, tritt an die Stelle des Zellenrades ein Zylinder, der das Schüttgut zurückstaut. Die Regelgröße ist dabei die Position (Einschub) des Zellenrades. Die Zellenradposition "2" entspricht geringer, die Position "6" mittlerer und die Position "10" hoher Dosierung. Alle Zwischenstufen sind in Einerschritten möglich.



Drehzahl und Zellenradposition sind unabhängig voneinander einstellbar. Im Gegensatz zu herkömmlichen Dosierorganen entspricht das Ergebnis der Kalibrierung nicht mehr einer Geraden im zweidimensionalen Koordinatensystem, in dem die ausgetragene Menge über der Drehzahl aufgetragen ist. Sie wird vielmehr durch eine Fläche im dreidimensionalen Koordinatensystem, indem der Austrag über der Drehzahl und der Zellenradposition aufgetragen ist, ersetzt (Abb. 35).



**Abbildung 35:** Kalibrierung des Dosierorganes mit 40er Kali.

Der Prozeßrechner ist damit in der Lage, die Sollmenge durch Drehzahl-, Positionsänderung oder beides in seiner für das Ergebnis günstigsten und schnellsten Kombination einzustellen. Die Dosierung orientiert sich entweder an einer Führungskomponente (master), wobei die anderen Komponenten (slaves) darauf abgestimmt werden oder im freien Zugriff auf die Dosierstationen (wild flow). Diese Vorgehensweise bringt die notwendige Zeitersparnis.

#### **4.2.2.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit beim Einsatz ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten**

Überprüfungen der Dosierorgandrehzahlen ergaben Abweichungen unter 1 % vom Sollwert. Die Regelung erfolgt demnach mit hoher Genauigkeit. Die Dosiergenauigkeit hängt aber bei der Zellenraddosierung auch davon ab, daß Entmischungen durch Verlade- und Befüllvorgänge des Behälters vermieden werden, also ein ungehinderter und gleichmäßiger Gutstrom zum Dosierorgan gegeben ist. Bei den weiteren Versuchen wurde dieser Punkt stets berücksichtigt, die in Kapitel 4.2.1.2 diskutierten Gegenmaßnahmen umgesetzt und beispielsweise eine punktuelle Befüllung der Düngerbehälter vermieden.

So leisteten die Erkenntnisse aus den Auslaufversuchen einen wichtigen Beitrag zur Dosiergüte und schufen die Voraussetzungen für die gleichmäßige Beschickung des internen Fördersystems. Zusätzlich wurde darauf Wert gelegt, daß der Füllgrad der Behälter bestimmte Ober- und Untergrenzen nicht überschritt.

Die Genauigkeit, mit der dosiert wird, ist letztendlich in Abhängigkeit vom verwendeten Dünger, seinen physikalischen Eigenschaften, der Dosierorgandrehzahl und der Zellenrad- oder Schubradposition (Förderrate) zu sehen. Um Informationen über die Dosiergenauigkeit der drei Dosierorgane unter Verwendung der ausgewählten Düngerformen zu erhalten, wurde ein weiterer Versuch durchgeführt.

Zur Überprüfung der Genauigkeit einer kontinuierlichen Dosierung werden in der Verfahrenstechnik Lang-, Kurz- und Momentangenaugkeit gemessen [36, 40]. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Länge der Meßintervalle. Die strengsten Maßstäbe werden durch die Momentangenaugkeit angelegt. Das Meßintervall beträgt dabei 1/10 bis 10 s. Mit Hinblick auf die folgenden Versuche, in denen kleine Proben chemisch analysiert werden sollen, erwies sich ein Meßintervall von 6 s als optimal, um auch hier die Streuung um den Mittelwert möglichst exakt ermitteln zu können. Für den Meßzeitraum galt, daß bei jeder Versuchseinstellung die Mindestanforderungen

bezüglich des Probengewichtes für die chemische Analytik gewährleistet sein mußten. Zur Ermittlung der Momentangenaugkeit wurden die Messungen je Einstellung 20 mal wiederholt.

Da die Momentangenaugkeit des Dosierorganes ein Maß nicht nur für die Dosierung selbst, sondern auch für alle schon davorliegenden Einflüsse ist, kann aufgrund ihrer Ergebnisse ein direkter Rückschluß auf die Gleichmäßigkeit der Beschickung des Mischorganes gezogen werden. Ferner ist durch die hohe Zahl der Wiederholungen in einer Einstellungsvariante der Einfluß des Behälterfüllgrades und des Düngers ausreichend repräsentiert. Als Streuungsmaß wird zunächst die empirische Standardabweichung  $s$  verwendet [36].

Die einzelnen Varianten, deren Mittelwerte je nach Einstellung voneinander abweichen können, sollen hinsichtlich ihres Streuungsmaßes verglichen werden. Darum wird die relative Standardabweichung oder der Variationskoeffizient errechnet. Der Variationskoeffizient eignet sich für diese Versuche als Maß für die Dosiergenaugkeit, weil er als relative Größe den Vergleich unterschiedlicher Absolutwerte ermöglicht.

Die Forderung nach der Dosiergenaugkeit muß unter Berücksichtigung der Meßbarkeit formuliert werden. Ein Meßzeitfehler von 0,2 s entspricht bereits einer Abweichung vom Sollwert von 3 %. Dazu kommen systematische, produktbedingte und umgebungsbedingte Einflüsse. Für die Dosiergenaugkeit von Mineraldünger kann ein Variationskoeffizient von unter 5 % unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten als sehr gutes Ergebnis angesehen werden. Dies entspricht dem Schwellenwert, wie er bei den DLG-Prüfstandsversuchen zur Beurteilung der Längs- und Querverteilung von Düngerstreuern zur Anwendung kommt.

Während die Dosiergenaugkeit in der Verfahrenstechnik häufig im oberen Leistungsbereich gemessen wird, sollte im vorliegenden Fall der gesamte, für die weiteren Versuche relevante Regelbereich ausreichend repräsentiert sein. Für die Dosierorganendrehzahl wurden die Werte 10 1/min und 25 1/min ausgewählt. Sie grenzen den

Einsatzbereich zuverlässig ein. Für die Position des Zellenrades, als ein Maß für das Kammervolumen, wurden die Skalenwerte 2, 6 und 10 für geringe, mittlere und hohe Dosierung eingestellt.

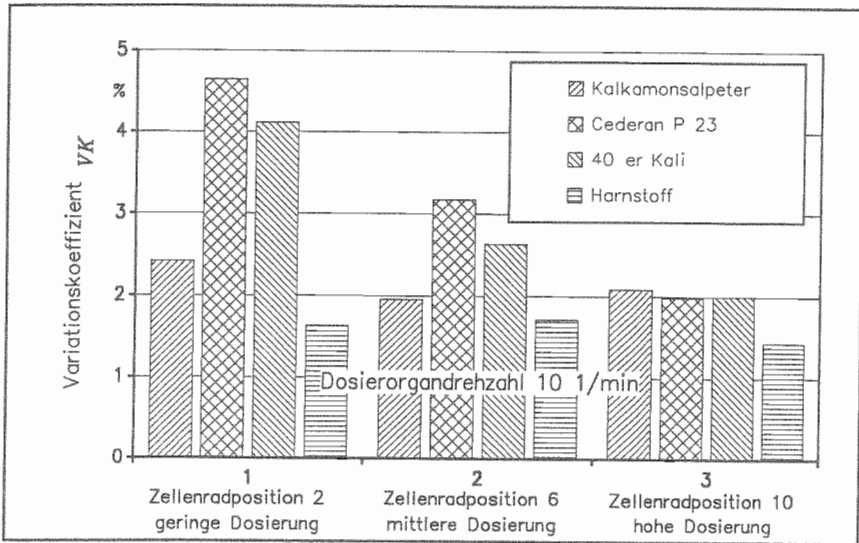
Die Versuche zur Dosierung wurde mit den Düngerformen Granulat (rauer und glatter Oberfläche), Kompaktat und Prill durchgeführt. Die Auswahl beschränkte sich dabei auf die in den folgenden Versuchen eingesetzten Einzelnährstoffdünger. Es ergeben sich 24 Versuchsvarianten (4 Dünger x 3 Zellenradpositionen x 2 Dosierorgandrehzahlen), aus denen jeweils 20 Stichproben gezogen wurden.

#### **4.2.2.2 Ergebnisse der Dosierorganüberprüfung**

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Dosiergenauigkeit sind in Abhängigkeit von der Dosierorgandrehzahl, dem Kammervolumen, und den verwendeten Düngerformen in den beiden folgenden Grafiken (36, 37) dargestellt. Über der Position des Zellenrades ist das Streuungsmaß, die relative Standardabweichung oder auch Variationskoeffizient aufgetragen. Durch die Aufgliederung der Darstellung nach den beiden Dosierorgandrehzahlen erfolgt eine Gruppierung des Austrages nach Gewicht. Bei einer Drehzahl von 10 1/min liefert der gleichmäßig feinkörnige Harnstoff Prill über alle drei Zellenradpositionen das beste Ergebnis (Abb. 36).

Der Variationskoeffizient liegt stets unter 2 %. Ebenso gut ist Kalkammonsalpeter dosierbar. Auch bei kleinen Kammervolumen überschreitet der Variationskoeffizient 2,5 % nicht.

Das Granulat Cederan P 23 unterscheidet sich von Kalkammonsalpeter physikalisch im wesentlichen nur durch seine rauhe Oberfläche. Während bei großen Kammervolumen kein Unterschied im Streuungsmaß festgestellt werden kann, steigt der Variationskoeffizient im Vergleich zum Kalkammonsalpeter auf fast 5 %, wenn das Kammervolumen minimiert wird (Zellenradposition 2). Ähnlich verhält es sich mit dem Kali



**Abbildung 36:** Prüfung der Dosiergenauigkeit (Drehzahl 10 1/min).

Kompaktat. Die sperrigen bruchstückartigen Partikel mit ebenfalls rauher Oberfläche verhindern eine vollständige Befüllung der Dosierkammern im marginalen Bereich (Zellenradposition 2) und verursachen den Anstieg des Variationskoeffizienten auf über 4 %.

Die Änderung der Dosierorgandrehzahl von 10 1/min auf 25 1/min bewirkt bei den Zellenradpositionen 2 und 6 für geringe und mittlere Kammervolumen und den Düngern Kali und Cederan einen Rückgang des Variationskoeffizienten. In beiden Fällen lag der Variationskoeffizient nur noch wenig über 3 %. Ab der Zellenradposition 6 und größer werden alle Dünger mit einem Variationskoeffizienten von 1 bis 2 % dosiert. Lediglich das Cederan P 23 Granulat liegt im mittleren Dosierbereich (Zellenradposition 6) bei 3 % (Abb. 37).

Die beiden N-haltigen Einzelnährstoffdünger Kalkamonsalpeter und Harnstoff werden auch bei höherer Drehzahl, ungeachtet der Zellenradposition, mit einem Variations-

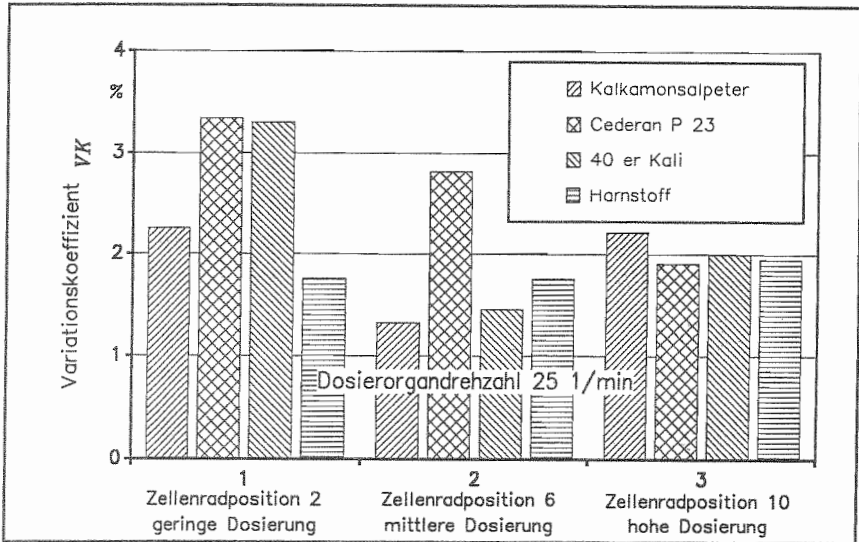


Abbildung 37: Prüfung der Dosiergenauigkeit (Drehzahl 25 1/min).

koeffizienten von ca. 2 % dosiert. Das entspricht einer gleichbleibenden Dosierung über den gesamten Regelbereich mit sehr hoher Genauigkeit. Allerdings dürfen diese Ergebnisse nicht darüber hinwegtäuschen, daß der Variationskoeffizient ein relativierendes Streuungsmaß darstellt. Trotz seines Rückganges wird bei einer Verdoppelung der Dosiermenge der absolute Fehler in der Regel ansteigen. Der Variationskoeffizient hat sich aber in der Beurteilung von Düngerverteiltechnik durchgesetzt und soll deshalb auch bei diesen Versuchen zur Anwendung kommen.

Abschließend kann festgehalten werden, daß durch die Auswahl dieser Dosierorgane die besten Voraussetzungen für eine reaktionsschnelle und dennoch exakte Dosierung erreicht werden konnten. Alle Varianten liegen innerhalb der zulässigen Grenzen. Es bestehen aber Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten hinsichtlich der Dosiergenauigkeit.

Prill und glatte Granulate werden mit der geringsten Streuung dosiert. Kompaktate und rauhe Granulate weisen eindeutig höhere Streuungsmaße auf. Dies wird umso deutlicher, je geringer das Kammervolumen des Dosierorganes ist. Dieser Effekt ist bei geringer Dosierorgandrehzahl deutlicher erkennbar, als bei höherer. Für den weiteren Verlauf der Untersuchungen bedeutet dies, daß Einstellungen von Nährstoffkonzentrationen, in denen Kali oder Cederan P 23 mit geringstmöglichem Austrag dosiert werden, ein höheres Streuungsmaß liefern, als dies bei den übrigen Varianten der Fall ist.

#### **4.2.3 Auswahl und technischer Aufbau eines internen Fördersystems**

Nachdem eine gleichmäßige Dosierung sichergestellt ist, muß als weitere Komponente im Materialstrom die interne Förderung beurteilt werden. Sie hat den Zweck, die ausgetragenen Einzelnährstoffkomponenten zum Misch- und Zuteilorgan zu fördern. Dieser Prozeß muß folgende Anforderungen erfüllen:

- Geringe Gleichlaufschwankungen zur Konstanzhaltung des Dosierstromes.
- Geringe Verweildauer der Einzelnährstoffkomponente im internen Fördersystem, d.h. hohe Transportgeschwindigkeit.
- Keine Energieübertragung auf das Rohmaterial (Bruchkornanteil).
- Rasche und vollständige Selbstreinigung.
- Geringe Bauhöhe.

Für die Förderung von rieselfähigen Feststoffen eignen sich pneumatische und mechanische Fördereinheiten mit Energieübertragung auf das Fördergut (z.B. Gebläseförderer, Schnecken- oder Kettenförderer etc.) und mechanische ohne Energieübertragung (z.B. Fallrohre und Bandförderer). Da Fördereinrichtungen mit Energieübertragung auf die Einzelnährstoffkomponenten den Bruchkornanteil und den Abrieb erhöhen, wurden sie nicht in Betracht gezogen.

Von den mechanischen Fördereinrichtungen ohne Energieübertragung scheidet die Fallrohre ebenfalls aus. Der Einbau der Fallrohre würde durch die Einhaltung eines Neigungswinkels von mindestens 45°, um eine gleichmäßige Förderung zu gewährleisten, die Bauhöhe der übrigen Baugruppen verringern und das Transportvolumen sowie die Anzahl der möglichen Einzelnährstoffkomponenten begrenzen.

Eine praktikable Lösung wurde mit Querförderbänder erreicht. Sie erzielen hohe Fördergeschwindigkeiten und verursachen keinerlei Schäden am Transportgut. Sie reinigen sich selbst, sind lauffähig und haben eine geringe Bauhöhe. Damit kann der größte Teil des Forderungskataloges erfüllt werden.

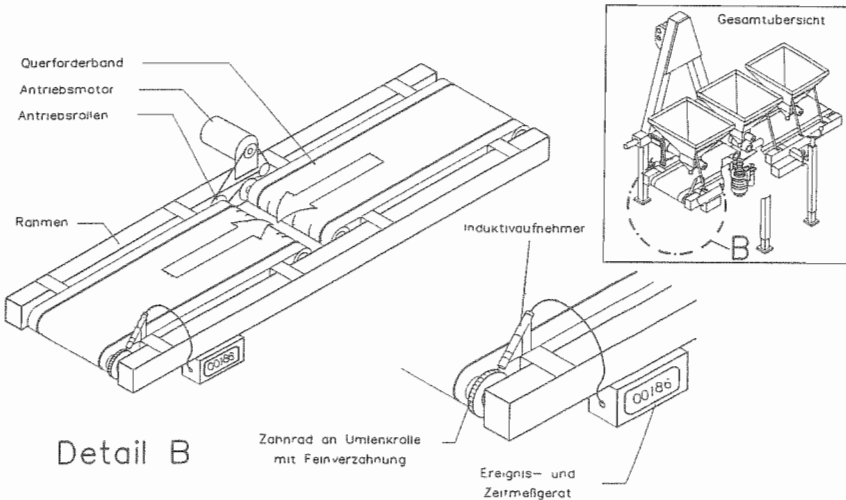
Ein kritischer Punkt war im Gleichlauf der Förderbänder zu sehen. Selbst bei gleichmäßiger und kontinuierlicher Dosierung hätten Gleichlaufschwankungen des Fördersystems eine ungleichmäßige Beschickung des Mischorgans zur Folge. Das hätte ungünstige Auswirkungen auf die Streuungsmaße der Mischgüte. Deshalb werden nachfolgend die durchgeführten Versuche zur Überprüfung der Gleichlaufschwankungen bei Förderbändern dargelegt.

#### **4.2.3.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Gleichlaufschwankungen des ausgewählten Fördersystems**

Für den Transport der Einzelnährstoffkomponenten zum zentral angeordneten Misch- und Zuteilorgan sind zwei Förderbänder notwendig. Die beiden Querförderbänder werden von einem Elektromotor angetrieben. Die Messungen wurden an einer nicht angetriebenen bikonischen Umlenkrolle durchgeführt, um den Einfluß des Schlupfes zu eliminieren. Dazu wurde seitlich an der Rolle ein Ring mit Feinverzahnung und darüber ein induktiver Sensor zur Ereigniszählung montiert (Abb. 38).

Die Ereigniszählung wurde in drei verschiedenen Zeitintervallen (0,1, 1 und 10 Sekunden) durchgeführt. Die Totzeit zwischen den Zeitintervallen wurde auf 0,1





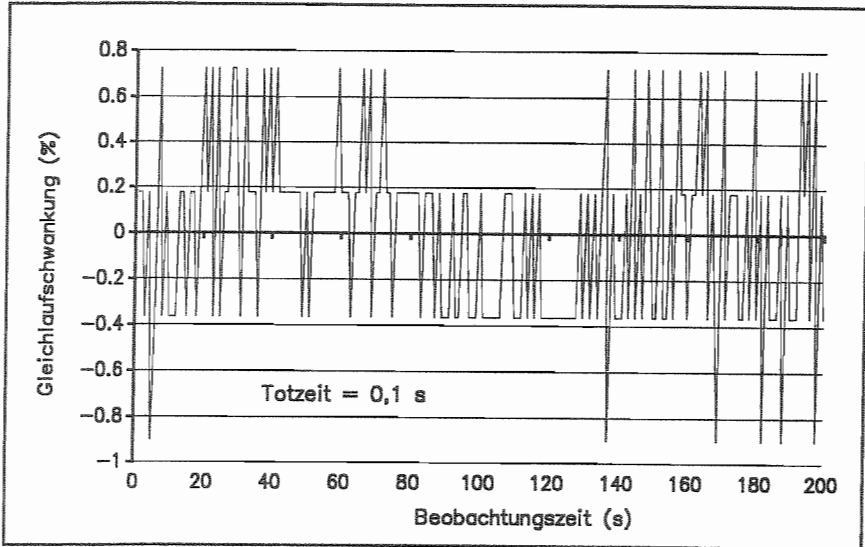
**Abbildung 38:** Aufbau des internen Förderorganes mit induktiver Meßeinrichtung.

Sekunden eingestellt. Den Zeitintervallen entsprechen definierte Längenabschnitte auf den Förderbändern und damit eine definierte Anzahl an gezählten Ereignissen.

Treten keinerlei Gleichlaufschwankungen auf, so ist die Anzahl der gezählten Ereignisse je Zeitintervall stets konstant. Werden diese Beobachtungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt, ist sichergestellt, daß auch alle kritischen Bandlaufphasen, die den Gleichlauf behindern, hinreichend repräsentiert sind, und als Abweichungen vom Mittelwert erkannt werden

#### 4.2.3.2 Ergebnisse der Prüfung von Gleichlaufschwankungen

Über den gesamten Beobachtungszeitraum lagen die Gleichlaufschwankungen unter  $\pm 1\%$ . Die Meßwerte liegen bevorzugt auf definierten Stufen. Das hängt damit zusammen, daß die Ereigniszählung nur ganzzahlige Ergebnisse zuläßt (Abb. 39).



**Abbildung 39:** Gleichlaufschwankungen des internen Förderorganes (Meßintervall 1 s, Totzeit 0,1 s, Beobachtungszeit 200 s aus 800 s).

Diese Ergebnisse konnten bei geringem Zeitbedarf erzielt werden. Die Verweildauer des Dosiergutes auf den Förderbändern betrug kaum 0,5 s und könnte durchaus noch weiter reduziert werden.

Für die weiteren Versuche gilt, daß durch die geringen Gleichlaufschwankungen keine nachteiligen Folgen für den Dosierstrom und die Mischgüte zu befürchten sind. Es konnten keine physikalischen Veränderungen am Rohmaterial oder Abrieb auf den Bändern festgestellt werden. Die Wahl dieser Art der Förderung gewährleistet eine gleichmäßige und rasche Versorgung des Misch- und Zuteilorganes mit den Einzelnährstoffkomponenten.

#### **4.2.4 Auswahl und technischer Aufbau eines Misch- und Zuteilsystems zur Verteilung auf die Teilbreiten**

Das zentrale Bauteil des Gesamtsystems ist das Misch- und Zuteilorgan für den mobilen Einsatz. Seine wichtigsten Aufgaben sind:

- das Erreichen einer hohen Mischgüte zur Einhaltung der gesetzlich zulässigen Toleranzen für Mehrnährstoffdünger,
- die sichere und gleichrangige Zuteilung der Mischung auf die einzelnen Teilbreiten des Verteilorgans,
- die Unempfindlichkeit bei schwierigen Einsatzbedingungen, beispielsweise in Hanglagen und
- die kontinuierliche Arbeitsweise (Durchlaufprinzip).

Für die weitere Ausbringung des Gemisches und zur Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Querverteilung ist es zusätzlich notwendig,

- daß der Mischer unempfindlich gegen die verschiedenen physikalischen Eigenschaften der Einzelnährstoffkomponenten ist und sich dadurch seine Mischgüte nicht verändert und
- daß er selbst diese physikalischen Eigenschaften nicht nachteilig durch Energiezufuhr während des Mischprozesses verändern kann. Denn Vermahlung der Rohmaterialien und ein Anstieg des Bruchkornanteiles verändern die Wurfeigenschaften und erhöhen die Gefahr der Abtrift während der Applikation.

Da dieses Mischorgan in einen rechnergestützten Prozeß eingebunden werden muß, sind weitere wesentliche Anforderungen zu erfüllen:

- Die Mischung und gleichmäßige Zuteilung muß im Durchfluß und kontinuierlich erfolgen können.
- Der Zeitbedarf für Mischung und Zuteilung muß so gering wie möglich gehalten werden und darf unabhängig von der Durchsatzleistung oder den physikalischen Eigenschaften der Mischung nur in engen Grenzen schwanken.
- Die Auslauf- beziehungsweise Reinigungszeit darf diese Grenzen ebenfalls nicht überschreiten.
- Das Mischen darf nur in radialer und nicht in axialer Richtung erfolgen. Zusammen mit einer zuverlässigen und raschen Selbstreinigung können dadurch auch scharf definierte Grenzen zwischen den unterschiedlichen Nährstoffverhältnissen eingehalten werden.

Dieser umfangreiche Anforderungskatalog grenzt alle bisher in der Verfahrenstechnik bekannten Mischsysteme aus. Sie alle sind nicht in der Lage, sämtliche Anforderungen zu erfüllen. Das Problem "Mischen" bedarf also für diesen Einsatzzweck einer neuen Definition. In der klassischen Verfahrenstechnik (Kapitel 2.3.1.2) ist die ideale Mischung durch eine bestmögliche Homogenität der Komponenten definiert. Im Falle der Düngermischung bedeutet dies, daß darunter auch eine möglichst gleichmäßige Verteilung der einzelnen Komponenten, die der Sollwertvorgabe entspricht, verstanden werden kann.

Mischen bedeutet demnach gleichmäßiges Verteilen von Komponenten auf verschiedene, auch kleinste Teilmengen. Deren Anteile an Komponenten sind im Falle der idealen Mischung identisch. In der Praxis werden sie jedoch um einen Soll- oder Mittelwert streuen. Diese Streuung der Probenkonzentration ist ein Maß für die Mischgüte. Da es für die Güte der Mischung nicht maßgeblich ist, ob die Konzentration der Probe nach oben oder nach unten abweicht, wird als Maß für die Mischgüte die mittlere quadratische Abweichung herangezogen (Varianz).

Durch diese Definition gelingt, es die Funktionen Mischen und Zuteilen in Einklang zu bringen. Beide sind durch eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten realisierbar.

Aufbauend auf diese Erkenntnis wird der Ansatz für ein neuartiges Mischprinzip ermöglicht.

Gleichmäßige Verteilung wird aber in der Verfahrenstechnik auch in anderen Bereichen erfolgreich eingesetzt. Beispiele dafür sind die Probenteilung im Laborwesen oder die Saatgutverteilung im Feldversuchswesen (Rotoseed Fa. Hege).

Aus diesem Bereich wurden wesentliche Komponenten für den Durchlaufmischer übernommen. Der Durchlaufmischer besteht in der ersten Phase aus einem Rotationsverteiler und darunterliegenden Verteilkammern, deren Auslaufrohre in die Teilbreiten des Düngerverteilerorgans, zum Beispiel eines pneumatischen Auslegerstreuers, münden sollen.

Unter den Querförderbändern, die die Einzelnährstoffkomponenten an zentraler Stelle sammeln und an einen Trichter übergeben, befindet sich der **Rotationskopf** oder **Rotationsverteiler**. Er besteht aus einem Zulauftrichter mit einer darunter stehenden und fixierten Einlaufbuchse. Sie schirmt die fallenden Düngerpartikel gegen einen rotierenden Hohlzylinder, dem Rotationskörper, der sie umgibt und permanent rotiert, ab. Der Rotationskörper ist im Gehäuse des Rotationsverteilers vierfach gelagert und wird durch einen Elektromotor angetrieben. Er rotiert um seine vertikale Achse (Abb.40).

Der Durchfluß wird durch die **Rotorscheibe** von der axialen in die radiale Richtung umgelenkt. Durch **Prallkörper**, fest auf der Rotorscheibe montierte Stege, wird der radiale Gutstrom so eingefaßt, daß er nur in definierten Bereichen die Scheibe verlassen kann (Abb. 41).

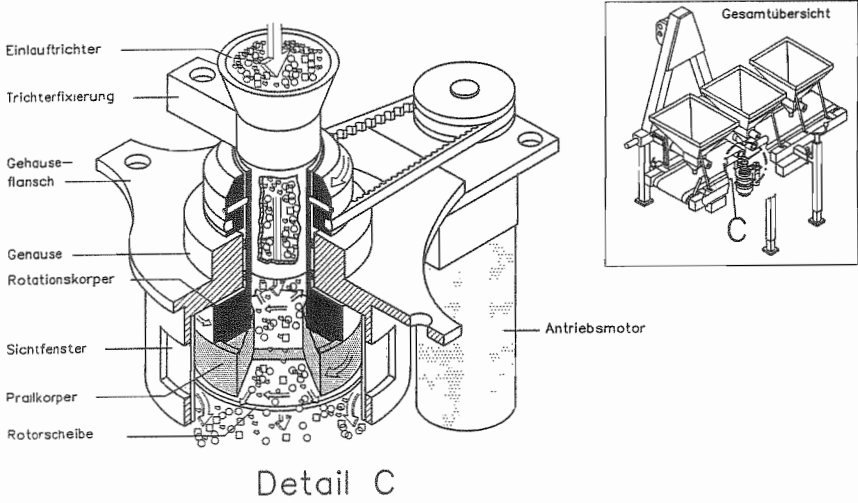


Abbildung 40: Rotationsverteiler (SYSTEM WEIHENSTEPHAN).

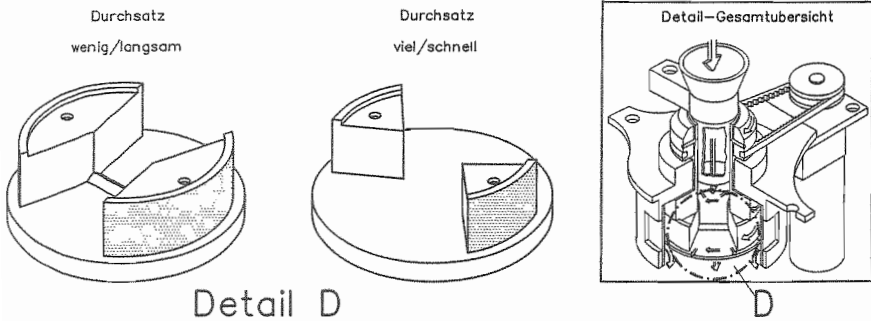


Abbildung 41: Prallkörper zur Durchsatzoptimierung.

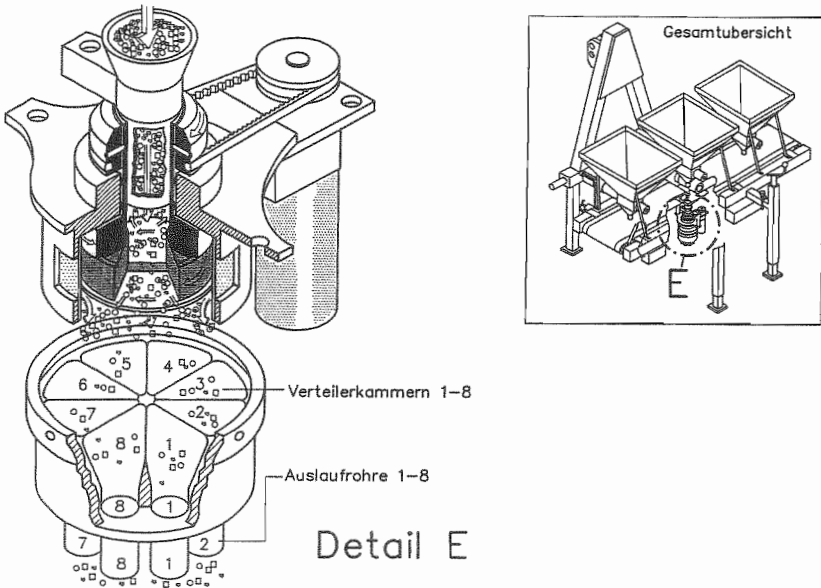
Je nach Bedarf kann so der radiale Partikelstrom beeinflußt werden. Schmale Stege erhöhen die Durchsatzleistung und reduzieren die Verweildauer der Partikel auf der Scheibe. Breiten Stegen, und damit reduzierter Austrittsfläche, entspricht eine reduzierte Durchsatzleistung aber eine längere Verweildauer auf der Scheibe.

Während der kurzen und für die Partikel schonenden, aber zwangsgerichteten Phase der Radialbeschleunigung, werden die nachströmenden Partikel über einen Winkel von 360 Grad verteilt. Nach dem Verlassen der Rotorscheibe fallen aufgrund der Gravitationskraft die Düngerteilchen, jetzt wieder in axialer Richtung, entlang der Gehäuseinnenwand in den Verteiler. Diesem mechanischen Radialverteilprinzip wurde gegenüber dem pneumatischen (SYSTEM WEISTE) der Vorzug gegeben, weil der Gutstrom der Partikel zwangsgerichtet verläuft und zufällige Unregelmäßigkeiten in der Zuteilung dadurch eher vermieden werden.

Der **Verteiler** dient der gleichmäßigen Zuteilung des Gemisches auf die Teilbreiten. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen kam ein Verteiler mit acht Verteilkammern zum Einsatz, wie er auch im Feldversuchswesen eingesetzt wird (Abb. 42).

Der günstigste Fall wäre nun, daß durch das gleichmäßige Verteilen der Partikel von den zutreffenden Einzelnährstoffkomponenten auf alle, im vorliegenden Fall acht, Verteilkammern die kleinsten Teilmengen gleich groß sind. Oder anders ausgedrückt: Sind in zeitlich definierten Meßintervallen die Teilmengen der Einzelnährstoffkomponenten unter den Verteilkammern gleich, so ist sowohl die ideale Mischung, als auch die denkbar gleichmäßigste Zuteilung auf die Teilbreiten des Gesamtsystems erreicht. Ist dies nicht der Fall, oder wird eine gleichmäßige Mengenzuteilung nur dadurch erzielt, daß ein Zuviel der einen Komponente durch ein Zuwenig der anderen Komponente ausgeglichen wird, kann nicht mehr von einer praxistauglichen Mischung und Zuteilung gesprochen werden.

Maßgeblich für den Erfolg ist demnach die Zuteilung auf die acht Kammern. Ihre Streuung kann indirekt bereits als Maß für die Mischgüte gewertet werden. Erst wenn



**Abbildung 42:** Verteiler mit acht Kammern.

ein gutes Zuteilergesult erzielt ist, kann der verfahrenstechnische Teil der Versuche mit seiner chemisch sehr aufwendigen und teuren Analytik durchgeföhrt werden.

#### 4.2.4.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zuteilung ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten auf acht Kammern

Die Zuteilung kann, wie schon angedeutet, in Wechselwirkung zur physikalischen Beschaffenheit der Einzelnährstoffkomponente stehen, von der Förderrate abhängen, durch erschwerte Einsatzbedingungen, beispielsweise in Hanglagen, vom Sollwert abweichen oder durch sonstige systematische Fehler verschlechtert werden. Um dieser Frage nachzugehen, wurden Versuche hinsichtlich der Zuteilung auf die einzelnen Kammern durchgeföhrt.



Die Prüfung der Zuteilung fand mit den vier ausgewählten Einzeldüngern Kalkammonsalpeter Granulat, Cederan P 23 Granulat, 40er Kali Kompaktat und Harnstoff Prill statt. Es sollte zunächst die Zuteilung der einzelnen Komponenten isoliert betrachtet werden.

Diese Varianten wurden mit einem mittleren Kammervolumen der Dosierorgane (Zellenradposition 6) und Dosierorgandrehzahlen 10 1/min und 25 1/min für geringe und hohe Förderraten durchgeführt. Jede Variante wurde 20 - mal wiederholt. Die Gesamtprobenzahl lag bei 4 Düngern x 2 Förderraten x 8 Kammern x 2 Rotorscheiben x 20 Wiederholungen = 10.240 Einzelwägungen. Das Meßintervall betrug bei allen Gewichtsermittlungen 30 s und war auf den verfahrenstechnischen Mischversuch und die notwendige Mindestprobengröße für die chemische Analytik abgestimmt.

Die gewonnenen Meßergebnisse wurden auf Plausibilität und Normalverteilung geprüft. Diese Vorgehensweise wird im allgemeinen in verfahrenstechnischen Untersuchungen angewendet. Je Variante wurden die Mittelwerte der acht Verteilkammern durch eine Varianzanalyse auf ihre Unterscheidbarkeit hin untersucht und der 95 % Vertrauensbereich der Mittelwerte errechnet.

Waren signifikante Unterschiede gegeben, wurde durch den Duncan Mittelwertsvergleich eine Gruppierung der Mittelwerte durchgeführt. Dabei gilt, daß die Mittelwerte innerhalb der Gruppen nicht, dagegen diejenigen zwischen den Gruppen hoch signifikant unterscheidbar sind. Die Anzahl der Gruppen ist dadurch ergänzend zur Varianzanalyse ein Maß dafür, wie unterschiedlich die Zuteilung auf die einzelnen Kammern des Verteilers in der jeweiligen Einstellungsvariante erfolgte.

#### **4.2.4.2 Ergebnisse der Zuteilung auf acht Kammern**

Die erste Einstellung wurde bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (geringe Dosierung) durchgeführt. Zunächst werden die Ergebnisse für die Düngerart

Kalkammonsalpeter erläutert. Der Gesamtmittelwert, über alle acht Kammern errechnet, betrug in dem Meßintervall von 30 s 63,52 g. Davon wichen die einzelnen Kammern mehr oder weniger stark ab. Das Ergebnis der Varianzanalyse zeigte hoch signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der einzelnen Kammern (Abb. 43).

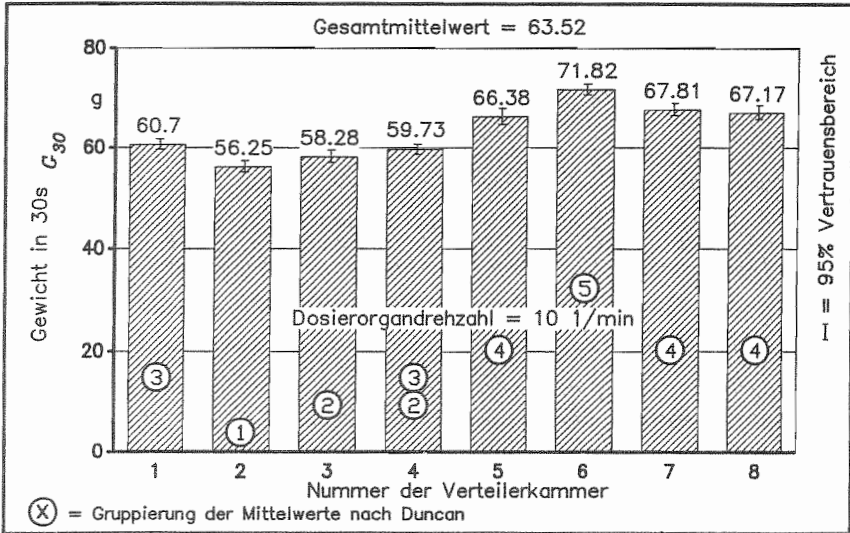


Abbildung 43: Verteilung von Kalkammonsalpeter auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 l/min (n = 20).

Aufbauend auf dieses Ergebnis liefert auch der Mittelwertsvergleich nach Duncan ein eindeutiges Ergebnis. Die acht Kammern können in fünf signifikant unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden. Eine Unterscheidung der Mittelwerte innerhalb einer Gruppe ist aber nicht mehr möglich. Diese Erkenntnis wird auch durch den 95 % Vertrauensbereich bestätigt. Gibt es bei den Vertrauensbereichen zweier Mittelwerte scharfe Grenzen und keine Überschneidungen, so sind sie unterscheidbaren Gruppen zuzuordnen.

Für die Variante mit Cederan P 23 und geringer Dosierung gilt, daß die Mittelwerte nur in drei unterscheidbare Gruppen eingeteilt werden können (Abb. 44).

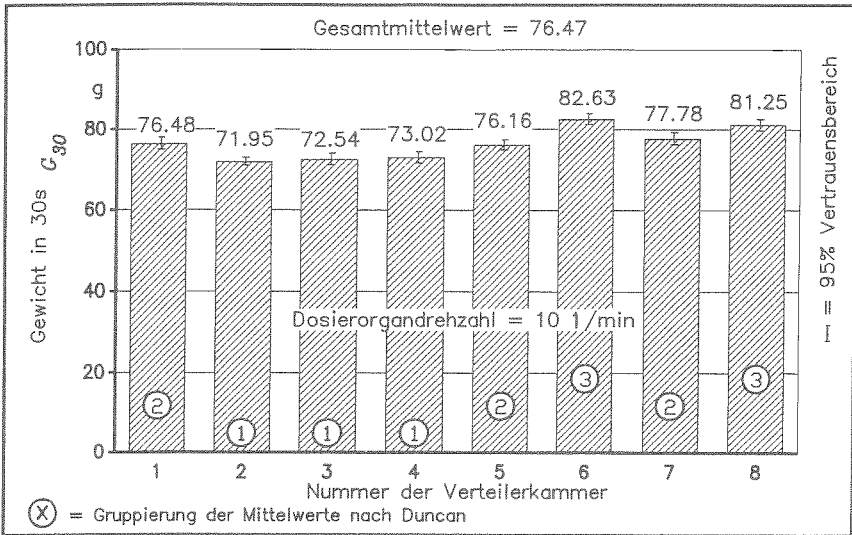


Abbildung 44: Verteilung von Cederan P 23 auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (n = 20).

So liegen die zugeteilten mittleren Mengen der Kammern 2, 3 und 4 in der Gruppe 1. Sie unterscheidet sich von der Gruppe 2 mit den Kammern 1, 5 und 7 durch signifikant geringere Gewichtswerte. Die Kammern 6 und 8 liegen in der dritten Gruppe. Diese beiden Kammern können bei dieser Variante bezüglich ihres Mittelwertes nicht voneinander unterschieden werden. Sie sind aber gegen alle anderen deutlich abgrenzbar. Der Gesamtmittelwert liegt bei gleicher Einstellung etwas über dem des Kalkammonsalpeters. Dies ist für diese Versuchsfrage jedoch von untergeordneter Bedeutung. Wieder anders ist das Ergebnis der Variante mit 40er Kali und einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min (Abb. 45).

Als Ergebnis der Varianzanalyse sind hoch signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten festzustellen. Der Mittelwertvergleich liefert fünf unterscheidbare Gruppen. Die Kammern 2, 3, 5 und 7 können aufgrund der nahe am Gesamtmittel liegenden Mittelwerte jetzt mehreren Gruppen zugeteilt werden. Auch die Zuordnung der Kammern zu den einzelnen Gruppen ist neu festzulegen. Beispielsweise liegen

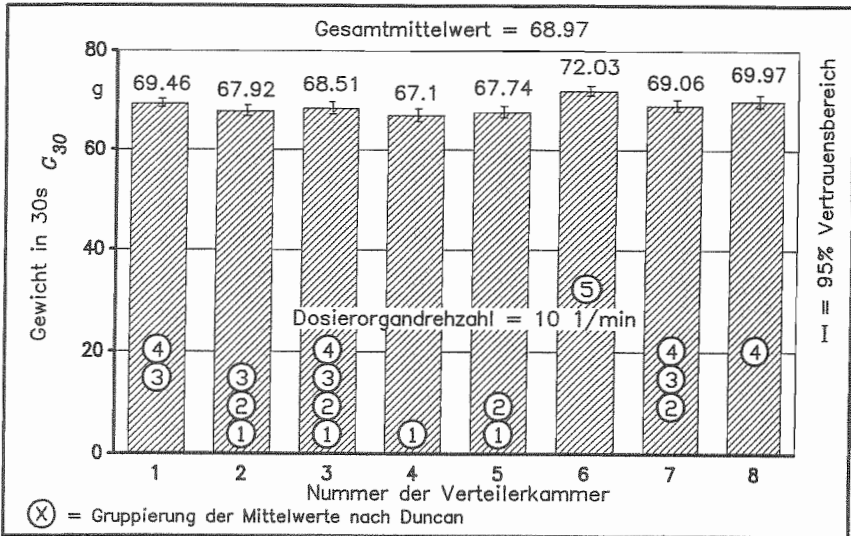
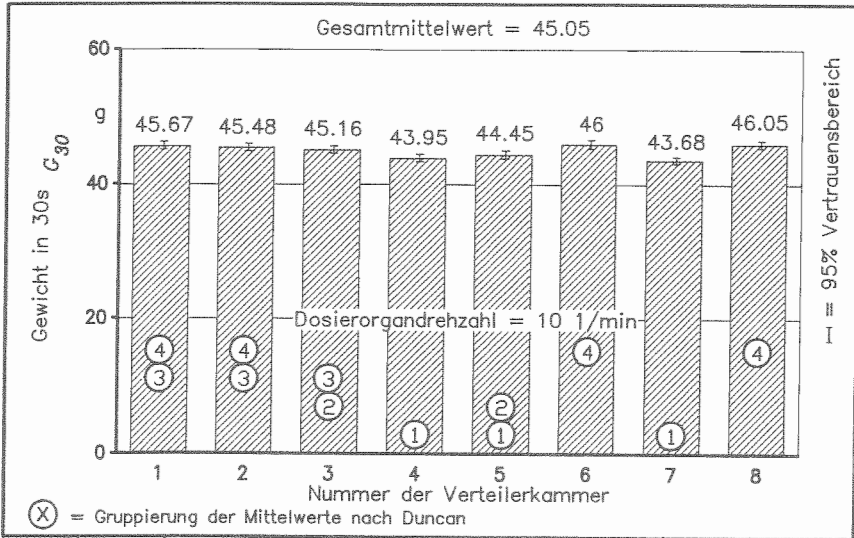


Abbildung 45: Verteilung von 40 er Kali auf acht Kammern bei einer Dosierorgan-drehzahl von 10 1/min (n = 20).

jetzt die Kammern 6 und 8 nicht mehr in einer Gruppe. Die Zuteilung des 40 er Kali erfolgte also anders als bei Kalkammonsalpeter und Cederan P 23.

Ein erneut anderes Ergebnis mußte bei der Zuteilung von Harnstoff festgestellt werden. Waren bei den beiden Granulaten und dem Kompaktat die Kammern mit den Nummern 2, 3 und 4 den beiden Gruppen mit den niedrigeren Mittelwerten zuzuordnen, finden sich bei der Variante mit Harnstoff Prill die Kammern 2 und 3 in den Gruppen mit den höchsten Gewichtswerten. Umgekehrt dazu wird Harnstoff der Kammer 7 nur sehr mäßig zuteilt.(Abb. 46).

Die ersten Ergebnisse zeigen, daß zwischen der Düngerform und dem Grad der Zuteilung auf die einzelnen Kammern Wechselwirkungen bestehen. Sie sind zum Teil auf das System, zum Teil auf die physikalischen Eigenschaften der Einzelnährstoffkomponenten zurückzuführen. Bestimmte Kammern, beispielsweise Nr. 6 und 8, behalten ihre bevorzugte Gruppenzugehörigkeit bei, während die anderen je nach

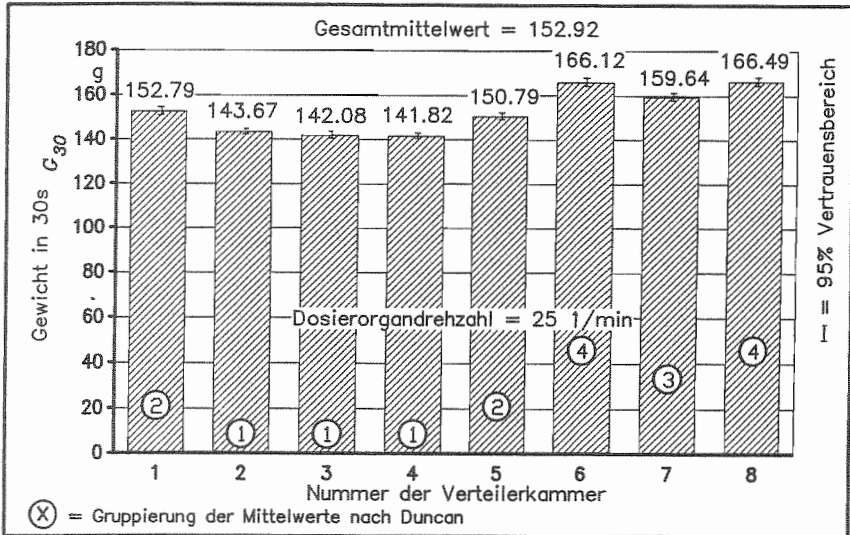


**Abbildung 46:** Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min ( $n = 20$ ).

verwendetem Rohmaterial ihre Gruppenzugehörigkeit wechseln können.

In Kapitel 2.3.3.2 wurde auf die Auswirkungen des Mengeneffektes hingewiesen. Durch eine Erhöhung der Förderrate konnte der Streufehler bei Wurfstreuern gesenkt werden. Da auch in Rotationsverteilern Düngepartikel radial beschleunigt werden, könnte unter ungünstigen Umständen eine Änderung der Förderrate, beruhend auf einer Erhöhung der Dosierorgandrehzahl beispielsweise von 10 1/min auf 25 1/min, Auswirkungen auf die Zuteilung in die einzelnen Kammern haben.

Wird Kalkammonsalpeter verwendet und mit einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min abgedreht, so sind die Mittelwerte der acht Kammern in vier hoch signifikant unterscheidbare Gruppen einzuteilen. Wieder weisen die Kammern 2, 3 und 4 die geringsten und die Kammern 6 und 8 die höchsten Mittelwerte auf. Die Kammern in Gruppe 1 erhalten circa 15 % weniger Kalkammonsalpeter, als die Kammern in Gruppe 4 (Abb. 47).



**Abbildung 47:** Verteilung von Kalkammonsalpeter auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20).

Noch gravierender ist das Ergebnis bei hoher Dosierung unter Verwendung von Cederan P 23. Die Mittelwerte der acht Kammern lassen sich sechs hoch signifikant unterscheidbaren Gruppen zuordnen. Nur die Kammern 1, 6 und 7 erhalten in etwa die gleichen Düngermengen, liegen aber deutlich über dem kalibrierten Gesamtmittelwert. Die Abweichungen zwischen den Extremen betragen über 15 % (Abb. 48).

Ein ähnliches Ergebnis liefert die Zuteilung von 40er Kali. Die Mittelwerte aus acht Kammern können sieben signifikant unterschiedlichen Gruppen zugeordnet werden. Dabei liegen die Abweichungen zwischen den Gruppen teilweise über 10 % (Abb. 49).

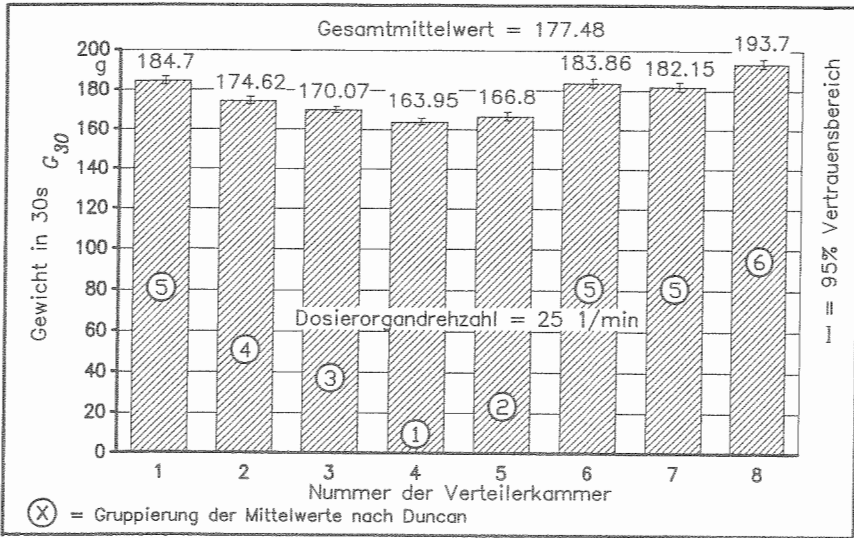


Abbildung 48: Verteilung von Cederan P 23 auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20).

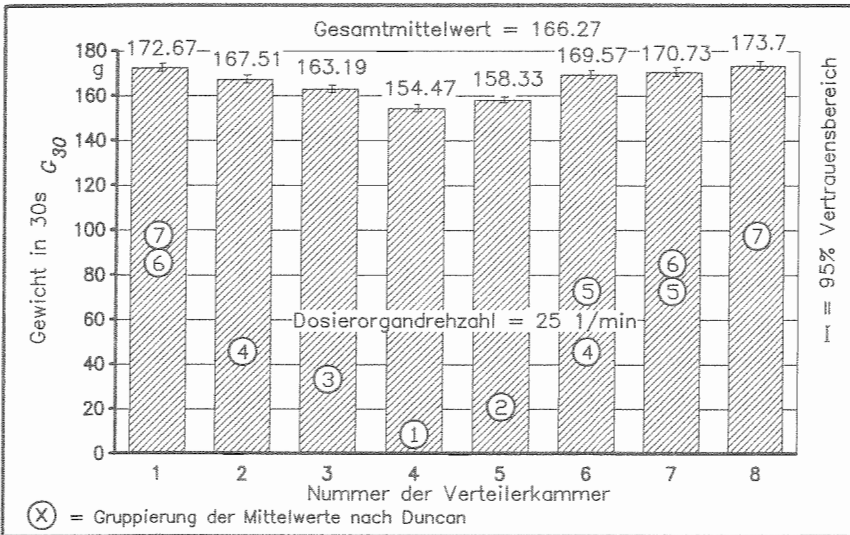


Abbildung 49: Verteilung von 40er Kali auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min (n = 20).

Ein etwas ausgewogeneres Ergebnis ist wieder bei Harnstoff zu verzeichnen. Die Mittelwerte können fünf unterscheidbaren Gruppen zugeordnet werden. Dabei liegen die beiden Kammern mit den größten Abweichungen vom Gesamtmittelwert bei einer Differenz von circa 10 % (Abb. 50).

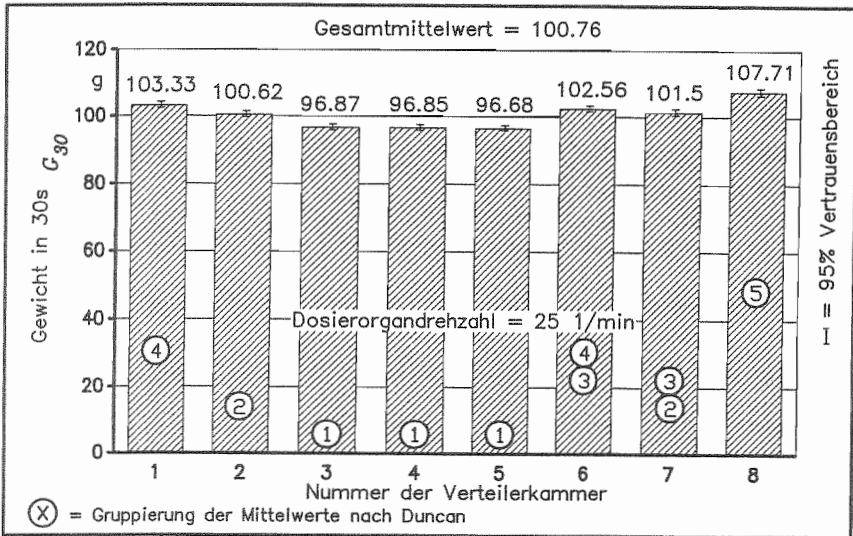


Abbildung 50: Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min ( $n = 20$ ).

#### 4.2.4.3 Versuch zur Ermittlung der Zuteilung ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten auf acht Kammern in Hanglagen

Um den Einfluß erschwerter Einsatzbedingungen zu verdeutlichen, wurden die Versuche in Hanglagen wiederholt. Das gesamte System wurde dabei in 10, 20 und 30 % Steigung in Fahrtrichtung geneigt. Einrichtungen zum Hangausgleich waren in allen Versuchen nicht vorgesehen.



Mit Harnstoff konnten die besten Ergebnisse erzielt werden. Aus diesem Grund soll am Beispiel des Harnstoff Prills erläutert werden, welche Folgen der Einsatz von Radialverteilssystemen unter schwierigen Bedingungen für die Zuteilung auf die einzelnen Kammern oder Teilbreiten hat.

Da die Kammern radial um die Achse des Rotors angeordnet sind, wäre es für die Durchführung des Versuches unerheblich, in welcher Richtung das System geneigt wird. Im vorliegenden Fall wurde das Gerät heckseits in Fahrtrichtung überhöht. Einer Hangneigung von 30 % entspricht eine Neigung des Verteilers und eine Ablenkung der Rotorachse um ebenfalls 30 %, oder  $16,7^\circ$  <sup>3</sup>.

#### **4.2.4.4 Ergebnis der Zuteilung auf acht Kammern in Hanglagen**

Die Maßnahmen zur Erschwernis der Versuche haben zur Folge, daß die Kammern 4 und 5 unter, und die Kammern 1 und 8, die sich ebenfalls nebeneinander befinden, über ihrem Ausgangsniveau liegen. Durch die Gravitationskraft tritt bereits bei geringer Hangneigung eine deutlich sichtbare Verschiebung der Zuteilung auf (Abb. 51).

Gerade diejenigen Kammern, die bisher durch eine geringe Düngermengenzuteilung auffielen, erhielten jetzt die höchsten Gaben und umgekehrt. Diese Erschwernis wirkte sich sofort in einem Anstieg der hoch signifikant unterscheidbaren Mittelwerte aus. Waren in der Ebene nur vier Gruppen unterscheidbar, so sind es bei 10 % Hangneigung bereits sechs.

Es fällt auf, daß die höchsten Düngergaben, nicht wie zunächst aufgrund der Überhöhung vermutet, in den Kammern 4 und 5 wiedergefunden wurden, sondern in der etwas höher liegenden 3. Kammer. Analog sind es nicht die Kammern 1 und 8 die

---

<sup>3</sup> *Mit Werten bis zu  $17^\circ$  Hangneigung sind die Verhältnisse in der Praxis ausreichend repräsentiert. Das ergaben begleitende Untersuchungen zum Thema Fahrgassenabstände in Hanglagen.*

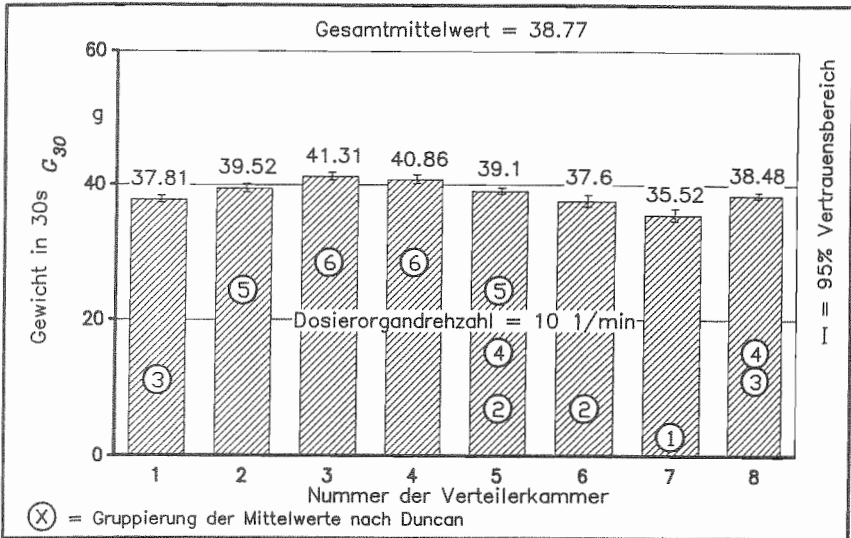
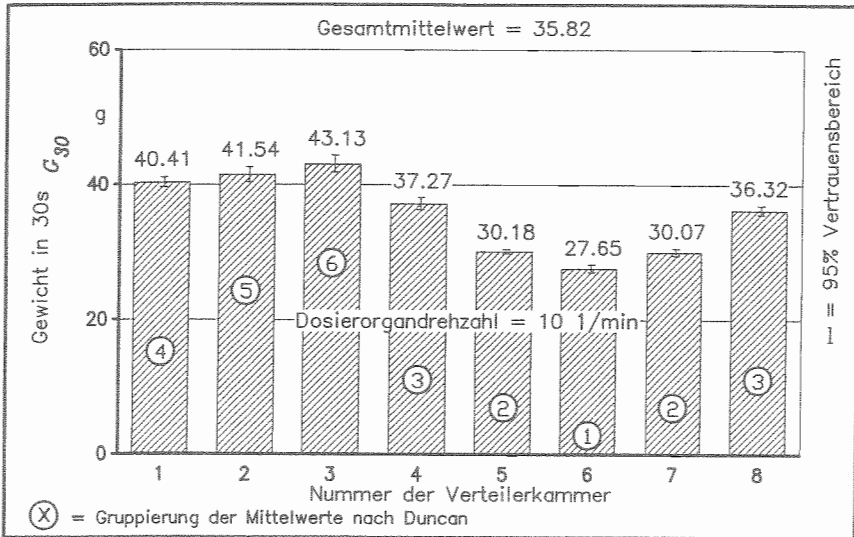


Abbildung 51: Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 10 % Steigung (n = 20).

die geringsten Mengen aufnehmen konnten. Auch hier war es die um eine Einheit nach links verschobene Kammer 7.

Wird die Hangneigung um weitere 10 % auf 20 % erhöht, kann die Fortsetzung dieses Trends beobachtet werden. Das Bild der Zuteilung entspricht jetzt einer Wellenform. Sämtliche Mittelwerte sind hoch signifikant verschieden. Die Minima und Maxima der 95 % Vertrauensbereiche liegen nach wie vor sehr nahe am Mittelwert. Der Einfluß des Harnstoffes auf diese Zuteilung ist demnach gering. Vielmehr handelt es sich um einen systematischen Fehler (Abb. 52).

In der Variante mit 30 % Hangneigung war nochmals eine Steigerung dieses Effektes möglich. Die Mittelwerte der einzelnen Kammern weichen soweit voneinander ab, daß sie nach dem Duncan Test acht hoch signifikant unterschiedliche Gruppen bilden. Jeder Gruppe kann nur ein Mittelwert zugeordnet werden. Die relative Abweichung

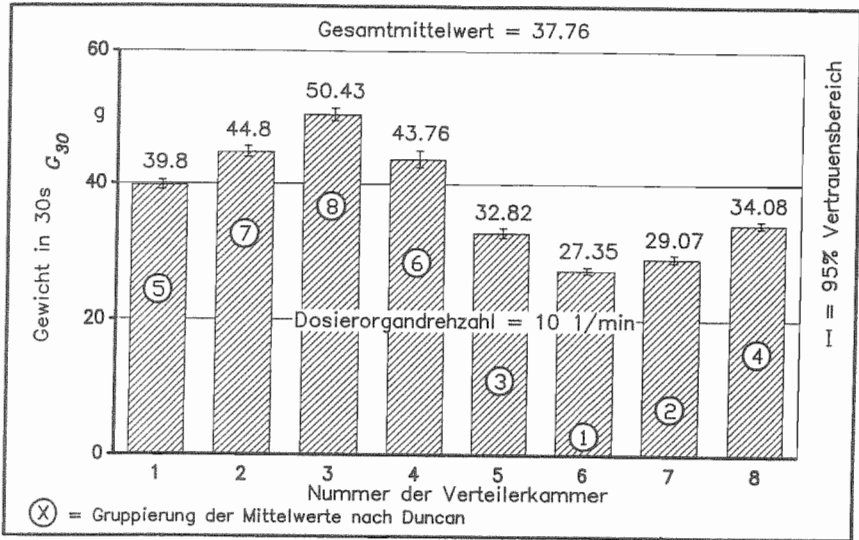


**Abbildung 52:** Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 20 % Steigung (n = 20).

zwischen der Kammer mit der höchsten Düngeraufnahme und derjenigen mit der geringsten beträgt über 50 %. (Abb. 53).

Die Kammer 3 hatte am meisten und die Kammer 6 am wenigsten Dünger aufgenommen. Diese Versuche wurden mit einer Rotorscheibe durchgeführt, deren Stege für erhöhte Verweildauer der Düngerpartikel die Bereiche, über die der Dünger abfließen konnte, begrenzten. Durch den Einsatz kleinerer Stege besteht die Möglichkeit, den Dünger rascher von der Rotorscheibe abfließen zu lassen. Der Winkel, den die Rotorscheibe überstreicht, während eine definierte Teilmenge je Zeiteinheit abfließen kann, wird dadurch reduziert.

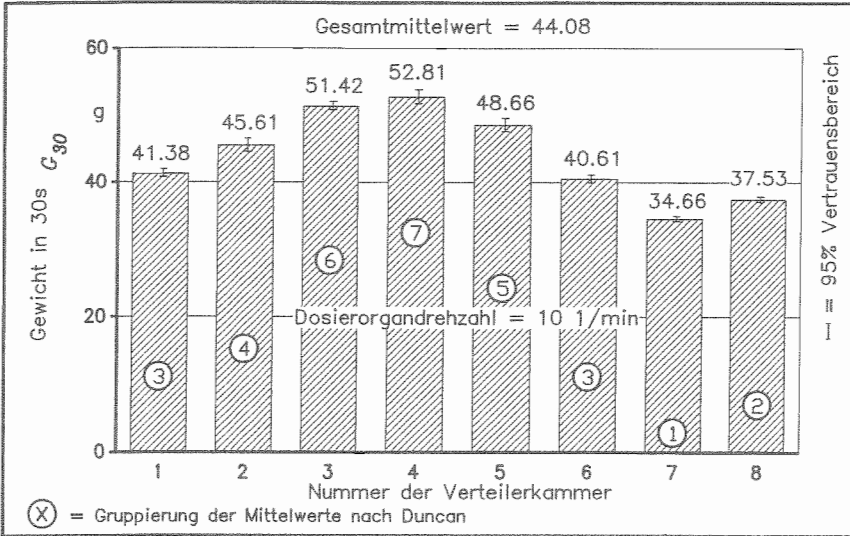
Um sicherzustellen, daß auch die Auswirkungen dieses Effektes auf die Düngerzuteilung in die einzelnen Kammern erfaßt werden, wurde als ergänzende Variante der Versuch mit der Rotorscheibe mit kleinen Stegen oder Prallkörpern, für großen Durchsatz ceteris paribus wiederholt. Das Ergebnis war ebenfalls die bereits



**Abbildung 53:** Verteilung von Harnstoff auf acht Kammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und 30 % Steigung (n = 20).

beobachtete ungleichmäßige Zuteilung des Harnstoffes auf die einzelnen Kammern. Durch den Mengeneffekt konnten die Abweichungen also nicht erklärt werden (Abb. 54).

Die hoch signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten kommen durch die sieben unterscheidbaren Gruppen zum Ausdruck. Der höchste und der niedrigste Mittelwert weichen um etwa 40 % voneinander ab. Maximum und Minimum sind jetzt um eine Kammer nach rechts verschoben. Die Kammer 4 erhält die größte Menge Harnstoff, die Kammer 7 die geringste. Der wellenförmige Verlauf der Mittelwerte hat sich demnach verlagert. Durch die geringere Verweildauer der Partikel auf der Rotorscheibe wurden diese weniger stark von der Richtung der Normalkraft abgelenkt. Deshalb erhält die Kammer 4 ein Maximum an Harnstoff und die Kammer 7 analog das Minimum.



**Abbildung 54:** Verteilung von Harnstoff auf acht Verteilerkammern bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 l/min und 30 % Steigung mit der Rotorscheibe für großen Durchsatz (n = 20).

Diese Hangneigungsversuche wurden auch mit den anderen für den verfahrenstechnischen Mischversuch relevanten Düngern Kalkammonsalpeter, Cederan P 23 und 40er Kali durchgeführt. Die Ergebnisse lieferten keine zusätzlichen Erkenntnisse. Aus diesem Grund werden sie hier nicht eingehender beschrieben.

### 4.3 Bewertung der vorliegenden Versuchsergebnisse

Ein Resümee dieser Versuche zeigt, daß es verfahrenstechnisch durchaus möglich ist, geeignete Komponenten zu einem System zusammenzuführen, das die dezentrale und mobile Herstellung von Mehrnährstoffdünger mit variabler Nährstoffformel ermöglicht.

Die Dosierung kann reaktionsschnell und zuverlässig ausgelegt und realisiert werden. Dabei gelingt es, alle praxisrelevanten Düngerformen zu handhaben. Die Genauigkeit liegt in dem von elektronisch geregelten Systemen geforderten Bereich.

Die interne Förderung gelingt ebenfalls zügig und ohne eine zusätzliche Belastung der Zuführung zum Mischorgan mit weiteren Fehlern. Dabei wird mit den Rohstoffen schonend umgegangen und Nachteile für die Applikation sind nicht zu erwarten.

Die hohen Erwartungen an das Misch- und Zuteilorgan konnten von diesem jedoch in der ersten Phase der Entwicklung nicht erfüllt werden. Die erhoffte gleichmäßige Zuteilung der Düngerpartikel auf die acht Verteilkammern konnte nicht erreicht werden. Vielmehr war die Zuteilung derart inhomogen, daß die Mittelwerte aus 20 Wiederholungen derjenigen Düngermengen, die auf die acht Kammern verteilt wurden, statistisch einwandfrei und hoch signifikant unterschieden werden konnten.

Diese Unterscheidbarkeit war zurückzuführen auf die verschiedenen Düngerpartikel, die Förderrate, den Hangeinfluß, die Verweildauer im Bereich der Radialbeschleunigung und nicht zuletzt auch auf die materialbedingten Störeinflüsse, wie zum Beispiel Unwucht der Rotorscheibe, unvollkommene Zentrierung des Rotationskörpers oder Toleranzen in der Größe der einzelnen Verteilkammern. Diese Einflußgrößen sind, wie die Versuchsergebnisse zeigten, nicht isoliert zu betrachten, sondern müssen in Verbindung mit ihren Wechselwirkungen gesehen werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen, kann Radialverteilsystemen herkömmlicher Bauweise für die Mischung und gleichmäßige Zuteilung kaum eine praxisrelevante Bedeutung für den Einsatz in rechnergestützten Verteilsystemen eingeräumt werden.

Ob die Energie zur radialen Beschleunigung der Partikel pneumatisch oder mechanisch bereitgestellt wird, ist zwar maßgeblich für die physikalische Beanspruchung der Rohmaterialien, aber es kann in beiden Fällen durch eine Vielzahl von Imponderabilien nicht erwartet werden, daß eine gleichmäßige Mischung mit anschließender

definierbarer Zuteilung in verschiedene Kammern oder Teilbreiten für die exakte Querverteilung bei der Applikation erreicht wird.

#### 4.4 Konstruktive Weiterentwicklung am Misch- und Zuteilorgan

In den bisher durchgeführten Versuchen, insbesondere den Hangneigungsversuchen, konnte eine gleichmäßige Zuteilung nicht erreicht werden. Die Untersuchungen führten aber zu der Erkenntnis, daß die Differenzen der unter den gegenüberliegenden Kammern aufgefangenen Düngermengen zum Mittelwert in etwa gleich groß sind. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß ein Zuviel an Menge in der einen Kammer einem Zuwenig in seiner gegenüberliegenden entspricht und umgekehrt. Auf das praktische Beispiel in den Hangneigungsversuchen übertragen, wird die talwärts liegende Kammer 4 in etwa die Menge zuviel aufnehmen, die in ihrer bergwärts gegenüberliegenden Kammer 8 zum Gesamtmittelwert fehlt.

Dieser Effekt kann nur durch die Kräfte, die nach dem Verlassen der Rotorscheibe auf die Düngepartikel wirken, erklärt werden.

- Die **Radialkomponente der Zentrifugalkraft** wird durch die Drehbewegung der Rotorscheibe verursacht. Sie wirkt nur kurz, da die Düngepartikel an der Innenwand des zylindrischen Rotorgehäuses nach wenigen Millimetern wieder abgebremst werden.
- Nun unterliegen sie vorwiegend der **Gravitationskraft**. Durch sie werden die Teilchen abwärts beschleunigt und durch die außenliegenden größeren Bereiche der Verteilerkammern aufgefangen. Durch die Überhöhung in Fahrtrichtung kommt es zu einer verstärkten Zuteilung der Partikel auf die tiefer liegenden Kammern 4 und 5 zu Lasten der jetzt höher liegenden Kammern 1 und 8. Diese Umverteilung hat zwei Gründe. Erstens werden durch die Gravitationskraft die Teilchen vermehrt in Richtung der tiefer liegenden

Kammern abgelenkt und zweitens wird durch diese Ablenkung der Bereich, in dem die Partikel in die oberen Kammern fallen können, eingeengt, während er sich bei den tiefer liegenden Kammern noch vergrößert.

- Daß nun die Kammern mit den gemessenen maximalen und minimalen Düngermengen nicht exakt in der Neigungsrichtung übereinander liegen kann durch die **Tagentialkomponente der Zentrifugalkraft** erklärt werden, die ebenfalls durch die Rotordrehbewegung auf die Partikel wirkt und diese entsprechend der Drehrichtung der Rotorscheibe und der Prallkörper ablenkt.

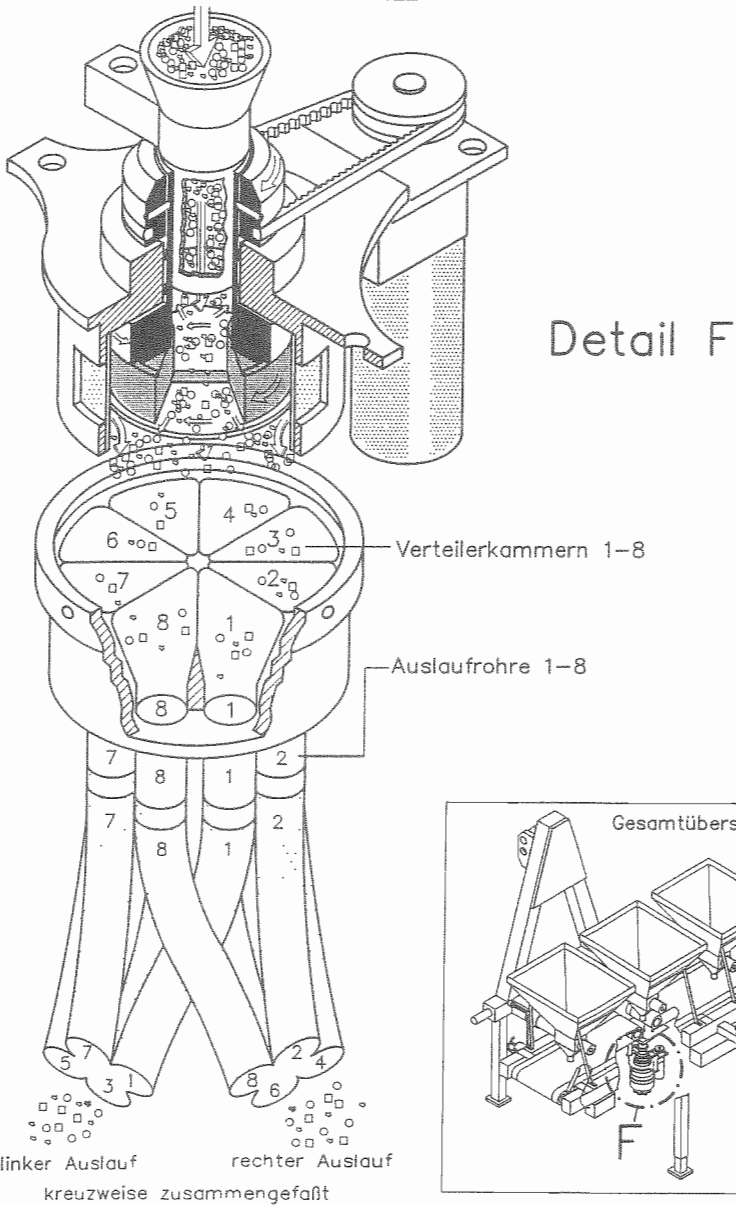
Unter Beachtung der auf die Partikel wirkenden Kräfte und der Tatsache , daß Hangneigung nicht nur in Fahrtrichtung auftritt, sondern der Verteiler in jede Richtung geneigt werden kann, werden für die weitere Vorgehensweise insgesamt vier Kammern kreuzweise zu einem linken und einem rechten Auslauf zusammengefaßt. Durch diese Maßnahme sollen die in Frage kommenden Wechselwirkungen kompensiert werden.

#### **4.4.1 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zuteilung der Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf**

Für die weiteren Versuche wurden die Kammern mit den Nummern 1, 3, 5 und 7 zum linken Auslauf, diejenigen mit den Nummern 2, 4, 6 und 8 zum rechten Auslauf zusammengefaßt (Abb. 55). Die Auswirkungen dieser Maßnahme hinsichtlich der geforderten gleichmäßigen Zuteilung auf die zwei Ausläufe sollten nach dieser technischen Veränderung überprüft werden. Aufbauend auf die bereits durchgeführten Zuteilversuche fanden die ausgewählten Einzelnährstoffkomponenten Kalkammonsalpeter (Dünger 1), Cederan P 23 (Dünger 2), 40er Kali (Dünger 3) und Harnstoff (Dünger 4) Verwendung.

Um auch den Einfluß der Förderrate zu erfassen, wurde mit der Dosierorgandrehzahl 10 und 25 1/min dosiert. Nach einem Meßintervall von 30 Sekunden wurden die





**Abbildung 55:** Kreuzweise Zusammenfassung der acht Verteilerkammern zum linken und rechten Auslauf.

Teilmengen des linken und des rechten Auslaufes gewogen und miteinander verglichen. Der Versuch wurde 20 - mal wiederholt. Der Gesamtprobenumfang betrug 320 (4 Dünger x 2 Dosierorgandrehzahlen x 2 Ausläufe x 20 Wiederholungen).

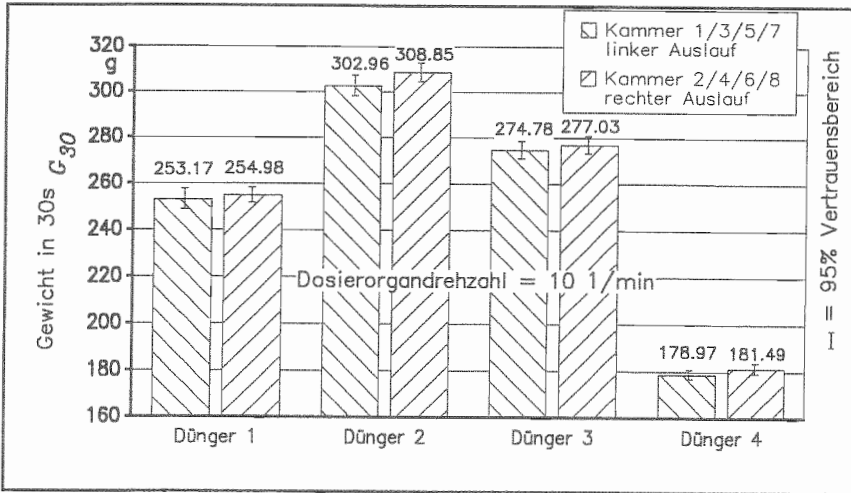
Nach der Erfassung der Einzelprobengewichte wurden die Daten auf Plausibilität und Normalverteilung geprüft und anschließend varianzanalytisch ausgewertet. Wenn durch kreuzweises Zusammenfassen der acht Kammern zu den zwei Ausläufen die Unregelmäßigkeiten in der Zuteilung aufgehoben werden, können die Mittelwerte der Teilmengen im linken und rechten Auslauf statistisch voneinander nicht mehr unterschieden werden.

#### **4.4.2 Ergebnisse der Zuteilung von Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf**

Zunächst sollen die Ergebnisse bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min betrachtet werden. Die Mittelwerte der Düngermenge des linken Auslaufes (Kammer 1, 3, 5, 7) ist in der linken Säule, die des rechten Auslaufes (Kammer 2, 4, 6, 8) in der rechten Säule grafisch dargestellt. Als Streuungsmaß ist zusätzlich der 95 % Vertrauensbereich eingezeichnet (Abb. 56).

Beim Austrag von Kalkammonsalpeter (Dünger 1) zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Mittelwerte. Auch bei den Versuchen mit Cederan P 23 (Dünger 2) und 40er Kali (Dünger 3) wird trotz deren problematischer physikalischer Eigenschaften erreicht, daß die Mittelwerte der gewogenen Proben statistisch nicht unterschieden werden können. Das heißt, daß die Nullhypothese, die besagt, daß die beiden Mittelwerte gleich sind, nicht verworfen werden darf. Die relative Abweichung der Mittelwerte liegt im ungünstigsten Fall bei Cederan P 23 unter 2 %.

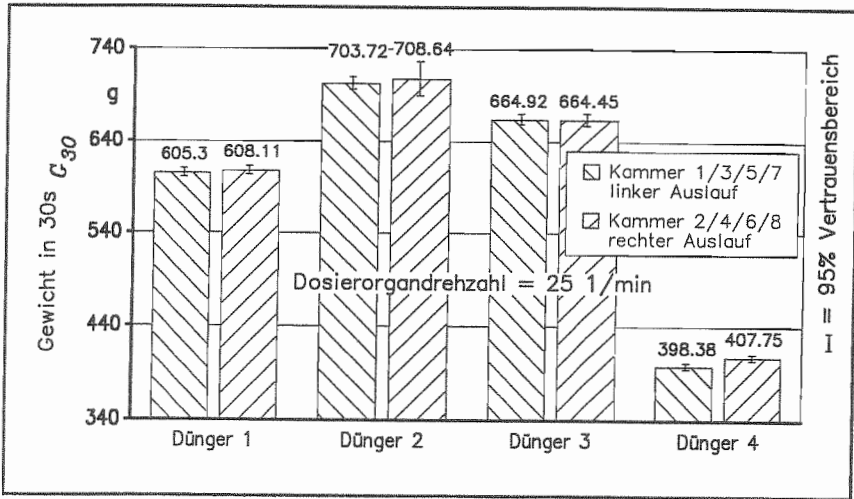
Die Mittelwerte bei Harnstoff (Dünger 4) sind ebenfalls nicht unterscheidbar. Die relative Abweichung liegt unter 1 %. Harnstoff wird demnach ebenfalls sehr



**Abbildung 56:** Verteilung ausgewählter Dünger auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min und der Rotorscheibe für geringen Durchsatz ( $n = 20$ ).

gleichmäßig und sicher zugeteilt. Der 95 % Vertrauensbereich ist geringer als bei den Granulaten oder beim Kompaktat; ein Merkmal, das auf die gleichmäßige Beschaffenheit des Prills zurückzuführen ist.

Anschließend wurde der Versuch mit einer erhöhten Dosierorgandrehzahl von 25 1/min wiederholt (Abb 57). Auch dabei waren die Mittelwerte des linken und rechten Auslaufes nicht zu unterscheiden. Sogar beim problematischen 40er Kali Kompaktat stimmen die Mittelwerte auf 0,5 g (0,1 %) überein. Die Abweichung zwischen dem linken und rechten Auslauf stieg beim Harnstoff etwas an, lag aber noch deutlich unter 2 %. Die Ergebnisse bestätigen, daß durch das kreuzweise Zusammenfassen von je vier Verteilkammern eine gleichmäßige Zuteilung erreicht werden kann.



**Abbildung 57:** Verteilung ausgewählter Dünger auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 25 1/min und der Rotorscheibe für geringen Durchsatz.

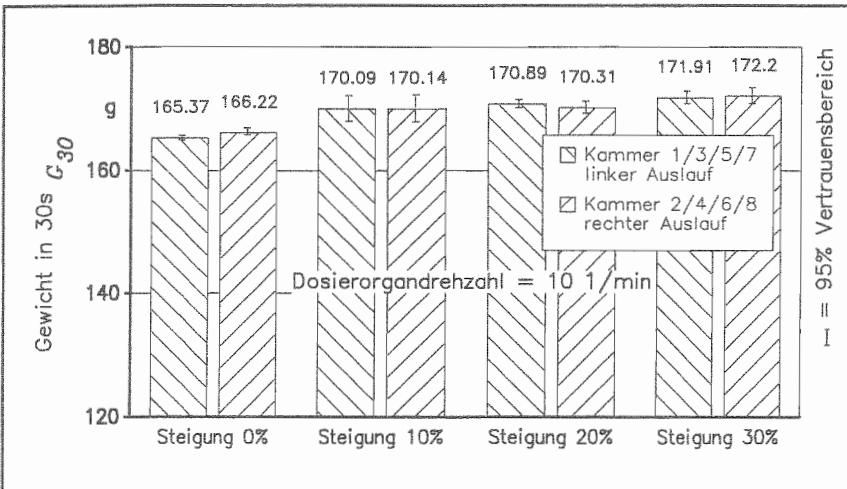
#### 4.4.3 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Zuteilung ausgewählter Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf in Hanglagen

Um die in Kapitel 4.4.2 festgestellte gleichmäßige Zuteilung auch unter schwierigen Bedingungen zu überprüfen, wurden die Versuche mit einer Hangneigung von 10, 20 und 30 % in Fahrtrichtung wiederholt, die Zuteilung auf die beiden Ausläufe gravimetrisch ermittelt und die aufgefangenen Düngermengen verglichen.

Der Gesamtprobenumfang betrug dabei 2560 (4 Dünger x 2 Dosierorgandrehzahlen x 2 Ausläufe x 4 Hangneigungen x 2 Rotorscheiben mit unterschiedlichen Prallkörpern x 20 Wiederholungen). Die Versuchsauswertung erfolgte wie in den vorangegangenen Versuchen. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit wurde der Harnstoff für die grafischen Darstellungen ausgewählt.

#### 4.4.4 Ergebnisse der Zuteilung von Einzelnährstoffkomponenten auf den linken und rechten Auslauf in Hanglagen

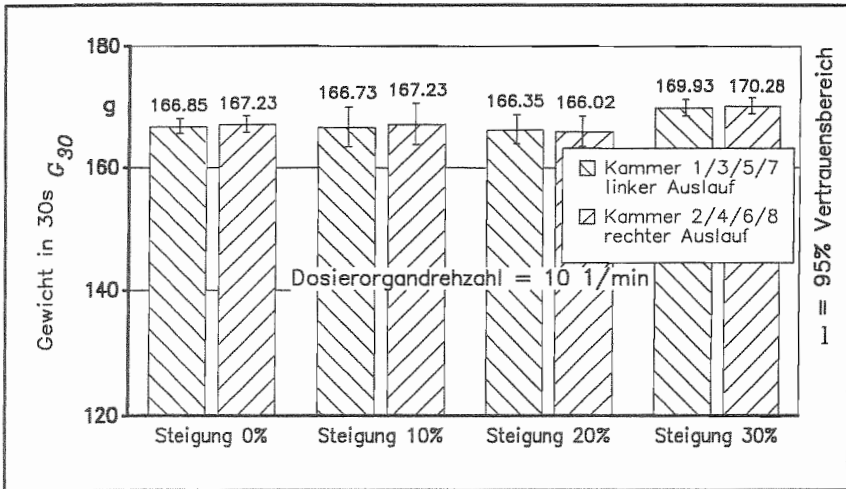
Die Mittelwerte der jeweiligen Versuchsvarianten sind in Abbildung 58 zusammengestellt. Bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min lag das aufgefangene Gewicht je Auslauf in allen drei Steigungsvarianten bei etwa 170 g. Die mittleren Düngemengen des linken und rechten Auslaufes waren statistisch nicht zu unterscheiden, so daß die Nullhypothese nicht verworfen werden konnte. Die beiden Mittelwerte innerhalb einer Variante unterscheiden sich bei einem sehr engen 95 % Vertrauensbereich um jeweils weniger als 1 g.



**Abbildung 58:** Verteilung von Harnstoff auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min sowie 10, 20 und 30 % Steigung.

Wiederholungen der Versuche mit den beiden Granulaten und dem Kompaktat brachten die gleichen Ergebnisse. Selbst durch den Wechsel der Rotorscheibe für

hohen Durchsatz (Abb. 59) und Änderungen der Dosierorgandrehzahlen traten keinerlei Verschiebung auf.



**Abbildung 59:** Verteilung von Harnstoff auf zwei Ausläufe bei einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min, 10, 20 und 30 % Steigung sowie der Schleuderscheibe für hohen Durchsatz.

Es kann daraus geschlossen werden, daß in allen Varianten die zugeteilten Teilmengen in den beiden Ausläufen gleich sind und daß durch das kreuzweise Zusammenfassen der einzelnen Kammern, die aus den vorhergehenden Versuchen bekannten Wechselwirkungen, kompensiert werden konnten.

#### 4.5 Beurteilung der konstruktiven Weiterentwicklung

Die geforderte gleichmäßige Zuteilung der Teilmengen auf die beiden Ausläufe wird durch die einfache aber wirkungsvolle kreuzweise Zusammenfassung der Verteilerkammern erreicht. Weil jetzt die unter den Ausläufen aufgefangenen Teilmengen

auch unter schwierigen Einsatzbedingungen übereinstimmen, ist sichergestellt, daß die Wechselwirkungen zwischen Förderrate, verwendeten Einzelnährstoffkomponenten und den Einsatzbedingungen kompensiert werden können. Sogar systematische Fehler waren nicht mehr zu beobachten. Daraufhin kann davon ausgegangen werden, daß nachteilige Folgen für die herzustellende Mischung und Zuteilung nicht mehr zu erwarten sind.

## **5 Versuche zur mobilen Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen**

In den bisherigen Versuchen wurden stets Einzelnährstoffkomponenten verwendet, um das Gerät hinsichtlich Vorratsbehälter, Dosierung, Förderung und gleichmäßiger Zuteilung zu optimieren. Das Ziel des Projektes ist aber die Herstellung von Düngermischungen variabler Nährstoffanteile aus mehreren Einzelkomponenten im mobilen Einsatz. Deshalb war es notwendig nachfolgend Versuche mit mehreren Einzelnährstoffkomponenten durchzuführen, um zu zeigen, ob die aus verfahrenstechnischer Sicht zentralen Forderungen nach

- raschem Wechsel der Nährstoffzusammensetzung,
- sicherem Einhalten der vorgegebenen Nährstoffgehalte in der Mischung,
- Einhalten der gesetzlich zugelassenen Grenzwerte,
- schonender Behandlung der Einzelnährstoffkomponenten,
- ausschließlich radialer Mischung der Einzelnährstoffkomponenten, sowie rascher und vollständiger Selbstreinigung zur scharfen Abgrenzung definierter Einstellungen
- und die Möglichkeit zur Einbindung dieses Düngerausbringsystems in künftige Verfahren einer rechnergestützten Abwicklung der Bestandesführungsmaßnahmen

erfüllt werden können.

Werden gleichzeitig mehrere Einzelnährstoffkomponenten dem Mischorgan zugeleitet und geschieht dies kontinuierlich mit einem konstanten Verhältnis der Einzelnährstoffkomponenten, so ist unter Berücksichtigung aller vorher dargestellten Ergebnisse zu erwarten, daß dieses Verhältnis auch in den kleinsten Teilmengen, die unter den Ausläufen aufgefangen werden, identisch ist. Es gilt dann für diese Teilmengen, daß der Zustand der idealen Mischung innerhalb dieser Teilmengen und in deren Gesamtheit, also dem Massenstrom in den beiden Ausläufen erreicht ist.



Selbstverständlich werden die Konzentrationen der Teilmengen um diese ideale Sollwertkonzentration streuen. Je geringer die Streuung, desto höher ist die Mischgüte. Sie kann durch die Abweichung und die Standardabweichung in einfacheren Untersuchungen oder durch den Varationskoeffizienten als relatives Maß in umfangreicheren Versuchsserien mit voneinander unterschiedlichen Mittelwerten ausgedrückt werden. Da es aber für die Mischgüte unbedeutend ist, ob die Konzentration der Probe nach oben oder nach unten abweicht, bedient sich die Verfahrenstechnik häufig der mittleren quadratischen Abweichung als Mischgütemaß für die Beurteilung von Feststoffmischern, die in der Statistik meist als Varianz bezeichnet wird [78, 79, 80].

### **5.1 Praxisorientierte Anforderungen an die Düngermischungen**

Die Durchführbarkeit dieses Versuches unterlag wesentlichen Einschränkungen, die sowohl die Anzahl der Versuchsvarianten als auch der Wiederholungen begrenzten:

1. Zur Standardisierung des Versuches und seiner Vergleichbarkeit war die chemische Analytik der Einzelproben gemäß dem Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 213 vom 22.08.1977 durchzuführen. Die Anwendbarkeit erstreckt sich auf die im Anhang I der Richtlinie 76/116/EWG des Rates vom 18. Dezember 1975 aufgeführten Ein- und Mehrnährstoffdünger. Die Einzelproben wurden auf ihren Gehalt an Gesamtstickstoff (N), Gesamtphosphorsäure ( $P_2O_5$ ), und Kali ( $K_2O$ ) hin untersucht. Diese Untersuchungen sind zum einem sehr zeitaufwendig und zum anderen mit hohen Kosten verbunden.
2. Die Versuchsdurchführung sollte aufgrund dieser Einschränkungen nicht den grundsätzlich theoretischen Schemata des Versuchswesens folgen, sondern verfahrenstechnisch auf die notwendigen Einsatzschwerpunkte in der landwirtschaftlichen Praxis zugeschnitten sein.

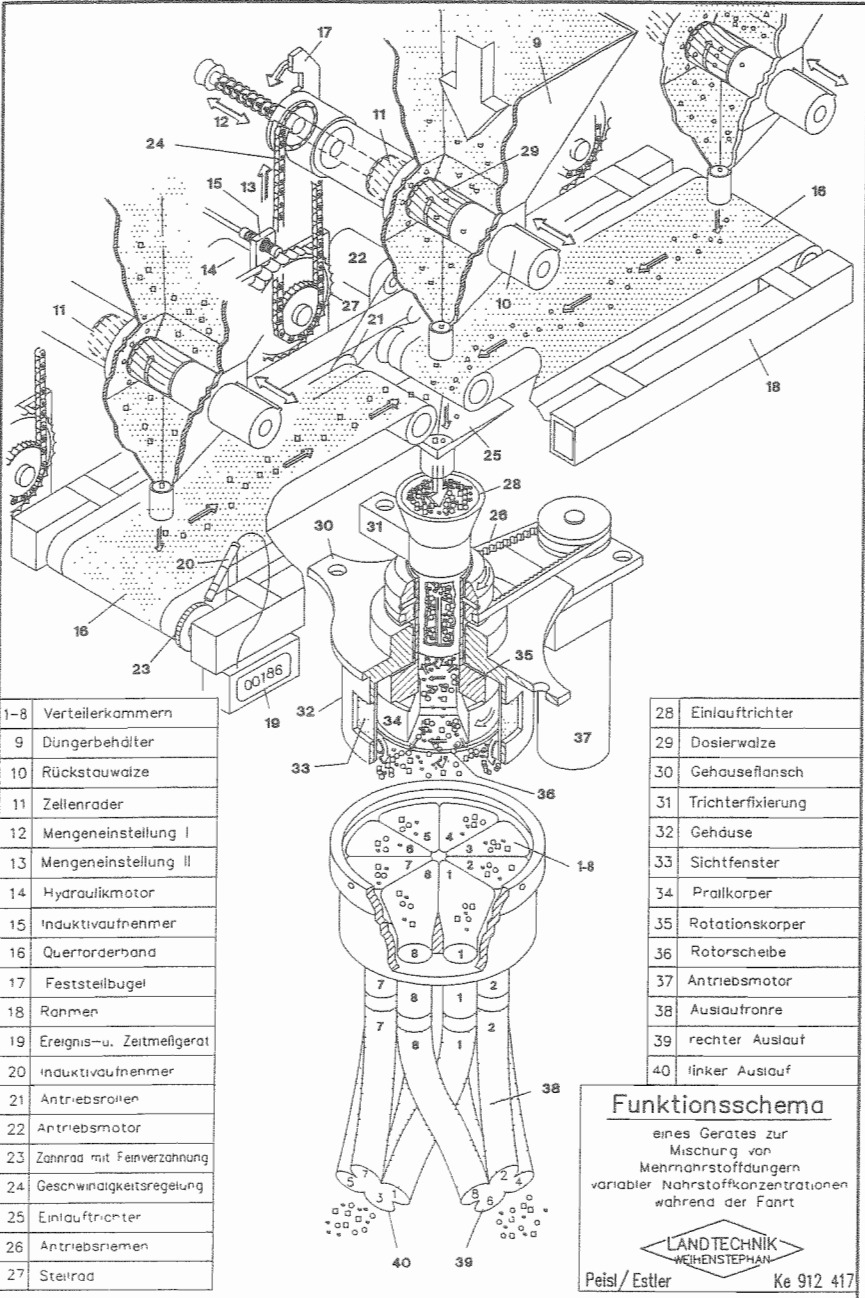
Wegen dieser Einschränkungen des Gesamtprobenumfangs mußten Varianten ausgewählt werden, die den Bedarf der landwirtschaftlichen Praxis hinreichend repräsentieren, also dem Anwender situatives Handeln ermöglichen, gleichzeitig aber sicherstellen, daß Einsatzgrenzen des Gesamtsystems über das breite Spektrum seiner Einstellungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Nach eingehender Diskussion dieser Problematik mit Experten aus dem Bereich Pflanzenbau und Pflanzenernährung konnte eine Reihe von Varianten definiert werden, durch die alle notwendigen und kritischen Einsatzbereiche erfaßt werden.

## **5.2 Versuchsaufbau zur mobilen Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen**

Aufbauend auf die bisher durchgeführten Versuche zur Auswahl und Optimierung der diversen Baugruppen, ergibt sich für die Versuche zur mobilen Herstellung von Düngermischungen variabler Nährstoffanteile das in Abbildung 60 dargestellte Gesamtsystem. Bis zum Einsatz in den verfahrenstechnischen Mischversuchen waren hiermit bereits 500 Betriebsstunden störungsfrei absolviert.

Die höchsten Anforderungen an dieses Gerät stellt die Grunddüngung, weil dabei in der Regel (die Schaukeldüngung bildet eine Ausnahme) die drei Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kali gemeinsam ausgebracht werden, wogegen die Kopfdüngung meist ausschließlich mit Stickstoff erfolgt. Deshalb wurde als Aufgabengstellung die Grunddüngung eines fiktiven Schrages mit sieben Teilflächen individuellen Nährstoffbedarfes definiert. Das Gesamtsystem mußte in der Lage sein, ein breites Spektrum an variablen Nährstoffkonzentrationen bereitzustellen. Um die Anforderungen an das Gerät aufzuzeigen wurden in Abbildung 61 die Regelstrecken der einzelnen Dosierorgane für die Versorgung der sieben Teilflächen dargestellt.

Abgeleitet aus den Erfahrungen des Pflanzenbaues und der Pflanzenernährung beschreibt die erste Variante, dargestellt durch die Teilfläche mit der Nummer 1, eine



1-8	Verteilerkammern
9	Düngerbehälter
10	Rückstauwalze
11	Zellenrader
12	Mengeneinstellung I
13	Mengeneinstellung II
14	Hydraulikmotor
15	Induktivaufnehmer
16	Querrörderband
17	Feststellbügel
18	Rannen
19	Ereignis- u. Zeitmeßgerät
20	Induktivaufnehmer
21	Antriebsrollen
22	Antriebsmotor
23	Zahnrad mit Fernverzahnung
24	Geschwindigkeitsregelung
25	Einlauftrichter
26	Antriebsriemen
27	Steinrad

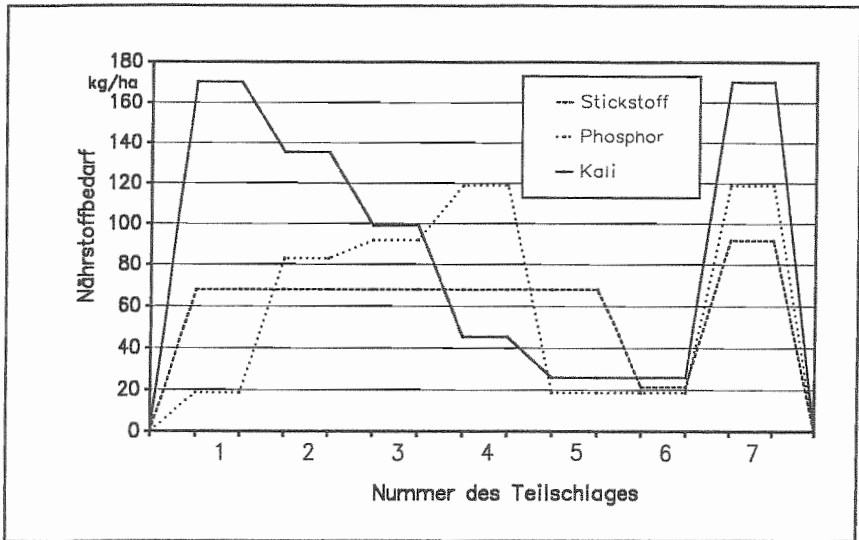
28	Einlauftrichter
29	Dosierwalze
30	Gehäuseflansch
31	Trichterfixierung
32	Gehäuse
33	Sichtfenster
34	Prallkörper
35	Rotationskörper
36	Rotorscheibe
37	Antriebsmotor
38	Auslauftrone
39	rechter Auslauf
40	linker Auslauf

**Funktionsschema**  
 eines Gerates zur  
 Mischung von  
 Mehrnährstoffdüngern  
 variabler Nährstoffkonzentrationen  
 während der Fahrt

**LANDTECHNIK**  
 WEHNSTEFHAN

Peisl/Estler Ke 912 417

Abbildung 60: Versuchsaufbau zur Durchführung der Mischversuche.



**Abbildung 61:** Regelstrecken des Gesamtsystems im Verlauf von sieben Teilflächen unterschiedlichen Nährstoffbedarfes während der Überprüfung von Mischung und Zuteilung.

Situation, in der aufgrund von Kalimangel eine sehr hohe  $K_2O$ -Gabe (170 kg/ha) verabreicht wird. Extrem gegensätzlich ist dazu die sehr geringe  $P_2O_5$ -Gabe (circa 20 kg/ha), aufgrund eines fiktiv hohen Phosphatgehaltes des Bodens. Während dieser Phase soll eine praxisübliche Stickstoffgabe im Bereich von 70 kg/ha gegeben werden. In dieser Mischung liegt der Anteil des Kompaktates deutlich über dem der Granulate. Dadurch könnten Verdrängungseffekte aufgedeckt werden.

Im weiteren Verlauf geht bis zur Probenziehung der zweiten Variante das Kali anteilig zurück, während das Phosphat überproportional ansteigt. Der Stickstoff bleibt als Referenz unverändert. Dadurch erreicht der Anteil der beiden Granulate die gleiche Höhe wie der des Kompaktates. Gleichzeitig kehrt sich das Verhältnis zwischen den beiden Granulaten um.

In der dritten Variante liegt die Summe der Masse der Granulate über der des Kompaktates. Phosphor und Kali liegen auf gleichem Niveau. Die Unterschiede in der Dosierung der drei Nährstoffe sind nur gering.

Durch den Übergang zur vierten Variante erfolgt die Umkehr der Nährstoffverhältnisse. Die Konzentrationen gehen wieder weiter auseinander. Das Kompaktat wird mit etwa 45 kg/ha dosiert. Das Phosphat liegt mit 120 kg/ha an seinem aus der landwirtschaftlichen Praxis abgeleiteten Höchstwert. Der Stickstoffaustrag bleibt weiterhin unverändert. Die Gesamtmasse der Granulate ist jetzt viermal so hoch, wie die des Kompaktates.

Die Variante 5 führt zu einer weiteren Umkehr des Nährstoffverhältnisses, bei gleichzeitigem Rückgang der Gesamtausbringung. Kali und Phosphor werden mit geringer und Stickstoff mit weiterhin unveränderter Dosierung zugemischt. In der Variante 6 wurden alle drei Nährstoffe mit geringem in Variante 7 mit hohem Austrag dosiert. Die Nährstoffverhältnisse lagen in Variante 6 sehr eng zusammen und wurden in Variante 7 wieder aufgeweitet.

Durch die Abarbeitung dieser fiktiven Teilflächen waren die für die Praxis wichtigsten Nährstoffverhältnisse erfaßt. Sämtliche Zwischenstufen sind vom Gesamtsystem realisierbar, ohne daß dabei der Regelprozeß an seine Grenzen stößt. Die Einstellungen der sieben Varianten konnten mit Dosierorgandrehzahlen von 10 bis 25 1/min ausgeführt werden.

Die Zellenradposition lag meist im günstigeren Bereich mit Werten von 4, 6 und 8. In den Varianten 5 und 6 wurde jedoch die Zellenradposition bei Kali auf 2 gesetzt und mit der Dosierorgandrehzahl von 25 1/min kombiniert. Im Gegensatz dazu wurde Phosphat bei einer Zellenradposition von 4 mit einer Dosierorgandrehzahl von 10 1/min ausgetragen. Dadurch sollte geklärt werden, wie stark die Einstellung von Dosierorganen in kritischen Grenzbereichen die Varianz des Gesamtsystems je Einzelnährstoffkomponente in dieser Variante beeinflussen kann.

Zur Erfassung einer signifikanten Streuung um die Mittelwerte war es erforderlich, das Zeitintervall der Probenziehung und damit die kleinstmögliche Teilmenge auf ein Mindestmaß zurückzuführen. Dabei wirkten zwei Forderungen begrenzend:

1. Die Durchführbarkeit der chemischen Analyse war erst ab einer Einzelprobengröße von etwa 100 g gesichert. Jede Probe mußte auf die Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kali untersucht werden. Das entspricht drei getrennten Analysen.
2. Für den Einschub der Auffanggefäße durfte nicht zu wenig Zeit angesetzt werden, um Reaktionszeiten bei der Probenahme als zusätzliche Fehlerquelle auszuschalten. Andererseits sollte zwischen den Probenahmen nicht zu viel Zeit verstreichen, um die physikalischen Einflüsse durch System oder Rohmaterial auszuschließen.

Für diesen Versuch wurde in Absprache mit dem chemischen Labor der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg und dem Lehrstuhl für Maschinen- und Apparatekunde der Technischen Universität München das Meßintervall auf sechs Sekunden festgesetzt. Jede Variante wurde sechsmal wiederholt. Dabei wurden jeweils zwei Proben, eine unter dem linken und eine unter dem rechten Auslauf gezogen. Dadurch standen für die Bewertung einer Einstellungsvariante jeweils zwölf Analyseergebnisse zur Verfügung, aus denen die empirische Varianz für die Streuung um die Sollwertkonzentration jedes einzelnen Nährstoffes errechnet wurde. Nach der Probenahme wurden die Einzelprobengewichte als Referenz ermittelt.

Die chemische Analyse weist den relativen Anteil (%) der Einzelnährstoffkomponente an der Gesamtprobe aus. Werden die Proben auf den Gehalt mehrerer Einzelnährstoffkomponenten untersucht, so werden die relativen Anteile an dem Gesamtprobengewicht durch das Nährstoffverhältnis oder die Nährstoffformel ausgedrückt. Sie wird in der Regel von der Sollformel abweichen. Aus diesen Abweichungen kann das

Streuungsmaß errechnet werden. Am zuverlässigsten ist diese Information, wenn diese Berechnungen für jeden Nährstoff einzeln durchgeführt werden.

Die chemische Analytik hat je nach zu untersuchendem Einzelnährstoff unterschiedliche Analysentoleranzen. Sie liegen bei den drei Hauptnährstoffen zwischen 0,15 und 0,30 % und könnten sich im Gesamtnährstoffverhältnis gerichtet addieren und die Versuchsaussage verfälschen.

Deshalb wurden die Analysenergebnisse für Stickstoff, Phosphor und Kali getrennt ermittelt und die empirische Varianz als Maß für die Mischgüte errechnet. Da in den durchgeführten Versuchen die errechnete empirische Varianz das Ergebnis nicht nur des Mischers, sondern auch der davorliegenden Dosier- und Fördereinrichtung ist, kann im weiteren nur die empirische Varianz des Gesamtsystems betrachtet werden.

### **5.3 Ergebnisse der Mischung von Einzelnährstoffkomponenten**

Die mittleren Austragsmengen der sieben Varianten mit den Varianzen für die Einzelnährstoffe sind in der folgenden Grafik dargestellt (Abb. 62). Die Varianz nimmt Werte im Bereich von  $10^{-2}$  an. Sie hält ihr Niveau für jeden Einzelnährstoff über den gesamten Versuchsverlauf. Lediglich in der 6. Einstellung ist ein Anstieg der Varianz zu verzeichnen. Dieser nachteilige Einfluß auf das Ergebnis ist auf den bereits dokumentierten Anstieg des Streuungsmaßes durch eine Reduktion des Kammervolumens bei Zellenradpositionen für geringe Austragsmengen zurückzuführen (Kapitel 4.2.2.2, Abb. 36 und Abb. 37).

Genau das Gegenteil wird in der 7. Einstellung deutlich. Dem Rückgang des Streuungsmaßes durch Erhöhung des Volumens der Dosierorgankammern, entspricht ein Rückgang der Varianz.

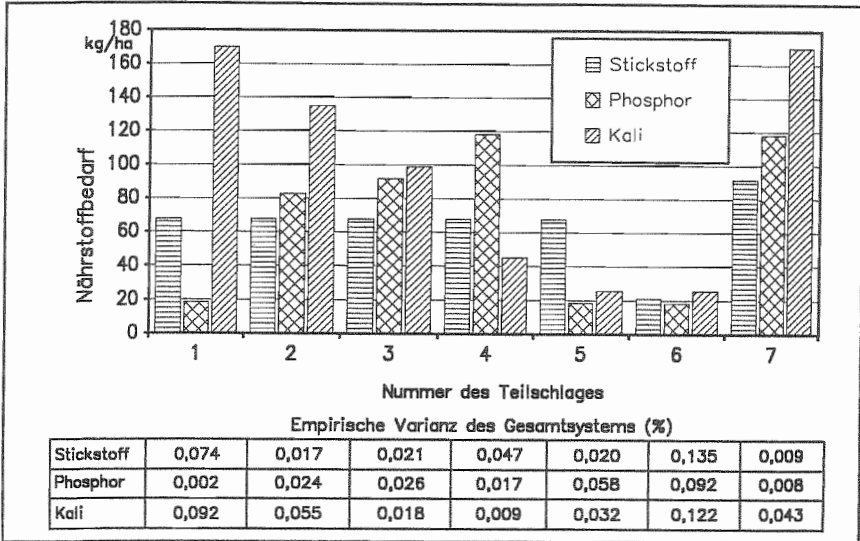


Abbildung 62: Empirische Varianz des Gesamtsystems je Einzelnährstoff unter sieben definierten Varianten oder Teilflächen.

Aufbauend auf diese Zusammenhänge, muß das Ergebnis der Mischversuche dahingehend relativiert werden, daß die Analysentoleranzen von bis zu 0,3 %, das Streuungsmaß für die Dosierung der Einzelnährstoffkomponenten, sowie die herstellungsbedingten Schwankungen der chemischen Konzentration des Einzelnährstoffes die Mischgüte limitieren.

Aus diesem Grund kann die Mischgüte unter diesen Bedingungen nicht als repräsentativ für das Mischorgan gewertet werden. Sie kann durchaus wesentlich besser sein, als durch diese Versuche gezeigt werden konnte. Sie ist aber vor dem verfahrenstechnischen Hintergrund der landwirtschaftlichen Praxis zu sehen und entsprechend realistisch einzuordnen. Das heißt, die für Regelprozesse in der Außenwirtschaft zulässigen Abweichungen von maximal 3 % vom voreingestellten Sollwert, sollten auch für diese Versuche als Richtwert angesetzt werden.



Eine Vergleichsmöglichkeit bietet sich durch die chemisch und technisch aufwendig hergestellten homogenen Mehrnährstoffdünger oder Voldünger mit fester Nährstoffkonzentration. Die Auswertungen von Kontrolluntersuchungen, die gesetzlich angeordnet sind, ergaben umgerechnet auf drei Einzelnährstoffe ebenfalls empirische Varianzen in der Größenordnung von  $10^{-2}$  %. Das bedeutet, daß beide Herstellungsverfahren qualitativ vergleichbar sind.

Ein weitaus bedeutenderes Kriterium für die Beurteilung der Mischergebnisse sind die in der Düngemittelverordnung festgeschriebenen Toleranzen für Mehrnährstoffdünger. Sie sind natürlich ebenfalls auf die dezentral hergestellten heterogenen Dünger anzuwenden, auch wenn diese in ihrer Zusammensetzung stark schwanken können. Der Vergleich zeigt, daß bezogen auf die Einzelnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kali die Abweichungen um den Faktor 5 unter den gesetzlich festgesetzten Grenzen lagen (Tab. 6).

**Tabelle 6:** Gesetzlich zulässige und vom Gesamtsystem erreichte Abweichungen.

Nährstoff	Stickstoff	Phosphor	Kali	Gesamt
Gesetzlich	-1,1 / --	-1,1 / --	-1,1 / --	-1,9 / --
System	-0,2 / +0,2	-0,1 / +0,2	-0,2 / +0,3	-0,5 / +0,7

Für den Gesamtnährstoffgehalt gilt, daß nur etwa ein Viertel des zulässigen Toleranzbereiches in Anspruch genommen wurde. Damit sind die gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Abweichungen der Nährstoffe von der Sollwertkonzentration erfüllt.

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Als Hauptziel der Düngerverteiltechnik ist die gleichmäßige Versorgung der einzelnen Pflanzen mit den für sie lebensnotwendigen Nährstoffen anzusehen. Auch wenn diese Versorgung teilflächenspezifisch sehr unterschiedlich sein kann, ist innerhalb der Teilfläche nach wie vor eine exakte Längs- und Querverteilung sowie das exakte Einhalten der jeweils erforderlichen Nährstoffmengen sicherzustellen. Um beides zu erzielen, ist für einen gleichmäßigen Massenstrom der Einzelnährstoffkomponenten für deren verzögerungsfreie kontinuierliche Mischung und gleichmäßige Verteilung auf die Teilbreiten Sorge zu tragen.

Diese Anforderungen sind auch dann zu erfüllen, wenn dies durch unterschiedliche physikalische Eigenschaften der Mischungspartner aufgrund der vielschichtig diskutierten Entmischungproblematik erschwert wird. Eine Anpassung der Einzelnährstoffkomponenten, wie sie in den USA aufgrund der langjährigen Erfahrungen im "bulk blending" erfolgreich stattgefunden hat, scheint hierzulande utopisch. Dieser Nachteil ist durch eine künftige Verteiltechnik auszugleichen.

An ausgewählten Einzelnährstoffkomponenten unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften, die für die dezentrale und mobile Nährstoffversorgung künftig vornehmlich in Frage kommen, wurde deshalb geprüft, ob sich die aus der Verfahrenstechnik bekannten Imponderabilien hinsichtlich ihrer Bevorratung bei Transport, Dosierung, Förderung und Mischung beherrschen lassen. Nur dann ist Umsetzung der Teilflächendüngung auf der Basis eines Mehrkammersystems realisierbar.

Die Ergebnisse der zunächst durchgeführten Vorratsbehälterauslaufversuche machen deutlich, daß bereits die Art und Weise des Befüllens und der Entleerung von Schrägbodenbehältern mit Einzelnährstoffkomponenten, je nach deren physikalischen Eigenschaften, einen wesentlichen Einfluß auf die Erzeugung gleichmäßiger Massenströme ausübt. Führt die Befüllung der Vorratsbehälter durch eine Schüttkegelbildung zur Entmischung nach Korngrößen, lagern sich größere und rieselfähigere

Partikel im Kegelmantel und kleinere oder sperrige im Kern des Kegels ab. Beim nachfolgenden Austragen des Schüttgutes kommt es daraufhin häufig zu Veränderungen des Massenstromes vom Beginn bis zum Ende des Auslaufens.

Darüberhinaus zeigte sich, daß diese Massenstromveränderungen mit einer Erhöhung der Förderrate in der Regel zunehmen. Damit kommt auch dem Füllgrad eine hohe Bedeutung zu, weil durch ihn der gesamte Auslaufzeitraum, über den Massenstromänderungen möglich sind, eingegrenzt wird. Häufig sind die demnach auftretenden Schwierigkeiten, wie sie durch die Entmischung im Schüttkegel, den Kernfluß, die Förderrate, den Füllgrad und die physikalischen Eigenschaften der Granulate entstehen, ursächlich für die falsche Kalibrierung von Düngerstreuern und deren elektronischen Regeleinrichtungen. Eine unbefriedigende Ausbringung der Nährstoffe ist die Folge.

Erst die Kenntnisse dieser Probleme und das Realisieren wirksamer Gegenmaßnahmen können die notwendigen Voraussetzungen für die Erzeugung gleichmäßiger Massenströme schaffen. Dabei sind im wesentlichen die Auswahl geeigneter Vorratsbehälter zum Beispiel mit eingebauten Trennblechen zur Vermeidung der Schüttkegelbildung und des Kernflusses bei gleichzeitiger Förderung des günstigeren Massenflusses sowie eine flexible Führung des Gutstromes während der Befüllung zu nennen.

Der im weiteren Verlauf notwendige, kontinuierliche Massenstrom wurde durch eine prozessorgesteuerte Schubraddosierung erzeugt. Die Ergebnisse zeigten, daß die Solldrehzahlen exakt eingehalten werden konnten. Allerdings war die Dosiergenauigkeit wieder in Wechselwirkung zu den verwendeten Einzelnährstoffdüngern zu sehen. So waren Dünger mit glatter Oberfläche oder einheitlichen Korngrößen erwartungsgemäß mit höherer Genauigkeit zu dosieren als diejenigen mit kantigen oder rauen Partikeln.

In den Versuchen zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit wurde auch der Einfluß der Förderrate untersucht. Innerhalb der zulässigen Grenzen waren weniger die

Änderungen der Drehzahl als vielmehr die Änderungen des Kammervolumens der Grund für eine geringfügige Zunahme des Streuungsmaßes. Zu geringes Kammervolumen führt zu einer Abnahme des Füllgrades und erhöht so den Dosierfehler.

Insgesamt wurden jedoch günstige Streuungsmaße festgestellt, die deutlich unter den in einschlägigen Geräteprüfungen geforderten Schwellenwerten lagen. Dennoch können die auftretenden Dosierfehler auch als Ursache dafür gewertet werden, daß die Auslegerstreuer bei Überprüfungen der Querverteilung nur unwesentlich besser abschneiden als Wurfstreuer, weil die Querverteilung letztendlich auch von einem gleichmäßigen Massenstrom abhängt.

Ein weiteres Ziel war die Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Massenflusses auf seinem Weg zum zentral gelegenen Misch- und Zuteilorgan. Mit querliegenden Förderbändern konnte eine gleichmäßige, schonende und zügige Beschickung erzielt werden. Der Zeitbedarf lag deutlich unter einer Sekunde und wurde dennoch nicht mit einer Energieübertragung auf die Mischungspartner erkauft, die Abrieb oder Erhöhung des Bruchkomanteiles zur Folge gehabt hätte.

Die gemessenen Gleichlaufschwankungen lagen unter 1 % und waren damit so gering, daß sie vernachlässigt werden konnten. Im Vergleich mit konkurrierenden Förder- einrichtungen, wie zum Beispiel Förderschnecken haben sich die Förderbänder auch hinsichtlich ihrer raschen Selbstreinigung und hohen Laufkultur bewährt.

Die zentral angeordnete Mischung und Zuteilung der Einzelnährstoffkomponenten sollte mit einem kontinuierlich und verzögerungsfrei arbeitenden Radialverteilsystem gelöst werden, das in diesen Untersuchungen die zugeführten Mischungspartner auf acht radial angeordnete Kammern zu gleichen Mengen verteilt. Der Anwendung dieses Prinzips liegt der Gedanke zugrunde, daß eine ideale Mischung durch bestmögliche Homogenität definiert ist. Dementsprechend sind in den kleinsten Teilmengen die Mischungspartner in einem vorgegebenen Verhältnis zueinander enthalten. Durch eine

gleichmäßige und kontinuierliche Zuteilung der ankommenden Mischungspartner ist diese Bedingung erfüllt.

Allerdings stellte sich die gewünschte mengengleiche Zuteilung auf die einzelnen Kammern zunächst nicht ein. Unkontrollierbare Einflüsse störten während der Radialverteilung die Aufteilung des Düngerstromes in gleichgroße Teilmengen. Auffällig war dabei, daß die Zuteilung auf die einzelnen Kammern nicht nur einem systematischen Fehler unterlag, sondern zudem den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Mischungspartner unterworfen war. Dabei war bereits unter einfachen Versuchsbedingungen im ebenen und erschütterungsfreien Betrieb die Einhaltung einer hohen Mischgüte in Frage gestellt. Unter simuliertem Hangeinfluß kam es zu einem Anstieg der Fehler bei der Zuteilung auf die einzelnen Kammern, die nicht mehr toleriert werden konnten.

Diesen Ergebnissen nach zu urteilen, erscheint es angebracht, den scheinbar erfolgreichen Einsatz dieser Technik im Feldversuchswesen beispielsweise bei Sortenversuchen kritisch zu beurteilen. Insbesondere bei solch bedeutenden Untersuchungen hätten Abweichungen in der Zuteilung festgestellt werden müssen.

Durch eine Analyse der auf die im Rotor befindlichen Düngerpartikel wirkenden Kräftekomponenten gelang es einen Weg aufzuzeigen, mit dem schließlich doch die gewünschte Gleichmäßigkeit in der Verteilung erzielt wurde. Erst nachdem technische Verbesserungen in Form einer kreuzweisen Zusammenführung der Verteilkammern zum linken und rechten Auslauf eingebracht wurden, war es möglich die Einzelnährstoffkomponenten entsprechend der Zielsetzung mengenidentisch und sicher auf die beiden Ausläufe zu verteilen.

Dabei war es jetzt nicht mehr von Bedeutung, welche Düngerform zur Anwendung kam. Zusätzlich konnte anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nachgewiesen werden, daß eine Veränderung des Neigungswinkels oder der Förderraten keinen

Einfluß ausübt. Damit waren die Voraussetzungen für die verfahrenstechnisch orientierten Mischversuche geschaffen.

Deren Ergebnisse zeigten, daß mit dieser Methode der entscheidende Durchbruch gelungen war. Die aus mehreren Einzelnährstoffkomponenten im mobilen Einsatz hergestellten Mischdünger sind den mit chemisch-technisch hohem Aufwand erzeugten Mehrnährstoffdüngern qualitativ durchaus vergleichbar. Die Schwierigkeit nach der Mischung und Zuteilung auf die Teilbreiten besteht lediglich darin, während der nachfolgenden Querverteilung eine Entmischung wirksam zu verhindern.

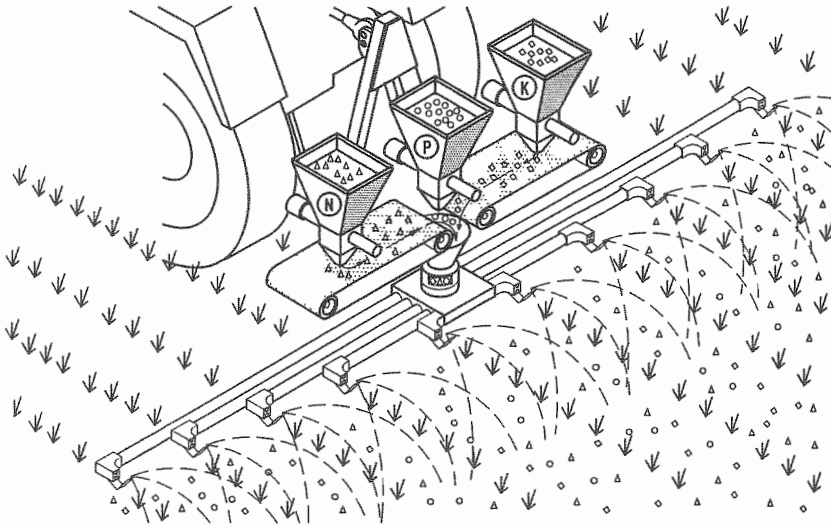
## **7 Verfahrenstechnische Einordnung und weiterführende Arbeiten**

Je umfangreicher die Kenntnisse über die Teilflächen und deren bodenspezifische Kenndaten, je dringlicher die Problematik der unerwünschten Stoffeinträge und je prekärer die wirtschaftliche Situation in der Landwirtschaft werden, desto deutlicher wird der Handlungsbedarf, diejenigen Techniken verfügbar zu machen, die es erlauben, die Kulturpflanzen individuell mit Nährstoffen zu versorgen. Vorgefertigte Düngerrezepturen führen in eine ökologische und ökonomische Sackgasse.

Nur die dezentrale Herstellung von Düngermischungen kann der Variabilität der Böden und den aus ihr abgeleiteten Erfordernissen hinsichtlich einer teilflächenbezogenen und entzugsorientierten Nährstoffversorgung gerecht werden. Doch damit kann nicht das Düngermischen in stationären Anlagen gemeint sein. Zwar erlaubt diese Art der Düngerherstellung immerhin, daß ein Betrieb entsprechend seiner Bodenuntersuchungsergebnisse nur noch die notwendigen Nährstoffmengen bezieht, sie ist aber wegen ihrer Entmischungsprobleme insbesondere beim Transport von der Mischanlage zu den Flächen und bei der Verteilung während der Ausbringung derart ins Kreuzfeuer geraten, daß sie infolgedessen sogar jeden Ansatz zu einer Weiterentwicklung der Technik oder auch der Eigenschaften der Dünger durch die chemische Industrie verhindert hat.

Aus verfahrenstechnischer Sicht kann nur die aus Einzelnährstoffkomponenten mobil hergestellte heterogene Mehrnährstoffdüngermischung mit variablen Nährstoffanteilen, wie sie in Abbildung 63 am Beispiel eines Mehrkammerdüngerstreuers schematisch dargestellt ist, die Forderungen erfüllen, die an die Düngerapplikation künftig gestellt werden. Sie muß "intelligente Technik" sein, die sich in Prozeßsteuerungs- und Managementsysteme integrieren läßt, die bedarfsgerechte und teilschlagsspezifische Düngung ermöglicht und dadurch neue Perspektiven in der Bestandesführung eröffnet.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Technik erfüllt zuverlässig die aus der Zielsetzung abgeleiteten Forderungen. Als Beispiel sei die hohe Reaktionsgeschwindigkeit bei einer



**Abbildung 63:** Mehrkammerdüngestreuer

Veränderung der Mischung und/oder der Ausbringmenge angeführt. Für die Dosierung reichen etwa zwei Sekunden aus. Die interne Förderung sowie die Mischung und Zuteilung nehmen durch ihr kontinuierliches Funktionsprinzip kaum mehr als 1 s in Anspruch. Demnach arbeitet das System insgesamt sehr zügig.

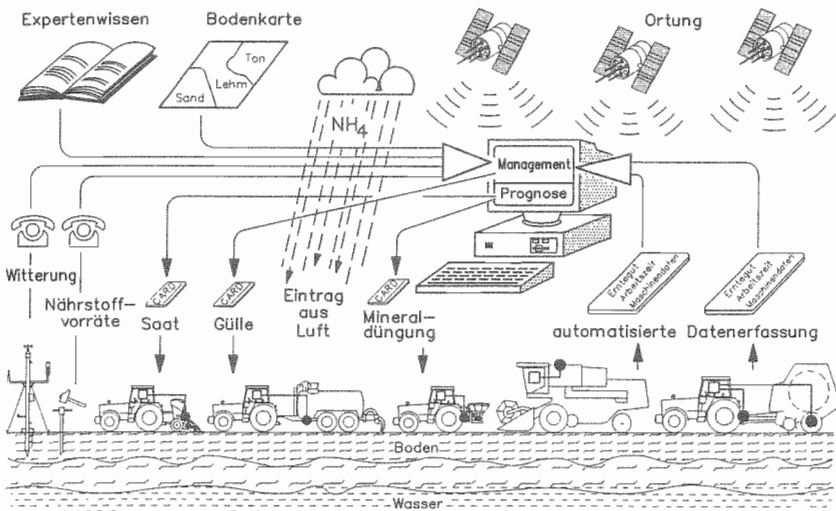
Eine Fahrgeschwindigkeit von etwa 6 km/h unterstellt, wird für die Einstellung auf einen neuen Nährstoffbedarf lediglich eine Fahrstrecke von circa 5 m benötigt. Ein Vergleich mit Untersuchungen zum Einsatz von Direkteinspeisungssystemen in Pflanzenschutzgeräten zeigt, daß diese im Gegensatz dazu für den Auf- und Abbau biologisch wirksamer Präparatekonzentrationen bei der gleichen Fahrgeschwindigkeit, je nach Wasseraufwandmenge, zwischen 15 und 120 m benötigen [64, 65].

Die Düngetechnik schneidet somit hier deutlich besser ab. Dabei werden, wie die Ergebnisse der Mischversuche zeigten, die Nährstoffvorgaben exakt eingehalten und Bedarfsänderungen gegeneinander scharf abgegrenzt. Letzteres ist auf die hohe



Reaktionsfähigkeit und die gleichmäßige kontinuierliche Verfahrensweise zurückzuführen, wodurch eine axiale Verschleppung der Materialströme beziehungsweise bestimmter Fraktionen davon ausgeschlossen wird.

Die hohe Reaktionsfähigkeit und die Kalkulierbarkeit der Laufzeiten in den einzelnen Baugruppen des Systems sind die wesentlichen Voraussetzungen für eine Einbindung in computergesteuerte Regelsysteme. In Kombination mit der zur Steuerung der Dosierorgane zu verwendenden Regelungstechnik wird dieses System ein Teil intelligenter Technik sein, wie sie von AUERNHAMMER [6] im rechnergestützten Regelkreis einer "umwelt- und ertragsorientierten Düngung" gefordert wird (Abb. 64).



**Abbildung 64:** Technik im rechnergestützten System einer "umwelt- und ertragsorientierten Düngung" (nach AUERNHAMMER, 1992).

Dieser Regelkreis betrachtet zunächst die teilflächenspezifischen Outputgrößen (z.B. Ertrag als Maß für den Nährstoffentzug durch die Pflanzen) und legt diese nach Menge (dynamische Ertragsermittlung), Ort und Zeit (Global Positioning System - GPS) in der

Informationszentrale (Betriebsrechner) ab. Mit Hilfe weiterer Informationen über den Standort (Bodenkarten) und die Witterung (lokale Wetterstation) können mit dem entsprechenden Expertenwissen Prognosen und, nach deren Überprüfung im Gelände, teilflächenspezifische Düngerbedarfsmengen als Vorgabe für die Applikationstechnik errechnet werden. Für jede Technik innerhalb dieses Regelkreises gilt es, gewisse Mindestanforderungen zu erfüllen.

Durch die Ergebnisse der verfahrenstechnischen Untersuchungen mit den für die Landwirtschaft praxisrelevanten Mischungsverhältnissen konnte nicht nur die Realisierbarkeit dieses Verfahrens aufgezeigt werden. Die chemisch - analytischen Untersuchungen führten zudem zu der Erkenntnis, daß bei der mobilen Herstellung von Düngermischungen mit variablen Nährstoffanteilen die gesetzlichen Grenzwerte für Mehrnährstoffdünger eingehalten werden können.

Das nächste Ziel muß die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die landwirtschaftliche Praxis sein. Aus landtechnischer Sicht ist diese applikationstechnische Lücke im derzeitigen Wissensstand geschlossen. Die Ausbringtechnik allein kann jedoch die Aufgabe der teilflächenbezogenen Düngung nicht bewältigen. Die Möglichkeiten dieser Technik werden nur ausgeschöpft werden können, wenn es gelingt, zusammen mit den benachbarten Disziplinen des Pflanzenbaues und der Pflanzenernährung etc. die notwendigen Informationen bereitzustellen, mit deren Hilfe dieses Gerät wirkungsvoll im Sinne ökologischer, aber auch ökonomischer Anforderungsprofile eingesetzt werden kann.

Ohne umfassende Informationsverarbeitung kommt intelligente Technik nicht aus. Im vorliegenden Fall ist damit die teilflächenspezifische Erfassung aller Einflußparameter auf die Nährstoffverfügbarkeit und den Nährstoffentzug gemeint. Auch wenn an der diffizilen Arbeit im Gelände zunächst kein Weg vorbeiführt und die Entscheidungen, die zur bedarfsgerechten Versorgung der Teilflächen mit Einzelnährstoffen führen, mit der Zunahme an Erkenntnissen immer schwieriger zu werden drohen.

## **8 Zusammenfassung**

Aus aktueller Sicht muß die Landwirtschaft der Forderung nachkommen, Betriebsmittel einzusparen und zugleich problematische Stoffeinträge zu minimieren. Boden- und Nährstoffkartierungen haben gezeigt, daß Flurstücke nicht als homogen, sondern aufgrund der hohen Variabilität ihrer Böden als heterogen angesprochen werden müssen.

Die bisher übliche, einheitliche Düngung eines Schrages kann diesen Ansprüchen trotz ihrer anfänglichen Erfolge in der Düngeplanung heute nicht mehr gerecht werden. Denn sie bewirkt Verluste in zweierlei Hinsicht: Auf Teilflächen geringerer Ertragserwartung kann das überschüssige Nährstoffangebot von den Pflanzen nicht mehr verwertet werden. Die Folge sind ökologisch relevante Nährstoffauswaschungen und ökonomisch nicht mehr vertretbare Verluste an Betriebsmitteln. Auf Teilflächen mit hoher Ertragserwartung dagegen führt eine unzulängliche Nährstoffversorgung dazu, daß das Ertragspotential nicht entsprechend der Produktionsfunktion an dieser Stelle bis zum Optimum ausgeschöpft werden kann. Zusätzlich verarmen die Böden an meist auch strukturerhaltenden Nährstoffen.

Dieses eindrucksvolle Beispiel zeigt, wie wichtig es ist, ökologische und ökonomische Interessen in Einklang zu bringen. Das gelingt jedoch nur, wenn die Schwankungen der ertragsrelevanten Parameter durch eine ebenso dynamische Einzelnährstoffapplikation kompensiert werden können.

Zunächst gilt es, alle wesentlichen Ertragseinflußgrößen zusammenzutragen und durch digitale Bodeninformationssysteme für die Berechnung des teilflächenspezifischen Düngerbedarfes in der Düngeplanung verfügbar zu machen. Doch wie können die daraus resultierenden individuellen Nährstoffansprüche der diversen Teilflächen gedeckt werden?

Chemisch - technisch auch noch so aufwendig hergestellte Mehrnährstoff- oder Volldünger können diesen Ansprüchen jetzt nicht mehr genügen. Sie sind homogen, das heißt jeder Partikel beinhaltet das im Herstellungsverfahren voreingestellte Verhältnis an Einzelnährstoffen. Damit gleichen sie vorgefertigten Rezepturen, die zwar bezüglich ihrer Manipulation beim Transport und bei der Verteilung Maßstäbe setzten, aber keine uneingeschränkte individuelle Nährstoffanpassung erlaubten.

Durch die Einführung der dezentralen hofnahen Düngermischungen gelang es, die Einzelnährstoffe so zu mischen, daß sie auf den spezifischen Bedarf des landwirtschaftlichen Betriebes abgestimmt werden konnten. Diese dezentral hergestellten Mehrnährstoffdünger waren jedoch heterogen, das heißt jeder Partikel enthält nur einen Nährstoff. Bei der Handhabung dieser Dünger stellte sich bald heraus, daß sie aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften ihrer Einzelnährstoffkomponenten zur unkalkulierbaren Entmischung bei Verlade- und Verteilvorgängen neigten und daher zunächst keine konkurrenzfähige Alternative zu den etablierten homogenen Mehrnährstoffdüngern in Mitteleuropa waren.

Erst durch den Einzug der Elektronik in der Landwirtschaft wurde ein umfassendes Datenmanagement möglich und damit die individuelle bedarfsgerechte Nährstoffversorgung von Teilflächen erneut diskutiert. Diese intelligente Technik fordert neue Verteilstrategien heraus. Deshalb wurden in dieser Arbeit die aus verfahrenstechnischer Sicht an die Mineraldüngerausbringung zu stellenden zentralen Forderungen nach

- individueller Teilflächenversorgung,
- raschem Wechsel der Nährstoffzusammensetzung während der Fahrt unter Einbezug der Entmischungsproblematik,
- schonender Manipulation der Einzelnährstoffkomponenten und
- der Möglichkeit der Einbindung in automatisierte Prozeßsteuerungssysteme

durch die technische Entwicklung eines Gerätes zur mobilen Herstellung von Mehrnährstoffdüngern variabler Nährstoffkonzentration (Mehrkammerdüngerstreuer) realisiert. Der Entwicklungsprozeß konzentrierte sich auf die gezielte Auswahl, Weiterentwicklung und Erprobung der wichtigstens technischen Baugruppen, nämlich der **Vorratsbehälter**, der **Dosierorgane**, des **internen Fördersystemes** und eines **Misch- und Zuteilorganes** zur Aufteilung auf die Teilbreiten.

Die Herstellung der Düngermischungen sollte mit praxisüblichen Einzelnährstoffkomponenten durchgeführt werden. Gleichzeitig mußte gewährleistet sein, daß die verschiedenen, in der Praxis anzutreffenden Düngerformen Granulat, Kompaktat und Prill in die Untersuchungen mit einbezogen waren, um keine Einsatzbeschränkungen vornehmen zu müssen.

Zusammenfassend konnten folgende Ergebnisse erarbeitet werden:

1. Bereits bei ersten Versuchen, mit denen Informationen über die verwendeten Düngerformen während ihres *Auslaufens aus dem Vorratsbehälter* gewonnen werden sollten, zeigte sich, daß der Massenstrom und seine Änderungen wesentlich durch die physikalischen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien bestimmt sind. Die bedeutendste Ursache dafür liegt in einer Entmischung nach Korngrößen im Verlauf der Schüttkegelbildung. Während dieses Vorganges werden größere und rieselfähigere Partikel in Kegelmantel, kleinere und sperrige dagegen im Kern des Kegels angeordnet.

Beim Austrag der verschiedenen Dünger nahm der Massenstrom über die gesamte Laufzeit des Versuches ab. Bei einer Erhöhung der Förderrate wurde zusätzlich eine Erhöhung dieser Massenstromänderungen je Zeiteinheit beobachtet. Besonders ausgeprägt war diese Erscheinung bei der Verwendung von Kali Kompaktat. Aber auch die anderen Düngerformen erschweren durch dieses Verhalten eine ordnungsgemäße Kalibrierung und führen zu Fehlern in der Düngerausbringung.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß zur Durchführung einer ordnungsgemäßen Kalibrierung der Dosiereinheit eine Entmischung im Schüttkegel verhindert werden muß. Wird dieser Aspekt nicht beachtet, so ist die Kopplung jeglicher Dosierorgane mit Prozeßrechnern mit einer nicht zu unterschätzenden Fehlerquelle belastet.

2. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen war zur Erzeugung gleichmäßiger Dosierströme der Einzelnährstoffkomponenten die Auswahl *geeigneter Dosierorgane* von Bedeutung. Diese sollten primär Mengenänderungen rasch umsetzen und anschließend eine gleichmäßige Dosierung einhalten können. Zur Auswahl standen die in der Praxis eingesetzten Schieber- und Zellenraddosierungen.

In beiden Fällen ist während der Fahrt eine Kontrolle des Dosierstromes (Kontrollwiegungen) sehr schwierig, weshalb bei der Einbindung in Prozeßsteuerungssysteme eine Messung der Ausbringungsmenge für den Ist- Sollwertvergleich nur indirekt über Hilfsgrößen stattfinden kann. Diese sind bei der Schieberdosierung die Stellung oder Position des Hubspindelmotors, der den Öffnungsschieber direkt oder indirekt über Zwischenhebel betätigt. Dabei kommt es im praktischen Einsatz häufig zu Problemen mit der Dosiergenauigkeit. Bei der Zellenraddosierung kann dagegen unmittelbar die Drehzahl der Dosierorgane mit Hilfe berührungsloser Näherungsinitaloren (Induktivaufnehmer) sehr einfach gemessen werden und das Ergebnis der Kalibrierung bleibt reproduzierbar.

Deshalb kam bei dem neu entwickelten Mehrkammerdüngerstreuer eine Schubraddosierung zum Einsatz, mit der die Austragsmenge sowohl über die Drehzahl als auch über das Kammervolumen eingestellt werden konnte. Messungen ergaben, daß die Drehzahl mit einem relativen Fehler von  $\pm 1\%$  sehr genau eingehalten werden kann. Insgesamt wird jedoch die Dosiergenauigkeit ungeachtet der zuverlässigen Drehzahleinstellung von der Förderrate, der

verwendeten Düngerform und dem Kammervolumen, mit dem der Austrag erfolgt, beeinflusst.

So werden Dünger einheitlicher Korngrößen mit geringerem Streuungsmaß ausgetragen, als solche mit weiten Korngrößenspektren. Geprillte oder granuliert Dünger mit glatter Oberfläche eignen sich besser für die Dosierung als Dünger mit rauen Oberflächen oder unregelmäßig kantigen Formen. Insgesamt wurden aber bei allen Varianten mit den ausgewählten Einzelnährstoffdüngern Dosiergenauigkeiten erzielt, die deutlich unter den festgesetzten Grenzwerten lagen.

3. Das nächste Glied im Gutstrom ist die *interne Förderung* der einzelnen Mischungspartner von ihren Dosierstationen zum zentral gelegenen Misch- und Zuteilorgan. Während dieser Förderung war ein geringer Zeitbedarf und die Vermeidung von Massenstromänderungen durch lastabhängige Reaktionen oder Gleichlaufschwankungen das Ziel. Beides konnte durch den Einbau von zwei quer liegenden Förderbändern sichergestellt werden. Diese sind durch einen geringen Zeitbedarf von der Aufgabe des Düngers bis zur Abgabe in das Mischorgan ( $< 1\text{s}$ ) gekennzeichnet. Sie leisten darüberhinaus durch ihre geringen Raumansprüche einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung des Transportvolumens des Gesamtsystems.
4. Der Dosierung und Förderung der Einzelnährstoffkomponenten folgt die *Mischung* und *Zuteilung* auf die Teilbreiten. Dieser Prozeß erfolgt bei dieser mobilen Herstellung von Düngermischungen kontinuierlich und ebenfalls bei geringem Zeitbedarf. Dabei darf es ausschließlich zu einer radialen Vermischung der einzelnen Dosierströme kommen, um eine scharfe Trennung der aufeinanderfolgenden Nährstoffmischungsverhältnisse zu erhalten.

Definitionsgemäß ist eine ideale homogene Mischung dann erreicht, wenn in den kleinsten Teilmengen dieser Mischung die Mischungskomponenten dem

gewünschten Verhältnis zueinander entsprechen. Zum Erreichen dieses Zieles wurde ein mechanisches Radialverteilsystem eingesetzt, wie es sich als Probenteiler im Labor- oder Feldversuchswesen für die Saatgutzuteilung seit langem bewährt hat. Das System sieht vor, daß mittels eines Rotationsverteilers die einzelnen Düngerpartikel im vorliegenden Fall auf acht Einzelkammern zugeteilt werden.

Es ergab sich jedoch das überraschende Ergebnis, daß sich die gewünschte mengengleiche Verteilung der Einzelnährstoffkomponenten nicht erreichen ließ. Je nach verwendeter Düngerform, eingestellter Förderrate oder Neigung des Versuchsaufbaus kam es zu statistisch hochsignifikant unterschiedlichen Düngertzuteilmengen auf die acht Verteilerkammern. Nicht nur die Mischung, sondern auch die daran anschließende Verteilung der so erzeugten Mehrenstoffdünger war in Frage zu stellen.

Erst durch eine Analyse der auf die einzelnen Düngerpartikel wirkenden Kräfte auf dem Weg durch den Rotationsverteiler konnten die aufgetretenen Imponderabilien erklärt werden. Daraus leitete sich die entscheidende technische Weiterentwicklung ab, bei der je vier gegenüberliegende Verteilerkammern zu einem Auslauf kreuzweise zusammengefaßt wurden.

Durch diese einfache aber wirkungsvolle Maßnahme konnte der Durchbruch von einer ungleichmäßigen unter Neigungsverhältnissen bisweilen periodischen Verteilung zu einer homogenen Verteilung erreicht werden. Eine Unterscheidung der zugeteilten Düngermengen war daraufhin statistisch nicht mehr möglich. Dies wurde auch unter schwierigen Versuchsbedingungen wie Neigungen des Versuchsgerätes um bis zu 30 % problemlos beibehalten. Damit waren die besten Voraussetzungen für die nachfolgenden verfahrenstechnischen Mischversuche gegeben.



Darin wurden aus den Einzelnährstoffen Kalkammonsalpeter, Cederan P 23 und 40er Kali heterogene Mehrnährstoffdünger hergestellt, deren Nährstoffverhältnis jeweils dem Bedarf von sieben aufeinanderfolgenden Teilflächen entsprach. Der Nährstoffbedarf der sieben Teilflächen war fiktiv und auf der Basis von Diskussionen mit Experten des Pflanzenbaues und der Pflanzenernährung festgelegt worden, um alle praxisüblichen und dennoch kritischen Bereiche bei der Herstellung der Düngermischungen zu erfassen.

Durch die chemische Analyse der einzelnen Düngergemische konnte zweifelsfrei bestätigt werden, daß die auf diese Weise hergestellten heterogenen Düngermischungen bezüglich ihrer Qualität an die chemisch erzeugten homogenen Mehrnährstoffdünger heranreichten. Wesentlich bedeutungsvoller ist aber die Tatsache, daß es mit diesem Verfahren gelungen ist, die gesetzlich zulässigen Nährstoffabweichungen in Mehrnährstoffdüngern um den Faktor 4 bis 10 zu **unterschreiten**. Dies ist eine Ausgangssituation, die genügend Spielraum läßt, um dieses Verfahren in heute übliche Techniken der Düngerverteilung einzubinden, ohne an gesetzliche Grenzen der Zulässigkeit zu stoßen.

5. Aus verfahrenstechnischer Sicht wurden von der vorgestellten Technik eine sehr hohe Arbeitsgenauigkeit bei gleichzeitig geringen Reaktionszeiten erreicht und damit die wichtigsten Kriterien für die Einbindung in Teilschlagkonzepte mit Prozeßsteuerungssystemen erfüllt. Lösungen hinsichtlich der Breitverteilung wurden nicht angestrebt. Sie sollten den Herstellern von Düngerverteilsystemen vorbehalten bleiben, da hier bereits bewährte technische Lösungen zur Verfügung stehen. Pneumatische Querverteilungseinrichtungen beispielsweise würden das rasche Reaktionsvermögen unterstützen, ohne daß gleichzeitig Entmischungsprobleme während der Förderung oder während des Wurfes zu befürchten sind.

Die Ergebnisse geben Anlaß zur Hoffnung, daß bald eine Adaption dieser technischen Lösungen stattfinden wird und die pflanzenbaulichen Instrumente zur teilschlag-

spezifischen Mineraldüngerausbringung zur Verfügung gestellt werden können. Dies wäre ein weiterer notwendiger Schritt, um künftig bestandesführende Maßnahmen ökologisch und ökonomisch zu verbessern.

## 9 Literaturverzeichnis

1. AMT FÜR WEHRGEOPHYSIK.:  
Der Einfluß von Umweltfaktoren auf die IR-Emission natürlicher Oberflächen.  
Interner Bericht Nr. 84164, Traben - Trarbach 1984
2. ANSON, J. H.:  
Technological Trends in Agricultural Electronics.  
Robotics and Intelligent Machines in Agriculture, Proceedings of the First  
International Conference on Robotics and Intelligent Machines in Agriculture,  
Oct. 2 - 4, 1983, ASAE-Publication 4/84, St. Joseph S. 5 - 14
3. ARENS, H.:  
Die Bodenkarte 1:5 000 auf der Grundlage der Bodenschätzung, ihre Her-  
stellung und Verwendungsmöglichkeiten.  
Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Band 8, 1960
4. ARTMANN, R.; SPECKMANN H.; ROBBA, J.:  
Datenübertragung zwischen Traktor, Arbeitsgeräten und Betriebscomputer -  
Zielsetzung und Stand der Normung.  
Landtechnik 44 (1989), H. 10
5. AUERNHAMMER, H.:  
Elektronik in Traktoren und Maschinen - Einsatzgebiete, Funktion, Entwick-  
lungstendenzen.  
BLV - Verlagsgesellschaft München 1989
6. AUERNHAMMER, H.:  
Rechnergestützter Pflanzenbau am Beispiel der umweltorientierten Düngung.  
VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik, 1992, H. 14, S. 1 - 15
7. AUERNHAMMER, H.; PEISL, S.; ROTTMEIER, J.:  
Wer wiegt behält den Überblick.  
dlz 42 (1991), H. 11, S. 82 - 88
8. AUERNHAMMER, H.:  
Rechnergestützte Düngesysteme.  
Neue Techniken zum umweltgerechten und wirtschaftlichen Einsatz von  
mineralischen und organischen Düngern.  
Landtechnik Schrift 2, S. 14 - 24 Weihenstephan 1992
9. AUERSWALD, K.; SCHMIDT, F.:  
Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern.  
GLA - Fachberichte 1, München 1986

10. BALG, J.; HEEGE, H.-J.; HELLWEG, W.:  
Düngermischung am Schüttkegel.  
Landtechnik 34 (1979), H. 3, S. 122 - 126
11. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN.:  
Berichte aus der Flurbereinigung Nr. 6, München 1970
12. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN.:  
Berichte aus der Flurbereinigung Nr. 61/1989 - Prämierung von Flurbereinigungen 1987/88, München 1989
13. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN.:  
Berichte zur ländlichen Neuordnung Nr. 66/1991 - Prämierung 1989/90, München 1991
14. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN.:  
Arge Alp und Alpen Adria, Kongress Bodenschutz, Okt. 1988
15. BAYERISCHE STAATSREGIERUNG.:  
Bodenschutzprogramm 1991.  
Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München 1991
16. BORTZ, J.:  
Lehrbuch der Statistik für Sozialwissenschaftler.  
Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York 1979
17. BRINSCHWITZ, W.; HAGEMANN, O.:  
Zum Einfluß der physikalischen Eigenschaften der festen Mineraldünger auf ihren effektiven Einsatz.  
Agrartechnik 30 (1980), H. 12, S. 544 - 546
18. BRÜBACH, M.:  
Ein Versuchsstand zur Ermittlung der Verteilungsgüte von Verteilgeräten und Probleme der Auswertung.  
Grundlagen der Landtechnik 19 (1969), H. 5, S. 163 - 165
19. BRÜBACH, M.:  
Der Einfluß von Arbeitsbreite und Abwurfhöhe auf das Streubild des Schleuderstreuers.  
Landtechnische Forschung 18 (1970), H. 1, S. 5 - 8

20. BRÜBACH, M.; GÖHLICH, H.:  
Der Einfluß der Düngergranulateigenschaften auf die Verteilung.  
Landtechnik 19 (1973), H. 9, S. 289 - 292
21. BÜCKMANN, W.; CEBULLA, P.; DRAEGER, B.; PATZAK, M.; VOEGELE, A.:  
Theoretische Aspekte des Bodenschutzes unter besonderer Berücksichtigung  
der Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung.  
Europäische Hochschulschriften Band 488, Verlag Peter Lang, Frankfurt -  
Bern - New York - Paris, 1986
22. BÜCKMANN, W.; GERNER, I.; HAAS, P.; KLENCKE, S.; MÜLLER, U.:  
Informationsgrundlagen für den Bodenschutz - Vorüberlegungen zu einem  
kommunalen, regionalen oder nationalen Bodenschutzinformationssystem.  
Europäische Hochschulschriften, Reihe XLII, Band 2, Frankfurt - Bern - New  
York - Paris, Verlag Peter Lang, 1987
23. BUNDESMINISTER DES INNEREN.:  
Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung.  
Bundestagsdrucksache 10/2977, Stuttgart - Berlin - Köln - Mainz 1985
24. BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN.:  
Inhalte und Verfahrensweisen der Landschaftsplanung, Stellungnahme des  
Beirates für Naturschutz und Landschaftspflege, Bonn 1977
25. BUNDESMINISTERIUM FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU.:  
Pilotstudie Statistisches Informationssystem zur Bodennutzung (STABIS) -  
Voruntersuchung.  
Schriftenreihe Forschung, H. 471, Verlag Roco Wolfenbüttel 1989
26. BUND - LÄNDER - ARBEITSGRUPPE "BODENSCHUTZPROGRAMM" DER UMWELTMINI-  
STERKONFERENZ.  
Inhalte für ein umfassendes Programm zum Schutz des Bodens, Abschlußbe-  
richt zur Vorlage an die 24. UMK, Wiesbaden
27. COX, S. W. R.:  
Microelectronics in Agriculture and Horticulture - Electronics and Computers in  
Farming.  
Mackays of Chatham Ltd. 1982
28. DOBLER, K.; FLATOW, J.:  
Berechnung der Wurfvorgänge beim Schleuderdüngerstreuer.  
Grundlagen der Landtechnik 18 (1968), H. 4, S. 129 - 134

29. DOMINGUEZ, A.; RANTAKALLO, E.:  
Gezielte Düngung mit Hilfe eines Expertensystems.  
Wissensbasierte Systeme in der Landwirtschaft, S. 321 - 331.  
DLG - Verlag Frankfurt 1988
30. DUBACH, P.:  
Neue Erkenntnisse zum Problem der Brückenbildung in Bunkerausläufen.  
Aufbereitungstechnik 6 (1965), H. 2, S. 50 - 56
31. ECKELMANN, W.; MÜLLER, U.:  
Nutzung des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS für Auswertungsfragen zum Bodenschutz. I. Das Prinzip.  
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 1989, 59/2,  
S. 873 - 876
32. ECKELMANN, W.; RICHTER, U.:  
Nutzung des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS für Auswertungsfragen zum Bodenschutz. IV. Auswertungsmethode: Ackerbauliches Ertragspotential.  
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 1989, 59/2,  
S. 877 - 878
33. ESTLER, M.; PEISL S.:  
Bedarfsgerechte Mineraldüngerausbringung.  
Neue Techniken zum umweltgerechten und wirtschaftlichen Einsatz von mineralischen und organischen Düngern.  
Landtechnik Schrift 2, Weihenstephan 1992, S. 25 - 37,
34. FETZER, K.; GROTTENTHALER, W.; HOFMANN B.; JERZ, H.; RÜCKERT G.;  
SCHMIDT, F.; WITTMANN, O.:  
Standortkundliche Bodenkarte von Bayern 1:50 000.  
Verlag Bayerisches Geologisches Landesamt 1986
35. FRIZEN, H. W.:  
Verfahrensketten für feste und flüssige Mehrnährstoffdünger in den USA.  
Dissertation: Universität Bonn 1974, KTBL Schrift 197
36. GERICKE, H.:  
Grundlagen des Dosierens von Feststoffen.  
Technische Mitteilungen 77 (1984), H. 12, S. 608 - 616
37. GÖHLICH, H.; JENSEN, U.; PAPTAEODOSSIOU, TH.:  
Entwicklung in der Verteiltechnik.  
Grundlagen der Landtechnik 20 (1970), H. 1, S. 362 - 363

38. GOTTFRIEDT, K.; LAMP, J.; SCHNUG, E.:  
Entwicklung und Anwendung digitaler Hof - Bodenkarten als Grundlage rechnergestützter Pflanzenproduktion.  
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 1989, 59/2, S. 1057 - 1062
39. GREINER, K.; KÄMPFE, K.:  
Ergebnisse der Untersuchungen zur Entmischung gekörnter Mineraldünger und Auswirkungen auf die Verfahren der Mineraldüngerbringung.  
Agrartechnik 34 (1984), H. 11, S. 483 - 485
40. GRÖB, R.:  
Messen der Kurzzeitgenauigkeit beim Dosieren.  
Automatisierungstechnische Praxis atp 28 (1986), H. 11, S. 530 - 533.
41. HAMMERSCHMID, W.:  
Entmischungsvorgänge beim Ausbringen von Düngermischungen.  
Forschungsberichte der Bundesanstalt für Landtechnik (1992), H. 27, S. 7 - 10
42. HANNUSCH, L.; SCHMIDT, CHR.:  
Beziehung zwischen Ernteertrag und qualitätsgerechter Mineraldüngerbringungsmenge in der Kooperation Görzig.  
Feldwirtschaft 1971, H. 12, S. 465 - 467
43. HEEGE, H.-J.; HELLWEG, W.:  
Weiterentwicklung der losen Düngerkette.  
Landtechnik 1976, H. 3, S. 103 - 106
44. HEEGE, H.-J.:  
Perspektiven für die Lose - Dünger - Kette mit Mischstationen auf der Landhandelsstufe 1977, Band 55, S. 287 - 303
45. HEEGE, H.-J.; HELLWEG, W.:  
Entmischung bezüglich der Korngröße beim Verteilen von Mineraldünger.  
Grundlagen der Landtechnik 32 (1982), H. 1, S. 13 - 19
46. HIGNETT, T. P.:  
Bulk Blending Fertilizers: Practices and Problems.  
Proceedings No. 87, The Fertilizer Society, London 1965
47. HOFFMEISTER, G. et al.:  
Bulk Blending of Fertilizers Material: Effect of Size, Shape and Density on Segregation.  
Agricultural and Food Chemistry, Washington, D.C., Vol. 12, (1964), No. 1, p 64 - 69

48. HOFFMEISTER, G.:  
Bulk Blending Practices and Problems: A Brief Resume.  
Applied Research Branch, Division of Chemical Development, TVA, Muscle Shoals, Alabama, 1967
49. HOLLMANN, W.:  
Untersuchungen über die Düngerverteilung von Schleuderstreuern.  
Diss. TU Berlin 1962
50. JAHNS, G.; KÖGL, H.:  
Nutzung der Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge zur Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes - Wirtschaftliche Grundsätze und praktische Anwendung.  
VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik, 1992, H. 14, S. 1 - 15
51. KÄMPFE, K.; JÄSCHKE, H.-J.; BRINSCHWITZ, W.:  
Zusammenhang zwischen wesentlichen physikalischen Eigenschaften und der Verteilgenauigkeit der Mineraldünger bei der Applikation.  
Agrartechnik 32 (1982), H. 6, S. 253 - 256
52. KÄMPFE, K.; LIPPERT, J.; JÄSCHKE, H.-J.:  
Auswirkungen der physikalischen Eigenschaften der Mineraldünger auf Gestaltung und Effektivität der Applikationsverfahren.  
Agrartechnik 34 (1984), H. 11, S. 481 - 483
53. KLAPP, E.:  
Theorie der Verteilung von Feststoffteilchen mittels Schleuderscheiben.  
Forschung im Ingenieurwesen 13 (1965), H. 3, S. 83 - 86
54. KTBL - TASCHENBUCH LANDWIRTSCHAFT:  
16. Auflage, Münster - Hiltrup 1992
55. MATTHIESEN, K.:  
Bodenschutz - Voraussetzungen für eine offensive Umweltpolitik.  
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 1989, 59/1, S. 65 - 72
56. MÖSER, J.:  
Ein Projekt, das nicht ausgeführt werden wird.  
Nützliche Beilage zum Osnabrücker Intelligenzblatt. 1770, H. 21, Spalte 167/168



57. MONCASTER M. E.; HARRIES G. O.:  
Automatic Control of Tractors and Field Machines.  
Robotics and Intelligent Machines in Agriculture, Proceedings of the First International Conference on Robotics and Intelligent Machines in Agriculture, Oct. 2 - 4, 1983, ASAE-Publication 4/84, St. Joseph S. 5 - 14
58. MUDRA, A.:  
Statistische Methoden für landwirtschaftliche Versuche.  
Verlag Paul Parey, Berlin - Hamburg 1958
59. PAPTHEODOSSIOU, TH.:  
Optimierung der Korn- und Granulatverteilung beim Breitstreuen insbesondere von Herbiziden.  
KTBL - Landtechnik 1970
60. PEISL, S.; AUERNHAMMER, H.:  
Kaum Ausfälle zu verzeichnen - die Elektronik hat sich in der Praxis bewährt.  
dlz 41 (1990), H. 12, S. 23 - 25
61. PEISL, S.:  
Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft.  
Schwäbischer Bauer 42 (1990), H. 37, S. 18 - 19
62. PEISL, S.:  
Einführung der Elektronik in der Außenwirtschaft.  
Landtechnik 45 (1990), H. 9, S. 340
63. PEISL, S.; AUERNHAMMER, H.:  
Mobile Agrarcomputer - Überwachung, Steuerung und Regelung von Maschinen und Geräten.  
DLG - Merkblatt 284 (1991)
64. PEISL, S.; ESTLER, M.; AUERNHAMMER, H.:  
Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln - Ein Systemvergleich.  
Pflanzenschutz Praxis (1992), H. 4, S. 24 - 27
65. PEISL, S.; ESTLER, M.:  
Direkteinspeisung von Pflanzenschutzmitteln - Beobachtungen im praktischen Einsatz.  
Landtechnik 48 (1993), H. 4, S. 168 - 170
66. PERNE, P.; POLKE, M.:  
Produktentwicklung durch Verfahrensvariation.  
Regelungstechnik 30 (1982), S. 147 - 156

67. PFADENHAUER, J.:  
Das Bilanzmodell Ackerbau aus der Sicht des Naturschutzes.  
Bilanzmodell Ackerbau - Rechnergestützte Bilanzierung von Stoff- und Informationsflüssen für die (über-) betriebliche Planung.  
Agrarinformatik Band 22 (1991), Verlag Eugen Ulmer
68. RASCH, D.:  
Einführung in die Biostatistik.  
Verlag Harri Deutsch, Thun 1987
69. REICHSFINANZMINISTERIUM.:  
Ergänzende Vorschriften zu den Anweisungen für die Durchführung der Bodenschätzung (BodSchätzAnwEV).  
Reichsdruckerei, Berlin 1936
70. REINER, L.; GEIDEL, H.; MANGSTL, A.:  
Informationsverarbeitung in der Agrarwissenschaft. Agrarinformatik  
Referate der 9. GIL Jahrestagung in Münster, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart  
1988
71. REINER, L.:  
Bilanzmodell Ackerbau - Eine Standortbestimmung.  
Bilanzmodell Ackerbau - Rechnergestützte Bilanzierung von Stoff- und Informationsflüssen für die (über-) betriebliche Planung.  
Agrarinformatik Band 22 (1991), Verlag Eugen Ulmer
72. RESCH, H.- N.:  
Überbetriebliche Nutzung rechnergestützter Planungs- und Arbeitsverfahren.  
Bilanzmodell Ackerbau - Rechnergestützte Bilanzierung von Stoff- und Informationsflüssen für die (über-) betriebliche Planung.  
Agrarinformatik Band 22 (1991), Verlag Eugen Ulmer
73. SACHS, L.:  
Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden.  
Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo: Springer 1984, 6. Auflage
74. SCHMID, H.:  
Das Bayerische Bodeninformationssystem - Anforderungen an ein Bilanzmodell Ackerbau.  
Bilanzmodell Ackerbau - Rechnergestützte Bilanzierung von Stoff- und Informationsflüssen für die (über-) betriebliche Planung.  
Agrarinformatik Band 22 (1991), Verlag Eugen Ulmer

75. SCHNUG, E.; HANEKLAUS, S.; LAMP, J.:  
Economic and Ecological Optimisation of Farm Chemical Applications by "Computer Aided Farming" (CAF).  
Technical Abstracts and Poster Abstracts on "International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG 1990)" Berlin, VDI-AGR/MEG 1990, S. 88 - 89
76. SCHNUG, E.; MURPHEY, D.; HANEKLAUS, S.:  
Importance, Evaluation and Application of Equifertiles to CAF (Computer Aided Farming).  
Vortragsmanuskript zum VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik, 1992, H. 14
77. SCHWARZER, J.:  
Die Chipkarte als Beweismittel.  
dlz 41 (1990), H. 12, S. 31 - 32
78. SOMMER, K.; RUMPF, H.:  
Varianz der stochastischen Homogenität bei Körnermischungen und Suspensionen und praktische Ermittlung der Mischgüte.  
Chem.-Ing. Tech. 46 (1974), H. 6
79. SOMMER, K.:  
Das optimale Mischgütemaß für die Praxis.  
Chemie-Technik 4 (1975), H. 10, S. 347 - 349
80. SOMMER, K.:  
Statistics of Mixedness with unequal Particle Sizes.  
Journal of Powder and Bulk Solids Technology 3 (1979) H. 4, S. 10 - 14
81. SOMMER, K.:  
Wie vergleicht man die Mischfähigkeit von Feststoffmischern?  
Aufbereitungstechnik 23 (1982), H. 5, S. 266 - 269
82. SONDERARBEITSGRUPPE INFORMATIONSGRUNDLAGEN BODENSCHUTZ (SAG):  
Konzept zur Erstellung eines Bodeninformationssystems.  
Materialien 47, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München 1987
83. SPIELHAUS, G.:  
Die Intensität der pflanzlichen Produktion in den 90er Jahren aus der Sicht der Bundesrepublik Deutschland.  
Intensität der pflanzenbaulichen Produktion in den EG - Ländern in den 90er Jahren (unter besonderer Berücksichtigung der Düngung), Tagung mit dem Verband der Landwirtschaftskammern e.V. und dem Bundesarbeitskreis Düngung e.V., 18. und 19. April 1990, Würzburg

84. STATISTISCHES JAHRBUCH ÜBER ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN:  
Jahrgänge 1980 - 1992
85. TAYLOR, L.:  
"Latest technology and methods used for bulk blending and fertilizer storage in  
the United States".  
Proceedings, Fertilizer-Society, UK 1987, No. 256
86. THAMM, B.:  
Ermittlung standortbedingter Bestandesdifferenzierungen mittels Falschfarben -  
Luftbildern.  
Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., Berlin 31 (1987) H. 3, S. 187 -195
87. ULLRICH, M.:  
Entmischungserscheinungen in Kugelschüttungen.  
Chem.-Ing. Tech. 41 (1969), H. 16, S. 903 - 907
88. ULLRICH, K.-H.:  
Mischdünger aus dezentralen Mischstationen - Alternative zu üblichen Dünge-  
systemen?  
Vereinigte Landwarenkaufleute 1979, H. 3.
89. VETTER, G.:  
Grundlagen des Dosierens.  
Handbuch für das Dosieren von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen.  
VDI - Bildungswerk, Düsseldorf 1982
90. VETTER, G.; FRITSCH, D.:  
Zum Einfluß der Zulaufbedingungen von Schneckendosieren auf Dosierstrom-  
schwankungen.  
Chem.-Ing. Tech. 58 (1986), H. 4, S. 334 - 335
91. VETTER, G.:  
Dosiergenauigkeit bei der Stoffdosierung.  
Chem.-Ing. Tech. 61 (1989), H. 2, S. 136 - 140
92. VETTER, G.; WOLFSCHAFFNER, H.:  
Entwicklungslinien der Schüttgutdosiertechnik.  
Chem.-Ing. Tech. 62 (1990), H. 9, S. 695 - 706
93. VETTER, G.; FRITSCH, D.; WOLFSCHAFFNER, H.:  
Schüttgutmechanische Gesichtspunkte bei der Auslegung von Schneckendo-  
siergeräten.  
Chem.-Ing. Tech. 62 (1990), H. 3, S. 224 - 225

94. VETTER, H.; KLASINK, A.:  
Mechanisch gemischte Handelsdünger - Ein Fortschritt?  
Landtechnik 43 (1988), H. 9, S. 392 - 395
95. VETTER, H.; KLASINK, A.:  
Mechanisch gemischte Handelsdünger - Ein Fortschritt? Teil I  
Landwirtschaftsblatt Weser - Ems 1988, H. 33, S. 22 - 24
96. VETTER, H.; KLASINK, A.:  
Mechanisch gemischte Handelsdünger - Ein Fortschritt? Teil II  
Landwirtschaftsblatt Weser - Ems 1988, H. 34, S. 14 - 15
97. VOGEL, F.:  
Erläuterungen zur bodenkundlichen Übersichtskarte von Bayern 1:500 000.  
Verlag Bayerisches Geologisches Landesamt 1961
98. WEHLAND, W.:  
Dünger: Hofnahe Mischer im Aufwind.  
top agrar 1983, H. 6, S. 34 - 38
99. WERNER, W.:  
Brunnenvergifter Landwirtschaft?  
DLG-Mitteilungen 104 (1989), H. 19, S. 979
100. ZIEGLER, TH.:  
Einführung in die Bodenschätzung.  
Bayerisches Landesvermessungsamt 1977, München
101. ZSCHUPPE, H.:  
Untersuchungen über den Einfluß der Streugenauigkeit von Düngerstreuern  
auf den Pflanzenertrag.  
Arch. Landtechnik (1968), H. 7, S. 111 - 120

## Peisl

Abbildung	Seite	Nummer	Bemerkung
7	38	922376	A 4
8	39	922362	A 4
9	41	912071	A 4
10	42	932211	A 4
		922049	A 4
			englisch
			deutsch
11	48	932227	A 4
12	49		
13	50	932231	A 4
14	51		
15	53	922360	A 4
16	54		
17	56	922399	A 4
18	58		
19	59	922386	A 4
20	63	932265	A 4
			neu 972250
21			
22	71	932229	A 4
23	74	932231	A 4
24	75	922183	A 4
25	77		
26	77		
27	78		
28	79		
29	80		
30	81		
31	82		
32	82		
33	88	932228	A 4
34	89	932220	A 3
35	90		
36	94		
37	95		
38	98	932221	A 3
39	99		
40	103	932222	A 3
41	103	932223	A 3
42	105	932224	A 3
43	107		
44	108		
45	109		
46	110		
47	111		
48	112		
49	112		

Abbildung	Seite	Nummer	Bemerkung
50	113		
51	115		
52	116		
53	117		
54	118		
55	122	932225	A 3
56	124		
57	125		
58	126		
59	127		
60	132	912417	A 3
61	133		
62	137		
63	145	932194	A 4
64	146	932238	A 4 neu 952470

**ISBN 3-7843-1908-4**