

5.5 P  
Diss. 436

# **FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK**

des Arbeitskreises Forschung und Lehre  
der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG)

84

Werner Hutt

**Untersuchung der Strömungsvorgänge und  
Ermittlung von Kennlinien an Gutaufgabe-  
injektoren zur pneumatischen Förderung**

Dissertation

Stuttgart 1983

Institut für Agrartechnik  
Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik  
Universität Hohenheim  
Prof. Dr.-Ing. H.-D. Kutzbach

**UNTERSUCHUNG DER STRÖMUNGSVORGÄNGE  
UND ERMITTLUNG VON KENNLINIEN  
AN GUTAUFGABEINJEKTOREN  
ZUR PNEUMATISCHEN FÖRDERUNG**

Von der Universität Stuttgart  
(Technische Hochschule)  
zur Erlangung der Würde des Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Werner Hutt**  
Schorndorf

Stuttgart 1983

Hauptberichter.....: Prof. Dr.-Ing. E. Muschelknautz  
Mitberichter.....: Prof. Dr.-Ing. H. Blenke  
Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach  
Tag der Einreichung.....: 07.07.1982  
Tag der mündlichen Prüfung...: 15.03.1983

C 1983: im Selbstverlag des Verfassers  
Bezugsquelle: Institut für Agrartechnik  
Universität Hohenheim  
Garbenstraße 9  
D 7000 Stuttgart 70

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdruckes  
sowie jede Art der photomechanischen Wiedergabe, auch aus-  
zugsweise, bleiben vorbehalten.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Segler†, der die Untersuchungen angeregt und meine Arbeit bis zu seinem Tod im Jahre 1978 unterstützt hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Kutzbach danke ich, daß er als Nachfolger von Prof. Dr.-Ing. G. Segler die Weiterführung der Arbeit an seinem Lehrstuhl ermöglichte. Weiterhin danke ich ihm für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes.

Für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung und für die wertvollen Ratschläge und die Unterstützung meiner Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Muschelknautz ganz besonders.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Blenke danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes.

Allen beteiligten Mitarbeitern des Institutes für Agrartechnik sowie den studentischen Hilfskräften danke ich herzlich für die Mithilfe beim Aufbau der Versuchsanlagen und bei der Durchführung und Auswertung der Messungen.

Werner Hutt



## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Formelzeichen	7
1. Einleitung	11
2. Grundform, Bauarten und Anwendung von Gutaufgabeinjektoren	13
2.1 Grundform und Funktionsweise	13
2.2 Anwendung und Bauarten	14
3. Theoretische Grundlagen	16
3.1 Verlauf der Luftgeschwindigkeit im Gutaufgabeinjektor	17
3.2 Beschleunigung, Bahnkurven und Geschwindigkeitsverlauf von Einzelteilchen im Gutaufgabeinjektor	23
3.3 Beschleunigung von Teilchenströmen im Gutaufgabeinjektor	30
3.4 Druckverlauf im Gutaufgabeinjektor	35
4. Versuchseinrichtung	42
4.1 Förderanlage	42
4.2 Druckmessung	42
4.3 Messung des Luft- und Feststoffdurchsatzes	45
4.4 Messung der Luft- und Feststoffgeschwindigkeit	46
5. Meßergebnisse und Vergleich mit theoretisch berechneten Werten	48
5.1 Förderguteigenschaften	48
5.2 Feststoffbewegung im Gutaufgabeinjektor	52
5.3 Druckverlauf	55
5.4 Verlauf der Luftgeschwindigkeit	64
5.5 Verlauf der Feststoffgeschwindigkeit	67

	Seite
6. Kennlinien von Gutaufgabeinjektoren	73
6.1 Anwendung von Kennlinien	73
6.2 Einflüsse auf die Kennlinie des Gutaufgabeinjektors	76
6.3 Optimierung von Gutaufgabeinjektoren	83
6.4 Experimentelle Überprüfung der Ähnlichkeitsbedingungen für Gutaufgabeinjektoren	87
6.5 Kennlinien von Mittel- und Hochdruckinjektoren	89
7. Zusammenfassung	92
8. Schrifttum	94
9. Anhang	98

Formelzeichen

A	$m^2$	Fläche
a	$m/s^2$	Beschleunigung
$a_L$	$m/s$	Schallgeschwindigkeit der Luft, Lavalgeschwindigkeit
c	$m/s$	Fördergutgeschwindigkeit
$c_w$		Widerstandsbeiwert
$c_{wK}$		Widerstandsbeiwert der Kugel
$c_{wS}$		Widerstandsbeiwert der beliebig ge- formten Partikel
d	mm,m	Durchmesser
$d_S$	mm	Partikeldurchmesser (Kugel gleicher Masse)
$d_{S50}$	mm	Partikeldurchmesser (aus Siebanalyse, $R = 0,5$ )
F	N	Kraft
$F_T$	N	Trägheitskraft
$F_W$	N	Luftwiderstand
f		Gleitreibungsbeiwert
g	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
I	kgm/s	Impuls
i	N	Impulsänderung
k		Konstante
$k_f$	$= \frac{w_S}{w_{SK}}$	Formfaktor
l	m,mm	Länge
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
$\dot{m}_{La}$	kg/s	vom Injektor angesaugter Luftmassenstrom
$M_S$	mg	Einzelkornmasse

p	Pa, bar	Druck
p <sub>d</sub>	Pa	dynamischer Druck
p <sub>g</sub>	Pa	Gesamtdruck
p <sub>RL</sub>	Pa	Druckverlust durch Wandreibung der Luft
p <sub>RS</sub>	Pa	Druckverlust durch Reibung des Feststoffes
p <sub>s</sub>	Pa	statischer Druck
q	= $\frac{\dot{m}_{Ln}}{\dot{m}_{LT}}$	Ansaugverhältnis
s	m,mm	Weg
t	s	Zeit
v	m/s	Luftgeschwindigkeit
v <sub>z</sub>	m/s	Zentralgeschwindigkeit des Treibstrahles
w	m/s	Relativgeschwindigkeit
w <sub>S</sub>	m/s	Schwebegeschwindigkeit der Feststoffpartikel (gemessen)
w <sub>SK</sub>	m/s	Schwebegeschwindigkeit der Kugel mit d <sub>S</sub> (errechnet)
x, y, z	mm, m	Längenkoordinaten

Griechische Buchstaben

$\alpha$		Winkel
$\eta_D$		Wirkungsgrad des Diffusors
$\lambda_L$		Druckverlustbeiwert der Luftströmung in der Rohrleitung
$\lambda_S$		zusätzlicher Druckverlustbeiwert bei Gutförderung
$\mu$	$= \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{Ln}}$	Gutbeladung
$\nu$	$m^2/s$	kinematische Viskosität
$\rho_L$	$kg/m^3$	Luftdichte
$\rho_{LO}$	$kg/m^3$	Bezugsluftdichte (in Anlehnung an die bei Gebläsedaten im allgemeinen zu- grunde gelegte Luftdichte wurde $\rho_{LO} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ gewählt)
$\rho_S$	$kg/m^3$	Korndichte
$\rho_{Sch}$	$kg/m^3$	Schüttdichte
$\rho_w$	$kg/m^3$	Dichte der Gutwolke
$\psi$	$= \frac{p_{sn} - p_{sT}}{\frac{1}{2} \rho_{LT} v_T^2}$	Druckziffer
$\psi_S$		Druckzifferanteil für Verluste durch den Feststoff

Kennzahlen

Ba	=	$\frac{3}{4} \cdot c_w \cdot \frac{\rho_L}{\rho_S} \cdot \frac{d_T}{d_S}$	Barth-Zahl nach Vollheim
Ma	=	$\frac{v}{a_L}$	Mach-Zahl
Re	=	$\frac{v \cdot d}{\nu}$	Reynoldszahl
Re <sub>S</sub>	=	$\frac{w \cdot d_S}{\nu}$	Reynoldszahl des Feststoffes bei beliebiger Relativgeschwindigkeit
Re <sub>SS</sub>	=	$\frac{w_S \cdot d_S}{\nu}$	Reynoldszahl des Feststoffes bei Schwebegeschwindigkeit

Indizes (nur häufig verwendete)

D	Diffusor
F	Freistrahл bzw. Treibstrahl in der Mischkammer
L	Luft
M	Mischrohr
n	nach Injektor
R	Förderleitung
Rü	Rückströmung
S	Solid, Feststoff
T	Treibdüse, Treibstrahl
Z	Gutstrom in der Mischkammer
O,1....5	Ebenen im Injektor nach Bild 3

## 1. Einleitung

Mit Injektoren werden Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe durch Flüssigkeits- oder Gastreibstrahlen gefördert.

Bereits 1820 wurden von Stephenson Injektoren in den Schornstein von Dampflokomotiven eingebaut, um den Zug der Rauchgasabführung zu erhöhen. 1852 beschreibt Thompson [1] die Anwendung von Strahlpumpen zur Wasserförderung und etwa zur gleichen Zeit setzt Bunsen Wasserstrahlpumpen zur Vakuumherzeugung und Injektor-Gasbrenner ein. Seit Ende der dreißiger Jahre werden Injektoren in Klimaanlage angewendet [2]. Dencker [3] führte 1928 erste Untersuchungen an Injektoren zur pneumatischen Förderung von Heu und Stroh durch. Neuerdings wird versucht, mit Wasserstrahl-Injektoren Manganknollen vom Meeresboden an die Wasseroberfläche zu fördern [4].

Bei der pneumatischen Förderung werden mit Gutaufgabeinjektoren rieselfähige Schüttgüter von feinem Staub bis zu grobem Granulat sowie loses Heu und Stroh, Papierstreifen, Fasern und größere Einzelstücke wie gepreßte Heu- und Strohballen bis etwa 0,5 m Länge in die Förderleitung eingeschleust. Die Abmessungen der Gutaufgabeinjektoren reichen von wenigen Zentimetern für die Pulverzerstäubung in Druckmaschinen bis zu rund 3 m Länge zur Förderung von Halmgut.

Da Injektoren bisher meist nur für kurze Förderentfernungen, niedrige Druckdifferenzen und geringe Beladungen im kurzzeitigen Betrieb eingesetzt wurden, war der betriebstechnische Vorteil wichtiger als ein hoher Wirkungsgrad. Der Vorteil der einfachen Bauform führt zu einer zunehmenden Anwendung, auch für längere Förderstrecken, höhere Gegendrucke, größere Beladungen und Dauerbetrieb. Die steigenden Energiepreise verlangen aber eine möglichst wirtschaftliche Betriebsweise der Förderanlagen und damit auch der Gutaufgabeinjektoren. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn sichere und genaue Auslegungsunterlagen vorliegen, wozu systematische experimentelle und theoretische Untersuchungen notwendig sind.

Während Injektoren für Einphasenströmungen und Wasserstrahl-Luft-Injektoren vielfach wissenschaftlich untersucht wurden [5-10], liegen nur wenige Untersuchungen über Gutaufgabeinjektoren vor.

Die Arbeiten über Gutaufgabeinjektoren enthalten nur für einzelne Einflußgrößen experimentelle Ergebnisse [11, 16-18] sowie Berechnungsansätze, die entweder auf empirischen Gleichungen beruhen [11] oder nach dem Impuls- und Energiesatz mit verschiedenen vereinfachenden Annahmen durchgeführt wurden [11, 16-21].

In der vorliegenden Arbeit werden Gutaufgabeinjektoren, die vorwiegend in der Verfahrenstechnik und in der Landtechnik zur pneumatischen Förderung im Niederdruckbereich verwendet werden, untersucht. Der Verlauf der Geschwindigkeiten der Luft und des Feststoffes sowie des Drucks werden nach einem physikalischen Modell berechnet und experimentell überprüft. Weiterhin werden Kennlinien von Gutaufgabeinjektoren mit verschiedenen Querschnitts- und Längenverhältnissen für Fördergüter im Korngrößenbereich von 0,063 bis 7,3 mm experimentell ermittelt und ihre Anwendung zur Auslegung von Gutaufgabeinjektoren für pneumatische Förderanlagen gezeigt. Zur Überprüfung der Ähnlichkeitsbedingungen werden zusätzliche experimentelle Untersuchungen an einem Modellinjektor im Nieder- und Mitteldruckbereich durchgeführt.

## 2. Grundform, Bauarten und Anwendung von Gutaufgabeinjektoren

### 2.1 Grundform und Funktionsweise

Die Grundform des Gutaufgabeinjektors, Bild 1, besteht aus einer Treibdüse, die in einer Mischkammer endet, einem Mischrohr mit Einlauf und einem Diffusor.

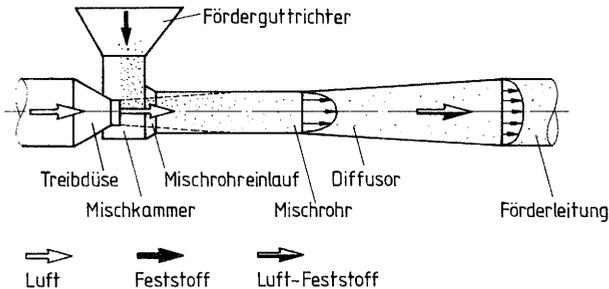


Bild 1: Grundform eines Gutaufgabeinjektors

Der Luftstrom wird in der Treibdüse auf eine Geschwindigkeit von 100 bis 400 m/s beschleunigt, wobei seine potentielle Energie in kinetische Energie des Treibstrahles umgewandelt wird. Der Treibstrahl tritt dadurch mit Umgebungsdruck in die Mischkammer ein, so daß ohne zusätzliche mechanische Abdichtung das Fördergut von außen in die Förderleitung eingeführt werden kann. Das Fördergut und die an den Strahl grenzende Luftschicht wird vom Treibstrahl erfaßt und mitgerissen. Der Strahl wird im Mischrohreinlauf gefangen, dieser Bereich wird bei Gasinjektoren daher oft als Fangdüse bezeichnet. Im Mischrohr wird er verzögert und geht in eine Rohrströmung über, wobei die kinetische Energie unter erheblichen Misch- und Reibungsverlusten wieder in potentielle Energie des Druckes umgewandelt wird. Ein Teil der Energie wird zur Beschleunigung des Fördergutes verbraucht, wodurch der Druckanstieg vermindert wird. Im anschließenden Diffusor wird die Luftströmung auf die Geschwindigkeit in der Förderleitung verzögert; dadurch steigt der Druck bis zum Ende des Injektors weiter an.

Der Druckanstieg im Gutaufgabeinjektor hängt von der Gutbeladung, den Förderguteigenschaften, der zusätzlich angesaugten Luft und den geometrischen Verhältnissen des Injektors ab. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diese Einflüsse zu ermitteln und ein Verfahren zu entwickeln, mit dem der Druckanstieg im Gutaufgabeinjektor im voraus berechnet werden kann.

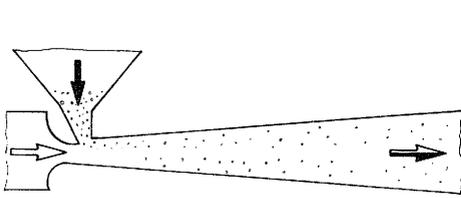
## 2.2 Anwendung und Bauarten

Gutaufgabeinjektoren für pneumatische Förderanlagen werden vorwiegend im Niederdruckbereich bis 0,5 bar Förderdruck, selten im Mitteldruckbereich von 0,5 bis 2,5 bar und kaum im Hochdruckbereich bei Förderdrücken größer 2,5 bar eingesetzt. Nach der Gutbeladung  $\mu$ , die das Verhältnis des Fördergutdurchsatzes  $\dot{m}_G$  zum Luftdurchsatz  $\dot{m}_{Ln}$  in der Förderanlage angibt, wird bei Niederdruckanlagen in drei Bereiche unterteilt:

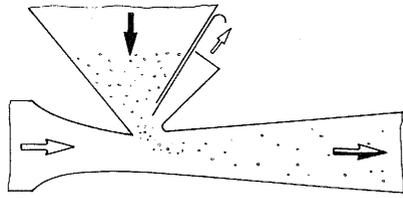
geringe Beladung	$\mu < 1$
mittlere Beladung	$\mu = 1 \text{ bis } 2$
große Beladung	$\mu > 2$

Häufig werden Gutaufgabeinjektoren mit einer Beladung  $\mu \approx 1$  betrieben.

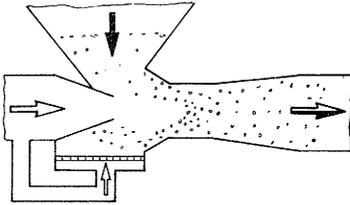
Die verschiedenen Betriebsanforderungen führten zu einer Vielzahl unterschiedlicher Bauformen von Gutaufgabeinjektoren. Einige Beispiele zeigt Bild 2. Die sogenannte Venturiform, bei der die Treibdüse kontinuierlich in den Diffusor übergeht, wurde von Segler [11] empirisch optimiert und war lange Zeit die Hauptbauform für Körnergebläse in der Landwirtschaft. Bei der Rückblassehleuse wird ausgenützt, daß der Förderdruck gesteigert werden kann, wenn 10 bis 20 % der Treibluft ausgeblasen werden. Meßergebnisse über die erreichbaren Drucksteigerungen werden von Segler [11] mitgeteilt. Um bei feinkörnigen und staubförmigen Produkten Ablagerungen in der Mischkammer zu verhindern, sind Auflockerungseinrichtungen notwendig, die beispielsweise Zusatzluft durch einen porösen Boden in die Mischkammer leiten, Bild 2c. Durch die Aufteilung des Treib-



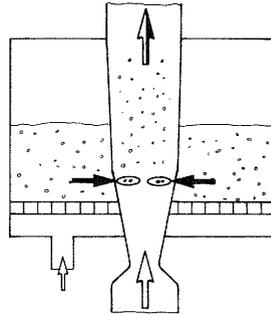
a) Venturi-Form [ 11 ]



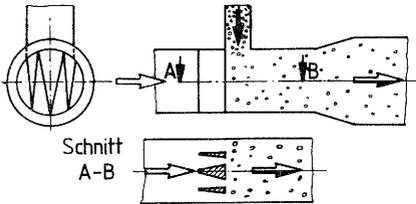
b) Rückblassechleuse [ 12 ]



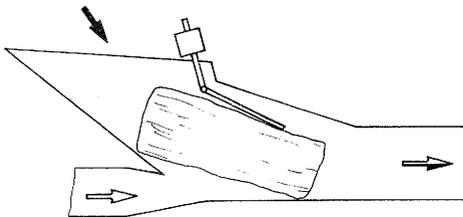
c) Zusätzliche Feststoffauflockerung



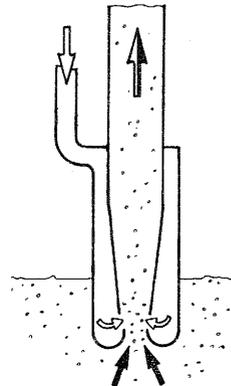
e) Lavaldüse mit Wirbelschichtzuführung [ 14 ]



d) aufgeteilter Treibstrahl [ 13 ]



f) Garbeninjektor [ 15 ]



g) Sauginjektor

Bild 2: Bauarten von Gutaufgabeinjektoren [ 11-15 ].

strahls, Bild 2d, wird eine rasche und gleichmäßige Verteilung des Feststoffes über den Rohrquerschnitt, z.B. bei der Beschickung von Kohlenstaubfeuerungen, erreicht. Bild 2e zeigt einen Injektor für Überschallströmung und Gutzufuhr am Ende der Lavaldüse mit Hilfe einer Wirbelschicht. Eine Sonderform aus dem landwirtschaftlichen Bereich, die bis in die fünfziger Jahre üblich war, ist in Bild 2f dargestellt. Große Einzelstücke wie Heuballen oder Getreidegarben, drücken eine Rückschlagklappe auf und werden wie bei einer Rohrpost durch die Förderleitung geschoben, während die Klappe durch den Förderdruck geschlossen wird und dadurch ein höherer Druck aufgebaut werden kann. Das letzte Beispiel, Bild 2g, zeigt einen Sauginjektor als Alternative zu einem Saugrüssel zur Aufnahme von Kunststoffgranulat aus Behältern.

### 3. Theoretische Grundlagen

Zur Berechnung des Druck- und Geschwindigkeitsverlaufes der Luft sowie des Geschwindigkeitsverlaufes des Feststoffes wird der Injektor von Beginn der Treibdüse bis zum Druckmaximum nach dem Injektor in 5 Bereiche unterteilt, und die Bezeichnungen nach Bild 3 werden eingeführt.

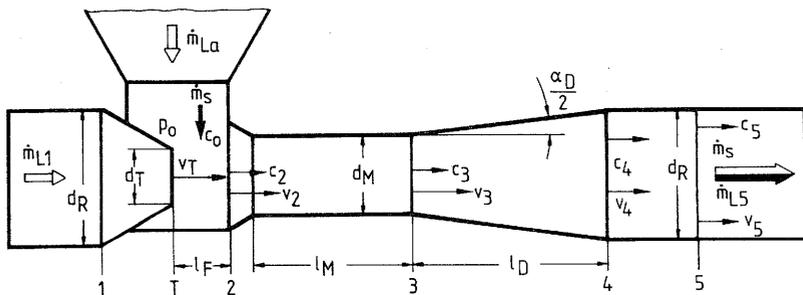


Bild 3: Einteilung und Bezeichnungen am Injektor zur Berechnung der Drücke und der Geschwindigkeiten.

Da sich bei Injektoren im Niederdruckbereich der Absolutdruck zwischen Mischkammer und Förderleitung um weniger als 10 % ändert, erfolgt die Berechnung näherungsweise mit einer mittleren Luftdichte.

### 3.1 Verlauf der Luftgeschwindigkeit im Gutaufgabeinjektor

Die Luft tritt aus der Treibdüse mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_T$  aus. In der Mischkammer verhält sich der Treibstrahl wie ein Freistrahл, da der Mischkammerquerschnitt wesentlich größer als der Treibstrahlquerschnitt ist und außerdem Druckausgleich mit der Umgebung vorhanden ist. Bei den üblichen geometrischen Verhältnissen von Gutaufgabeinjektoren ist die Länge  $l_F$  dieses Bereiches meist kleiner als etwa zweimal der Treibdüsendurchmesser  $d_T$ . Es ist der Kernbereich des Freistrahls, auf den die Gesetze des voll ausgebildeten Freistrahles [ 2, 22, 23 ] nicht ohne weiteres übertragen werden können. Im Kernbereich bleibt über eine Länge von  $(4 - 6) \cdot d_T$  die Zentralgeschwindigkeit  $v_z$  gleich der Anfangsgeschwindigkeit  $v_T$ .

Im Neutralzustand arbeitet der Gutaufgabeinjektor ohne Luftansaugung, daher wird die im Freistrahлbereich mitgerissene Luft im Anfangsbereich des Mischrohres wieder zurückgeblasen.

Im Mischrohr wird der Treibstrahl unter Druckaufbau in eine Rohrströmung umgewandelt. Da die Freistrahлgesetze in diesem Bereich nicht gelten und Berechnungen oder Messungen der Strahlgeschwindigkeit bei gleichzeitigem Druckanstieg nicht bekannt sind, werden die von Eck [ 2 ] mitgeteilten Meßergebnisse für die plötzliche Erweiterung zum Vergleich herangezogen, Bild 4.

Die Ausgleichskurve des Druckverlaufes nach Eck [ 2 ] gilt für Durchmesserverhältnisse von  $d_M/d_T = 2,0$  bis  $8,74$  und Reynolds-Zahlen von  $Re = 1,2 \cdot 10^5$  bis  $5,2 \cdot 10^5$ . Die plötzliche Erweiterung unterscheidet sich von der Anordnung Treibdüse-Mischrohr im Injektor durch den stirnseitig geschlossenen Übergang vom kleineren zum größeren Rohr. Dadurch wird der Druckausgleich zur Umgebung vollständig verhindert, der Druck muß des-

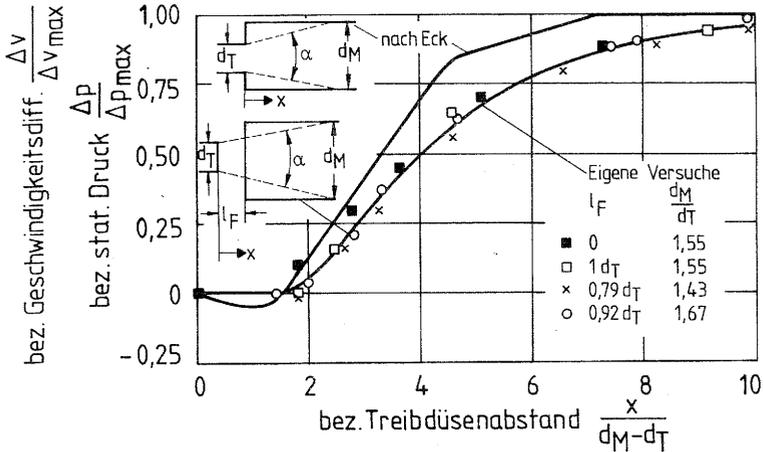


Bild 4: Bezogener Druckverlauf und bezogene Geschwindigkeitsdifferenz bei reiner Luftströmung in einer plötzlichen Erweiterung (nach Eck [2]) und im Mischrohr des Gutaufgabeinjektors ohne Ansaugung zusätzlicher Luft (eigene Messungen).

halb etwas stärker ansteigen als bei der Anordnung Treibdüse/Mischrohr. Zur Überprüfung werden eigene Versuche angeführt, die diese Annahme bestätigen, Bild 4.

Der gegenüber der plötzlichen Erweiterung flachere Druckanstieg kann außer durch die fehlende Rückwand auch durch das kleinere Durchmesserverhältnis  $d_M/d_T$  bei den eigenen Messungen verursacht sein. Zusätzliche Luftansaugung, die auch einen flacheren Druckanstieg bewirkt, war nicht vorhanden. Aus dem Druckverlauf wird mit Hilfe des Impulssatzes die mittlere Geschwindigkeit berechnet. Für den Betrieb des Gutaufgabeinjektors ohne Fördergut und ohne Ansaugung zusätzlicher Luft gilt nach dem Impulssatz mit den Bezeichnungen von Bild 5:

$$\dot{m}_L \cdot v_x + p_x \cdot A_M = \dot{m}_L (v_x + dv) + (p_x + dp) \cdot A_M \quad (1)$$

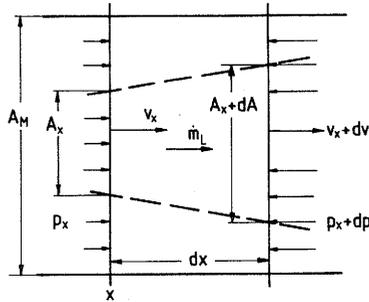


Bild 5: Volumenelement des Mischrohres mit Bezeichnungen für die Berechnung.

Die Geschwindigkeitsänderung  $dv$  wird damit:

$$dv = - \frac{A_M}{\dot{m}_L} \cdot dp \quad (2)$$

Die Integration ab  $v_2$  und  $p_0$  in Strömungsrichtung  $x$  unter Berücksichtigung von  $\dot{m}_L = \rho_L \cdot A_T \cdot v_T$  ergibt:

$$v_x = v_2 - \frac{(p_x - p_0)}{\rho_L \cdot v_T} \cdot \left(\frac{d_M}{d_T}\right)^2 \quad (3)$$

Die maximale Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v_{\max}$  und damit die maximale Druckänderung  $\Delta p_{\max}$  ist erreicht für  $v_x = v_M$ . Dann gilt:

$$\frac{\Delta v}{\Delta v_{\max}} = \frac{\Delta p}{\Delta p_{\max}} \quad (4)$$

Die Kurven in Bild 4 gelten somit sowohl für den Verlauf des bezogenen Druckes als auch für den Verlauf der bezogenen Geschwindigkeitsabnahme. Aus dem gemessenen Druckverlauf wird damit der Verlauf der Luftgeschwindigkeit nach Gleichung (3) ermittelt.

Um die weitere Berechnung zu vereinfachen, wird für die Luftgeschwindigkeit nach der Kontinuitätsgleichung gesetzt:

$$v_x = \left( \frac{d_{F2}}{d_x} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{L2}}{\rho_{Lx}} \cdot v_2 \quad (5)$$

darin ist:

$$d_x = d_{F2} + 2 (x - l_F) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (6).$$

Durch die folgende Abstufung des Strahlerweiterungswinkels  $\alpha$  läßt sich der Geschwindigkeitsverlauf gut annähern.

$x \leq l_F$	$\alpha = 0$
$0 < \frac{x - l_F}{d_M - d_T} \leq 2,7$	$\alpha = 9^\circ$
$2,7 < \frac{x - l_F}{d_M - d_T} \leq 8,2$	$\alpha = 6^\circ$
$8,2 < \frac{x - l_F}{d_M - d_T}$	$\alpha = 0$

Der Treibstrahldurchmesser  $d_{F2}$  und die Treibstrahlgeschwindigkeit  $v_2$  am Mischrohreinlauf sind bei Betrieb ohne Luftansaugung gleich dem Treibstrahldurchmesser  $d_T$  und der Anfangsgeschwindigkeit  $v_T$  des Treibstrahls.

Im Diffusor nimmt die Luftgeschwindigkeit  $v$  entsprechend der Querschnittserweiterung ab. Nach der Kontinuitätsgleichung gilt:

$$v = \left[ \frac{d_M}{d_M + 2 x \tan \frac{\alpha_D}{2}} \right]^2 \cdot \frac{\rho_{L3}}{\rho_{Lx}} \cdot v_M \quad (7)$$

Der so berechnete Verlauf der Luftgeschwindigkeit ist in Bild 10 eingetragen.

Einfluß des Fördergutes auf den Geschwindigkeitsverlauf der Luft

Im Freistrahlbereich ist der Druck und damit auch der Gesamtimpuls von Treibstrahl und Feststoffströmung konstant. Die Feststoffbeschleunigung führt daher zu einer Abnahme der mittleren Treibstrahlgeschwindigkeit. Mit den Bezeichnungen von Bild 6 gilt nach dem Impulssatz:

$$\dot{m}_L \cdot v_x + \dot{m}_S \cdot c_x = \dot{m}_L (v_x + dv) + \dot{m}_S (c_x + dc) \quad (8)$$

Die Geschwindigkeitsänderung  $dv$  des Treibstrahls ist danach:

$$dv = - \mu dc \quad (9).$$

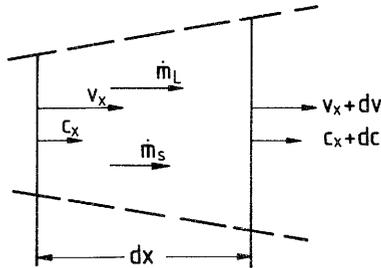


Bild 6: Volumenelement des Freistrahlbereiches der Mischkammer mit Bezeichnungen für die Berechnung.

Der Druckänderung im Mischrohr infolge der Strahlverzögerung ist die Impulszunahme des Feststoffes durch die Beschleunigung überlagert. Werden die Reibungskräfte zunächst vernachlässigt, da sie im Anfangsbereich des Mischrohres nur einen geringen Einfluß haben, gilt nach dem Impulssatz mit den Bezeichnungen von Bild 7:

$$\dot{m}_L \cdot v_x + \dot{m}_S c_x + p_x \cdot A_M = \dot{m}_L (v_x + dv) + \dot{m}_S (c_x + dc) + (p_x + dp) \cdot A_M \quad (10)$$

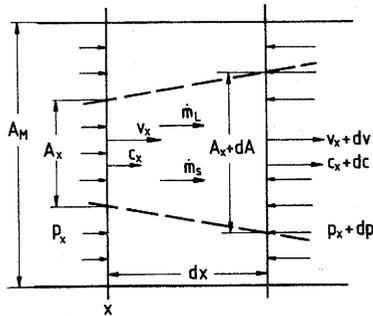


Bild 7: Volumenelement des Mischrohres bei Feststoffbeschleunigung mit Bezeichnungen für die Berechnung.

Die Geschwindigkeitsänderung  $dv$  des Treibstrahls ist dann:

$$dv = - \mu dc - \frac{A_M}{\dot{m}_L} \cdot dp \quad (11)$$

Mit  $\dot{m}_L = \rho_{LT} \cdot v_T \cdot \frac{\pi d_T^2}{4}$  und  $A_M = \frac{\pi d_M^2}{4}$

wird aus Gleichung (11):

$$dv = - \mu dc - \left(\frac{d_M}{d_T}\right)^2 \cdot \frac{1}{\rho_{LT} \cdot v_T} \cdot dp \quad (12)$$

Der umgewandelte Treibstrahlimpuls teilt sich auf in einen Anteil für die Feststoffbeschleunigung und einen Anteil für die Druckerhöhung. Der Druckgradient  $dp$  ist mit Gutbeladung erfahrungsgemäß kleiner als ohne Gutbeladung. Es wird daher angenommen, daß der Treibstrahl mit und ohne Fördergut die gleiche Impulsänderung und damit die gleiche Geschwindigkeitsänderung  $dv$  erfährt. Die Geschwindigkeit am Mischrohranfang ist um den Betrag der Strahlverzögerung durch die Feststoffbeschleunigung geringer. Nach Auflösen der Gutwolke ist die Konzentration des Feststoffes so gering, daß hierdurch keine wesentliche Querschnittsverengung und damit keine zusätzliche Beeinflussung der Luftgeschwindigkeit verursacht wird.

### 3.2 Beschleunigung, Bahnkurven und Geschwindigkeitsverlauf von Einzelteilchen im Gutaufgabeinjektor

Das Fördergut wird vom Treibstrahl umgelenkt und beschleunigt. Im Gutaufgabebereich tritt örtlich eine hohe Feststoffkonzentration auf mit relativen Teilchenabständen  $\Delta s/d_s \approx 2$ . Die dabei entstehenden Windschatteneffekte erniedrigen den Luftwiderstand der Einzelteilchen spürbar. Der Treibstrahl löst den Gutstrom aber rasch auf. Um die Bahnkurven und die Geschwindigkeitszunahme des Feststoffes zu berechnen, wird zunächst von Einzelteilchen ausgegangen, anschließend wird in Kapitel 3.3 der Einfluß der höheren Feststoffkonzentration auf die Beschleunigung abgeschätzt.

Der Berechnung der Teilchenbewegung wird folgende Modellvorstellung zugrunde gelegt: Die Feststoffteilchen treffen mit der Anfangsgeschwindigkeit  $c_{oy}$  senkrecht zur Strömungsrichtung der Luft auf den Treibstrahl, Bild 8.

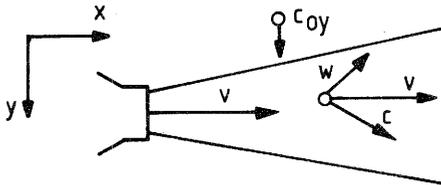


Bild 8: Feststoffteilchen im Treibstrahl

Die Luftgeschwindigkeit wird durch die in Kapitel 3.1 definierte mittlere Geschwindigkeit angegeben. Damit wird der Strömungsvorgang auf die beschleunigte Bewegung eines Einzelteilchens in einem ebenen Geschwindigkeitsfeld zurückgeführt und kann nach bekannten Gesetzmäßigkeiten [24 - 26] berechnet werden.

Die Beschleunigung eines Feststoffteilchens im Gutaufgabeinjektor wird durch den Luftwiderstand  $F_W$  und die Trägheitskraft  $F_T$  bestimmt. Die weiteren Kräfte, nämlich Schwerkraft,

Magnuskraft und Auftrieb sind sehr klein und dürfen vernachlässigt werden. Auch der Einfluß der Kompressibilität der Luft auf den Luftwiderstand bleibt unberücksichtigt, solange die Mach-Zahl kleiner 0,6 ist [27]. Der zusätzliche Widerstand aufgrund der instationären Bewegung kann vernachlässigt werden, da die Feststoffdichte sehr viel größer als die Luftdichte ist [28]. Die Turbulenz der Luftströmung bleibt ebenfalls unbeachtet, da trotz der Schwankungen der mittlere Luftwiderstand annähernd gleich wie bei der turbulenzfreien Strömung ist [29].

Damit gilt für die Beschleunigung  $\frac{d\vec{c}}{dt}$  eines kugelförmigen Teilchens mit der Dichte  $\rho_S$  und dem Durchmesser  $d_S$ :

$$\frac{d\vec{c}}{dt} = \frac{3}{4} \cdot c_w \cdot \frac{\rho_L}{\rho_S} \cdot \frac{(\vec{v} - \vec{c}) \cdot |\vec{v} - \vec{c}|}{d_S} \quad (13)$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  kugelförmiger Teilchen wird mit der Näherung (14) nach Kürten [26] berechnet:

$$c_w = \frac{21}{Re_S} + \frac{6}{\sqrt{Re_S}} + 0,28 \quad (14).$$

Die Reynolds-Zahl  $Re_S$  des Einzelteilchens ist:

$$Re_S = \frac{|\vec{v} - \vec{c}| \cdot d_S}{\nu_L} \quad (15).$$

$\nu_L$  ist die kinematische Viskosität der Luft. Die Gleichung (14) nähert den gemessenen Verlauf im Bereich  $0,1 < Re_S < 4 \cdot 10^3$  auf  $\pm 4 \%$  an. Für nicht kugelförmige Teilchen wird der  $c_w$ -Wert aus der Schwebegeschwindigkeit  $w_S$  des Feststoffes wie in Kapitel 5.1 beschrieben, ermittelt.

Durch Integration der Gleichungen für die Komponenten in x- und y-Richtung von Gleichung (13) erhält man die Feststoffgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und berechnet damit den Geschwindigkeitsverlauf und die Bahnkurven im Gutaufgabeinjektor. Weil eine geschlossene Lösung des Differential-

gleichungssystem nicht möglich ist, wurde ein numerisches Verfahren<sup>+</sup> angewandt. Dabei werden der Geschwindigkeitsverlauf und die Bahnkurve in kleinen Abschnitten linearisiert und mit einem vorgegebenen Zeitintervall  $\Delta t = 10^{-4}$  s die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta c_x$  und  $\Delta c_y$  sowie die Wegänderungen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  berechnet. Die Genauigkeit der so berechneten Bahnkurven und Geschwindigkeitsverläufe der Feststoffteilchen hängt hauptsächlich davon ab, wie gut der angenommene Verlauf der Luftgeschwindigkeit die tatsächlichen Verhältnisse wiedergibt. Das Rechenverfahren wurde für den Tischrechner (Hewlett-Packard HP 25 A mit Plotter) so programmiert, daß die Bahnkurven und Geschwindigkeitsverläufe unmittelbar gezeichnet wurden.

Die Bilder 9 bis 13 zeigen die wichtigsten Einflüsse auf die Bahnkurven und Geschwindigkeitsverläufe des Feststoffes für konstante Abmessungen des Gutaufgabeinjektors und Betrieb ohne Ansaugung zusätzlicher Luft (Luftansaugverhältnis  $q = 1,0$ ). Die Eigenschaften der Feststoffe wurden entsprechend den bei den eigenen experimentellen Untersuchungen verwendeten Förderergütern gewählt (Kapitel 5.1). Die Widerstandsbeiwerte von Polystyrolgranulat, Mais und groben Glaskugeln wurden aus den gemessenen Schwebegeschwindigkeiten ermittelt und als Konstante in die Berechnung eingesetzt, was im Bereich  $5 \cdot 10^2 < Re_S < 10^5$  mit guter Näherung zulässig ist. Als Eintrittsgeschwindigkeit  $c_{oy}$  des Feststoffes wurde 3 m/s angenommen, entsprechend einer Fallhöhe von 0,5 m. Feine Glaskugeln erreichen als Einzelteilchen im freien Fall aufgrund ihres Luftwiderstandes allerdings nur 0,34 m/s. Um den Einfluß verschiedener Eintrittsgeschwindigkeiten bei der Berechnung auszuschalten, wurde aber einheitlich mit  $c_{oy} = 3$  m/s gerechnet. Wie spätere Beobachtungen zeigten, erreicht die dichte Gutwolke feiner Glaskugeln etwa 3 m/s Fallgeschwindigkeit.

Die Bahnkurven der verschiedenen Förderergüter, Bild 9, gehen weit auseinander; während die feinen Glaskugeln sehr flache Bahnkurven aufweisen und im Randbereich des Treibstrahls bleiben, treffen die groben Glaskugeln, die eine Schwebegeschwindigkeit von  $w_S = 15,8$  m/s haben, etwa 230 mm nach der Treib-

<sup>+</sup> Muschelknautz, E.: Mehrphasenströmungstechnik. Vorlesung Universität Stuttgart 1980

düse auf die Mischrohrwand. Die Bahnkurven von Polystyrol und Mais liegen entsprechend ihren Schwebegeschwindigkeiten von 6,7 m/s bzw. 10,6 m/s dazwischen.

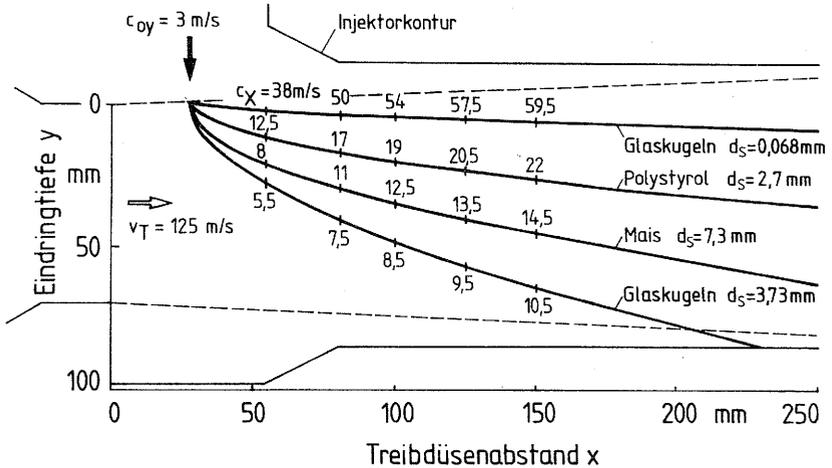


Bild 9: Berechnete Bahnkurven im Injektor für verschiedene Fördergüter. Injektor:  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm; feine Glaskugeln:  $d_S = 0,068$  mm,  $c_w = f$  (Re); Polystyrol:  $d_S = 2,7$  mm,  $c_w = 0,71$ ; Mais:  $d_S = 7,3$  mm,  $c_w = 0,93$ ; grobe Glaskugeln:  $d_S = 3,7$  mm,  $c_w = 0,48$ . (Weitere Stoffeigenschaften in Kapitel 5.1).

Die Geschwindigkeitsverläufe der Einzelteilchen, Bild 10, wurden unter Vernachlässigung der Wandstöße berechnet. Im Anfangsbereich des Treibstrahls steigt die Geschwindigkeit bei allen Fördergütern zuerst steil an und geht im Mischrohr in einen flacheren Verlauf über. Die feinen Glaskugeln werden mit annähernd  $38\ 000$  m/s<sup>2</sup> beschleunigt und erreichen nach etwa 200 mm die mittlere Geschwindigkeit der Luft im Mischrohr. Aufgrund ihrer Trägheit folgen sie der Abnahme der Luftgeschwindigkeit im Diffusor nur verzögert und sind 0,5 m nach dem Injektor noch etwa 8 m/s schneller als die Luft. Die übrigen Fördergüter werden weit schwächer beschleunigt; z.B. die groben Glaskugeln

mit ca.  $600 \text{ m/s}^2$ . Anhand von Bild 10 kann man die Geschwindigkeitsverläufe bei anderen Mischrohr­längen und anderen Misch­rohrdurchmessern abschätzen. Zum Beispiel würde eine Ver­länge­rung des Misch­rohres oder eine Verkürzung um ca. 200 mm die Geschwindigkeit der feinen Glaskugeln nur unwesentlich beein­flussen, weil Luft- und Feststoffgeschwindigkeit annähernd gleich sind. Bei den übrigen Fördergütern dagegen erfolgt im ge-

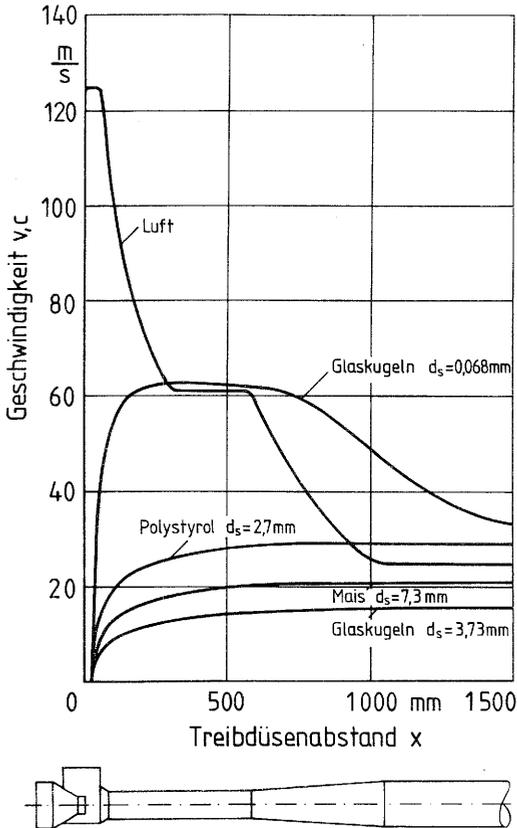


Bild 10: Verlauf der Luftgeschwindigkeit  $v$  und der berechneten Einzelkorngeschwindigkeit  $c$  im Gutaufgabereinjektor.  $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $d_M = 100 \text{ mm}$ ,  $l_M = 500 \text{ mm}$ ,  $d_R = 155 \text{ mm}$  (weitere Maße in Bild 19).

samten Mischrohr noch eine Geschwindigkeitszunahme, so daß durch Verlängern oder Verkürzen die Geschwindigkeit am Mischrohrende erhöht oder erniedrigt würde. Bei kleinerem Mischrohrdurchmesser wird durch die höhere Luftgeschwindigkeit auch eine höhere Gutgeschwindigkeit erreicht. In einem Mischrohr mit 80 mm Durchmesser und 500 mm Länge wird ein Polystyrolteilchen z.B. auf etwa 36 m/s beschleunigt, gegenüber etwa 28 m/s im Mischrohr mit 100 mm Durchmesser.

Bei höherer senkrechter Eintrittsgeschwindigkeit, Bild 11, dringen die Teilchen tiefer in den Treibstrahl ein. Die berechnete Feststoffgeschwindigkeit wird dadurch aber nur unwesentlich beeinflusst, weil die Luftgeschwindigkeit im Treibstrahl über den Querschnitt konstant ist. Bei einem Treibstrahl mit höherer Geschwindigkeit im Kern würde tieferes Eindringen zu größeren Beschleunigungen und damit zu höherer Geschwindigkeit des Fördergutes führen.

Gehen die Bahnkurven von verschiedenen Startpunkten aus, Bild 12, laufen sie trotzdem auf einen gemeinsamen Punkt zu, so daß der Startpunkt keinen großen Einfluß auf den weiteren Verlauf der Bahnkurven hat. Die Geschwindigkeit eines Teilchens auf der mittleren Bahnkurve ist gleich dem Mittelwert der Teilchengeschwindigkeiten auf den symmetrisch liegenden äußeren Bahnkurven.

Eine höhere Treibstrahlgeschwindigkeit  $v_T$ , Bild 13, bewirkt eine höhere Feststoffbeschleunigung und damit eine flachere Bahnkurve mit geringerer Eindringtiefe der Teilchen in den Treibstrahl.

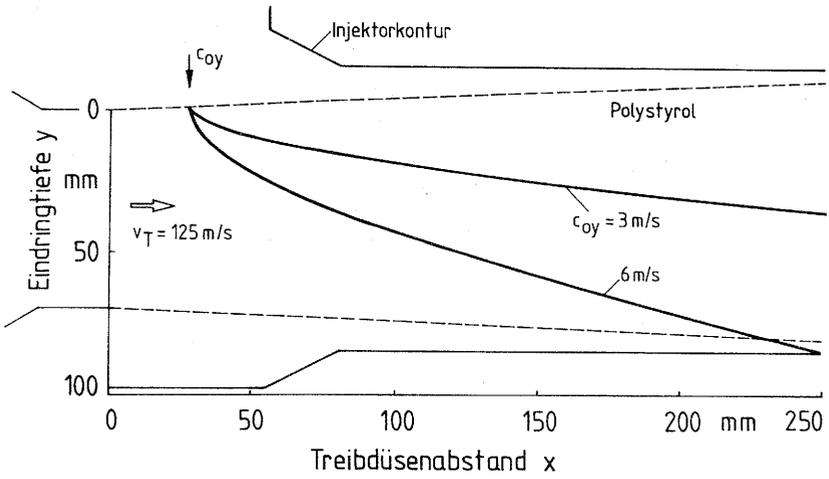


Bild 11: Einfluß der senkrechten Eintrittsgeschwindigkeit  $c_{oy}$  auf die berechneten Bahnkurven der Einzelteilchen bei Polystyrolgranulat. (Weitere Angaben wie bei Bild 9)

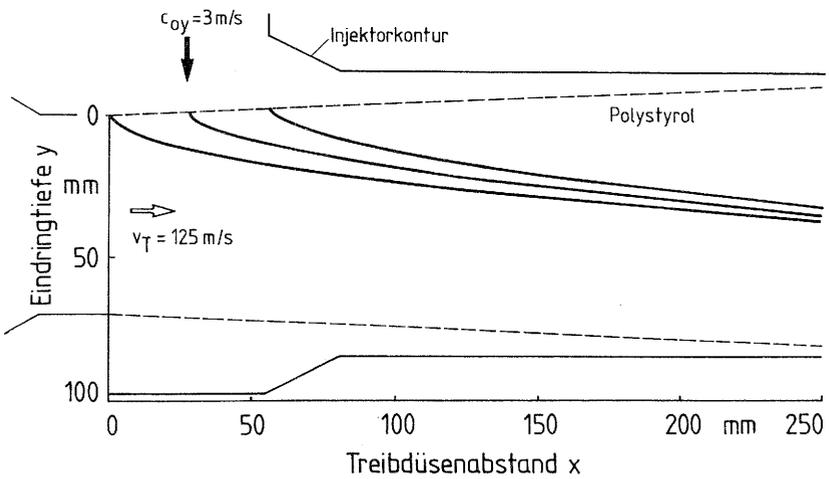


Bild 12: Einfluß des Startpunktes der einzelnen Fördergutteilchen auf die berechneten Bahnkurven von Polystyrolgranulat. (Weitere Angaben wie bei Bild 9)

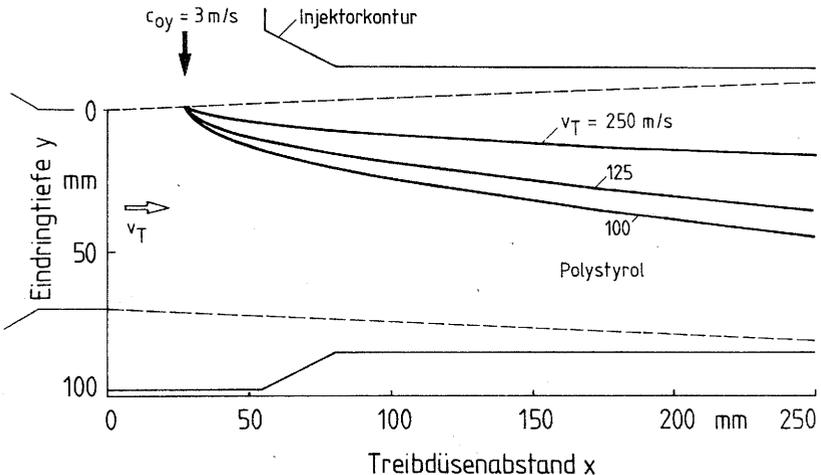


Bild 13: Einfluß der Treibstrahlgeschwindigkeit  $v_T$  auf die berechneten Bahnkurven von einzelnen Polystyrolgranulatteilchen. (Weitere Angaben wie bei Bild 9)

### 3.3 Beschleunigung von Teilchenströmen im Gutaufgabeinjektor

Im Aufgabebereich des Injektors ist die Feststoffkonzentration hoch, solange die Gutgeschwindigkeit  $c$  klein ist. Dadurch wird der Strömungswiderstand verringert. Durch den Widerstand der Partikel wird der Treibstrahl verzögert und teilweise abgelenkt. Im Mischrohr, im Diffusor und in der Förderleitung erfährt der Feststoffstrom zusätzliche Reibungs- und Stoßverluste. Die dabei wirkenden Kräfte vermindern die Beschleunigung. Weil die Reibungskraft bei großen Relativgeschwindigkeiten zwischen Luft und Feststoff aber viel kleiner als der Luftwiderstand ist, kann ihre Auswirkung auf die Luftgeschwindigkeit vernachlässigt werden.

Um die Unterschiede der Beschleunigung von Gutströmen und Einzelteilchen abzuschätzen, wird der Beschleunigungsvorgang

im Anfangsbereich durch folgendes Modell angenähert:

Der in der Mischkammer zugeführte Fördergutstrom wird als zylinderförmige Gutwolke mit der Geschwindigkeit  $c_{oy}$  betrachtet, Bild 14. Durch den quer zur Zylinderachse auftreffenden Treibluftstrahl wird die Gutwolke ähnlich wie ein Flüssigkeitsstrahl umgelenkt, wobei der Zylinder abgeplattet wird. Eine kleine Luftmenge strömt durch die Wolke, während der größte Teil der ankommenden Luft an der Wolke umgelenkt wird und vorbeiströmt.

Bei der Relativgeschwindigkeit  $w$  und der Anströmfläche  $A_Z$  ist der Luftwiderstand  $F_W$  der Wolke

$$F_W = c_W \cdot A_Z \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \quad (16)$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  wird im Mittel mit 0,5 angenommen.

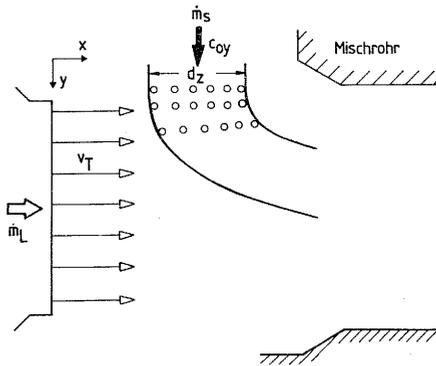


Bild 14: Schematische Darstellung des Gutaufgabebereiches im Injektor.

Die angeströmte Fläche  $A_Z$  der Wolke erhält man aus dem Zylinderdurchmesser  $d_Z$  und dem zurückgelegten Fallweg der Gutwolke zu

$$A_Z = d_Z \cdot c_y \cdot \Delta t \quad (17)$$

Die Beschleunigung  $a_Z$  des Gutstromes ist

$$a_Z = \frac{F_W}{M_Z} \quad (18)$$

darin ist die Masse  $M_Z$ :

$$M_Z = \frac{\pi}{4} \cdot d_Z^2 \cdot \rho_W \cdot c_y \cdot \Delta t \quad (19)$$

mit  $\rho_W$  als mittlerer Dichte der Gutwolke. Für die Beschleunigung gilt damit:

$$a_Z = c_w \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{d_Z \cdot \rho_W} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot w^2 \quad (20)$$

Die mittlere Dichte  $\rho_W$  der Gutwolke wird aus dem Durchmesser der Gutwolke, dem Durchsatz  $\dot{m}_S$  und der Fallgeschwindigkeit  $c_{oy}$  berechnet. Bei einem Gutdurchsatz von 0,55 kg/s und einer Treibstrahlgeschwindigkeit  $v_T = 125$  m/s ist z.B. die Anfangsbeschleunigung  $a_Z$  einer Gutwolke aus Polystyrolgranulat etwa  $1\,000$  m/s<sup>2</sup>, wogegen ein Einzelteilchen mit etwa  $3\,300$  m/s<sup>2</sup> beschleunigt wird. Noch größer sind die Unterschiede bei feinen Glaskugeln, die als Gutwolke am Anfang mit etwa  $1\,300$  m/s<sup>2</sup>, als Einzelkorn dagegen mit etwa  $38\,000$  m/s<sup>2</sup> beschleunigt werden. Bis zum Mischrohreinlauf erreicht die Gutwolke eine Geschwindigkeit von 5 bis 8 m/s, während ein frei fliegendes Einzelkorn bei Polystyrol etwa 12,5 m/s und bei feinen Glaskugeln etwa 38 m/s erreicht.

Auf die Feststoffteilchen im Randbereich der Gutwolke wirkt die hohe Beschleunigung wie beim Einzelkorn, wodurch der Teilchenstrom von außen nach innen rasch aufgelöst wird.

Um den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit des Fördergutes näherungsweise zu berechnen, wird die geringere Beschleunigung der Gutwolke im Anfangsbereich durch einen modifizierten Widerstandsbeiwert  $c_w^+ = k \cdot c_w$  berücksichtigt. Der Faktor  $k$  hängt vom relativen Teilchenabstand  $\Delta s/d_S$ , Gleichung (21) nach Muschelknautz [25], und im Bereich der Gutaufgabe zusätzlich vom Durchmesser  $d_Z$  der Gutwolke ab.

$$\frac{\Delta s}{d_S} = \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \frac{c}{v} \cdot \frac{\rho_S}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

Bei homogener Verteilung ist der relative Teilchenabstand bei Polystyrolgranulat aufgrund der kleineren Dichte etwa 25 % kleiner als bei den groben Glaskugeln. Im Gutaufgabebereich aber ist der Durchmesser der zugeführten Gutwolke bei höherer Feststoffdichte kleiner, weil ein kleinerer Dosierdüsendurchmesser für den gleichen Massendurchsatz ausreicht. Mit steigender Feststoffdichte wird somit der Durchmesser der Gutwolke kleiner, so daß die Beschleunigung entsprechend Gleichung (20) annähernd konstant bleibt und daher näherungsweise mit einem konstanten Faktor  $k$  für alle Fördergüter gerechnet werden kann.

Nach der Beobachtung der Feststoffbewegung und der vorher beschriebenen Beschleunigung der Gutwolke wird der Verlauf des modifizierten Widerstandbeiwertes in drei Bereiche unterteilt, wobei folgende Zahlenwerte für eine Gutbeladung  $\mu = 1$  angenommen werden:

$$\begin{aligned} c_w^+ &= 0,1 c_w \quad \text{für} \quad x \leq d_T \\ c_w^+ &= 0,5 c_w \quad \text{für} \quad d_T \leq x \leq 2 d_T \\ c_w^+ &= c_w \quad \text{für} \quad 2 d_T < x \end{aligned}$$

Für höhere Gutbeladungen wird der Korrekturfaktor  $k$  näherungsweise ermittelt, indem von einer konstanten Dichte  $\rho_w$  der zugeführten Gutwolke ausgegangen wird. Der Durchmesser  $d_Z$  der Gutwolke ist dann proportional der Wurzel aus dem Gutmassenstrom  $\dot{m}_S$ . Der Korrekturfaktor  $k$  ist näherungsweise umgekehrt proportional dem Durchmesser  $d_Z$  der Gutwolke und damit auch der Wurzel aus dem Gutdurchsatz bzw. der Gutbeladung.

Der berechnete Geschwindigkeitsverlauf des Teilchenstromes, Bild 15, verläuft sowohl für Polystyrolgranulat als auch für feine Glaskugeln deutlich unterhalb des Verlaufes der Einzelkorngeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsunterschiede vermindern sich mit dem Abstand von der Treibdüse.

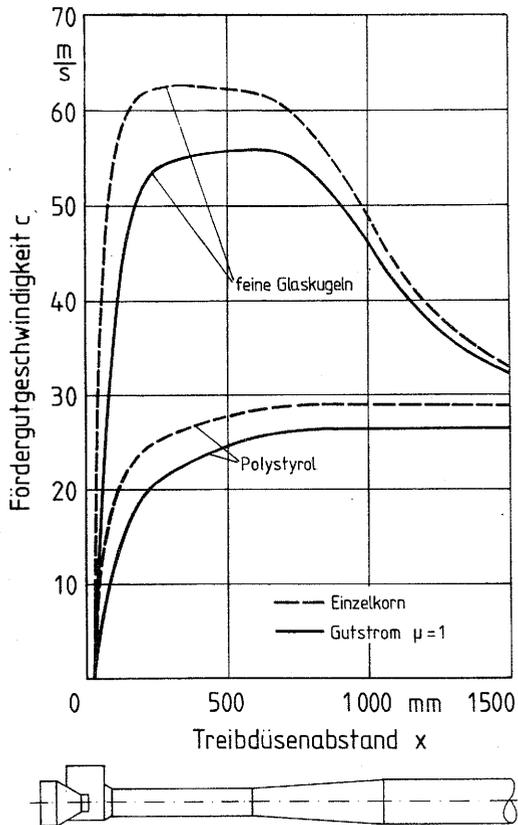


Bild 15: Vergleich des berechneten Verlaufes der Geschwindigkeit  $c$  des Einzelkorns und des Gutstromes bei Gutbeladung  $\mu = 1$ ,  $v_T = 125$  m/s,  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $d_R = 155$  mm. (Weitere Angaben wie zu Bild 9)

### 3.4 Druckverlauf im Gutaufgabeinjektor

Die Treibdüse wird nach den bekannten Gesetzmäßigkeiten [ 2 ] berechnet. Im Freistrahlbereich der Mischkammer bleibt der Druck konstant. Der Druckanstieg beginnt im Mischrohrreinlauf.

Im Mischrohr unterscheidet man zwei Bereiche. Im ersten ist der Treibstrahldurchmesser wesentlich kleiner als der Mischrohrdurchmesser, die Geschwindigkeiten im Wandbereich sind niedrig, so daß die Wandreibung von Luft und Feststoff vernachlässigt werden darf. Nach dem Impulssatz mit den Bezeichnungen von Bild 7 ergibt sich aus Gleichung (10) der Druckgradient  $dp$  für den Neutralzustand des Injektors:

$$dp = -\left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot \rho_{LT} \cdot v_T \cdot dv - \mu \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot \rho_{LT} \cdot v_T \cdot dc \quad (22).$$

Durch die höheren Geschwindigkeiten im Wandbereich tritt im zweiten Teil des Mischrohres ein merklicher Einfluß der Reibung auf. Vom Druckanstieg nach Gleichung (22) muß der Reibungsverlust abgezogen werden. Der Druckverlust  $dp_{RL}$  durch die Wandreibung der Luft ist:

$$dp_{RL} = \lambda_L \cdot \frac{dx}{d_M} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_3^2 \quad (23)$$

Als Bezugsgeschwindigkeit wird nach Flügel [ 5 ] die auf den Mischrohrquerschnitt  $A_M$  bezogene mittlere Luftgeschwindigkeit  $v_3$  definiert. Der Druckverlustbeiwert  $\lambda_L$  ist nach Flügel 0,01 nach Jung [ 7 ] und Broecker [ 8 ] 0,035. Die eigenen Messungen ergeben etwa 0,02. Der Druckverlust infolge der Wandreibung des Feststoffes ist:

$$dp_{RS} = \mu \cdot \lambda_S \cdot \frac{dx}{d_M} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v_3^2 \quad (24)$$

Als Bezugsgeschwindigkeit wird wie oben ebenfalls die mittlere Luftgeschwindigkeit  $v_3$  gewählt. Der Druckverlustbeiwert  $\lambda_S$  für die Wandreibung der beschleunigten Feststoffströmung wird in erster Näherung gleich dem Druckverlustbeiwert der stationären Feststoffströmung gesetzt.

Als Grenze zwischen den beiden Bereichen wird näherungsweise die Stelle festgelegt, an der bei  $(x - l_F) = 2,7 (d_M - d_T)$  der Treibstrahlerweiterungswinkel kleiner wird. Im Neutralzustand des Injektors ist damit der Druck  $p_3$  am Ende des Mischrohres:

$$p_3 = p_0 + \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot \rho_L \cdot v_T (v_2 - v_3) - \mu \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot \rho_{LT} \cdot v_T (c_3 - c_2) - (\lambda_L + \mu \lambda_S) \cdot \frac{1}{d_M} \cdot [l_M - 2,7(d_M - d_T)] \frac{\rho_L}{2} \cdot v_3^2 \quad (25)$$

Für  $l_M < 2,7(d_M - d_T)$  ist der Reibungsverlust vernachlässigbar.

Im Diffusor steigt der Druck bei weiterer Abnahme der Luftgeschwindigkeit an. Grobes Fördergut wird im Diffusor weiter beschleunigt, staubförmiges aber verzögert. Die Impulsänderung des Feststoffes verursacht zusätzliche Druckänderungen. Der Druckverlust infolge der Wandreibung des Feststoffes ist vernachlässigbar klein. Für die Druckänderung im Diffusor gilt schließlich:

$$dp = -\eta_D \cdot \rho_L \cdot v \cdot dv - \mu \cdot \rho_L \cdot v \cdot dc \quad (26).$$

Durch den Wirkungsgrad  $\eta_D$  werden die Verluste bei der Umwandlung der kinetischen Energie in potentielle Energie der Luft berücksichtigt. Bei Einphasenströmungen hängt der Wirkungsgrad vom Geschwindigkeitsprofil der Zuströmung und vom Erweiterungswinkel des Diffusors ab [30]. Für Mehrphasenströmungen liegen keine allgemeingültigen Ergebnisse vor. Untersuchungen von Muschelknautz [25] an einem Venturi-Wäscher ergaben eine Erhöhung des Wirkungsgrades durch die Beschleunigung von Wassertropfen im Diffusor.

Der gesamte Druckanstieg im Diffusor ist:

$$p_4 - p_3 = \eta_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot (v_3^2 - v_4^2) - \mu \cdot \rho_L \cdot \sqrt{v_4 \cdot v_3} \cdot (c_4 - c_3) \quad (27).$$

Dabei wird die Druckänderung durch die Impulsänderung des Feststoffes mit dem geometrischen Mittelwert der Luftgeschwindigkeit

keiten vereinfacht berechnet.

Ist die Feststoffgeschwindigkeit am Austritt des Diffusors höher als die Luftgeschwindigkeit, steigt der Druck durch die Feststoffverzögerung noch an. Die Druckänderung durch diese Impulsänderung des Feststoffes ist:

$$dp = -\mu \cdot \rho_L \cdot v \cdot dc \quad (28).$$

Für den Druckverlust durch die Reibung in der Förderleitung gelten die Gleichungen (23) und (24) sinngemäß.

Mit den abgeleiteten Beziehungen wurden die in Bild 16 dargestellten Druckverläufe von reiner Luft, Polystyrolgranulat und feinen Glaskugeln berechnet.

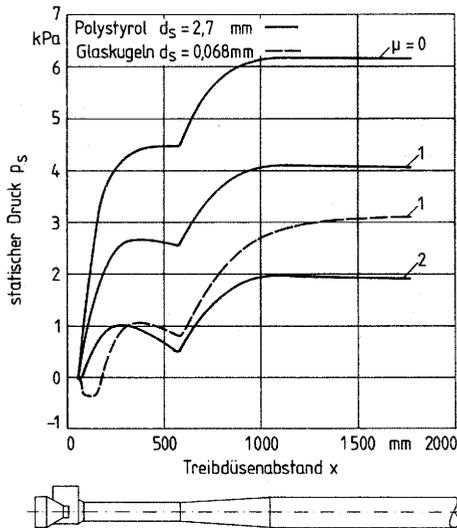


Bild 16: Berechneter Druckverlauf im Gutaufgabeinjektor bei Förderung von Polystyrolgranulat und feinen Glaskugeln.  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_m = 500$  mm,  $d_R = 155$  mm (weitere Abmessungen in Bild 19);  $\lambda_L = 0,02$ .  $\eta_D = 0,85$ .

Ohne Fördergut steigt der Druck im ersten Drittel des Mischrohres sehr steil linear an. Der Druckanstieg nimmt im weiteren Verlauf bis auf Null ab, wobei der statische Druck am Ende des Mischrohres etwa die Hälfte des dynamischen Druckes des Treibstrahles an der Treibdüse erreicht. Im Diffusor steigt der statische Druck auf etwa  $2/3$  des dynamischen Druckes des Treibstrahles an der Treibdüse weiter an. Mit zunehmender Gutbeladung  $\mu$  wird der Druckanstieg geringer. Im Mischrohr bildet sich ein Druckmaximum aus, das bei größerer Beladung niedriger und zum Mischrohranfang verschoben liegt. Feines Fördergut wird wesentlich stärker beschleunigt als grobes, daher fällt der Druck am Anfang des Mischrohres zunächst ab und steigt erst an, wenn der Feststoff annähernd die Luftgeschwindigkeit erreicht hat. Das Maximum ist weniger als halb so hoch wie bei Polystyrolgranulat. Im Diffusor und in der anschließenden Förderleitung wird das feine Fördergut wieder verzögert, wodurch in diesem Bereich ein größerer Druckanstieg als bei grobem Fördergut entsteht. Die berechneten Kurven werden in Kapitel 5.3 mit den Meßwerten verglichen.

### Druckanstieg im Injektor bei Ansaugung zusätzlicher Luft

Häufig werden Gutaufgabeinjektoren mit 10 bis 20 % zusätzlich angesaugter Luft betrieben. Zur Berechnung des Druckanstieges im Mischrohr und im Diffusor wird dafür ein vereinfachtes Verfahren beschrieben. Die zusätzlich angesaugte Luft muß im Mischrohr auf die gemeinsame Geschwindigkeit beschleunigt werden, wobei der Anfangsimpuls des zusätzlichen Luftmassenstromes vernachlässigt werden darf. Die Druckänderung im Mischrohr ergibt sich mit dem Impulssatz in erster Näherung zu:

$$p_3 - p_0 = \rho_{LT} \cdot v_T \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot (v_T - q)^2 \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot v_T - \mu \cdot q \cdot c_3) \\ - (\lambda_L + \mu \lambda_S) \cdot \frac{l_M}{d_M} \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot q^2 \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^4 \cdot v_T^2 \quad (29)$$

Dabei ist:

$$q = \frac{\dot{m}_{LT} + \dot{m}_{La}}{\dot{m}_{LT}} = \frac{\dot{m}_{Ln}}{\dot{m}_{LT}}$$

$$\mu = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_{LT} + \dot{m}_{La}}$$

$$v_3 = q \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot v_T$$

Weil durch den größeren Volumenstrom der Strahl die Mischrohrwand früher erreicht, erstreckt sich die Reibung auf die gesamte Mischrohrlänge  $l_M$ . Der Druckverlustbeiwert  $\lambda_L$  ist im Gegensatz zum Neutralzustand etwa 0,035 und stimmt damit mit dem von Broeker [ 8 ] und Jung [ 7 ] angegebenen Wert überein. Die Feststoffgeschwindigkeit  $c_3$  wird in erster Näherung gleich der Geschwindigkeit des Feststoffes im Neutralzustand gesetzt.

Der Druckanstieg im Diffusor ist höher als im Neutralzustand, weil die Luftgeschwindigkeit größer ist. Zur Berechnung wird Gleichung (27) umgeformt. Mit den Definitionen zu Gleichung (29) und mit

$$v_4 = q \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot v_T \quad \text{gilt:}$$

$$p_4 - p_3 = \eta_D \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot q^2 \cdot v_T^2 \cdot \left[ \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^4 - \left(\frac{d_T}{d_R}\right)^4 \right] \\ - \mu \cdot \rho_L \cdot q \cdot v_T \cdot \frac{d_T}{d_R} \cdot \frac{d_T}{d_M} \cdot (c_4 - c_3) \quad (30)$$

Die nach den Gleichungen (29) und (30) bestimmten Druckänderungen stimmen gut mit den später ermittelten Meßwerten überein, Tafel 1.

Ansaugverhältnis $q$	1,2	1,2	0,9	0,9	0,8
Gutbeladung $\mu$	0	1	0	1	0
Druck $p_3$ am Mischrohrende berechnet Pa	2 170	150	5 300	4 510	6 370
Druck $p_3$ am Mischrohrende gemessen Pa	2 200	370	5 550	4 200	6 300
Druck $p_5$ nach Injektor berechnet Pa	4 420	2 420	6 470	5 680	7 370
Druck $p_5$ nach Injektor gemessen Pa	4 750	2 520	6 870	5 400	7 500

Tafel 1: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Drücken bei verschiedenen Ansaugverhältnissen und Gutbeladungen.  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_M = 500$  mm;  $v_T = 125$  m/s, Polystyrol  $d_S = 2,7$  mm. (Weitere Förderguteigenschaften nach Kapitel 5.1)

#### Druckanstieg im Injektor bei Rückblasen von Treibluft

Wird der Widerstand in der Förderleitung erhöht, muß der Druck am Injektorende steigen. Dies kann entweder durch eine Ver-ringerung des Gutdurchsatzes erfolgen, wie in Bild 16 gezeigt wird, oder durch eine Verminderung der zusätzlich angesaugten Luft. Der Injektor geht dann vom Ansaugzustand über den Neutralzustand in den Rückblaszustand über, bei dem ein Teil der Treibluft über die Mischkammer und den Förderguttrichter aus dem Injektor geblasen wird. Bei Granulaten und anderen grobkörnigen Fördergütern kann der ausströmende Treibluftanteil etwa 10 bis 20 % betragen. Der Querschnitt des Gutaufgabetrichters und der Mischkammer muß so groß sein, daß die ausströmende Luft das Fördergut nicht zurückstaut. Der zusätzliche Druckanstieg entsteht, weil der zurückströmende Teil des Treibstrahles seinen vollen Impuls und noch einen der Rückströmgeschwindigkeit entsprechenden Impuls an die Strömung im Mischrohr abgibt. Die Rückströmung erfolgt durch den Ringquerschnitt zwischen Mischrohr und Treibstrahl, Bild 17.

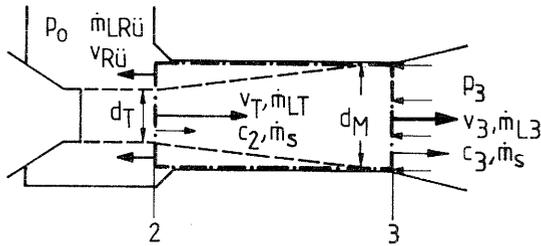


Bild 17: Schematische Darstellung der Rückströmung im Mischrohr des Injektors.

Der zusätzliche Druckanstieg  $\Delta p$  durch diese Impulsänderung gegenüber dem Neutralzustand ist:

$$\Delta p = (1 - q) \cdot \rho_{LT} \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \cdot v_T \cdot (v_T + v_{Rü}) \quad (31).$$

Der zusätzliche Druckanstieg wird größer bei kleinerem Mischrohrdurchmesser, weil sich die Impulsänderung auf eine kleinere Fläche bezieht und die Rückströmgeschwindigkeit steigt.

Der Druckanstieg im Diffusor ist bei Rückblasen kleiner als im Neutralzustand, weil die Luftgeschwindigkeit kleiner ist. Die Berechnung des Druckanstiegs wird nach Gleichung (30) durchgeführt. Die Feststoffgeschwindigkeiten werden in erster Näherung gleich den Feststoffgeschwindigkeiten bei Neutralzustand gesetzt. Die so berechneten Drücke am Mischrohrende und am Injektoraustritt stimmen sehr gut mit den Meßwerten überein, Tafel 1.

#### 4. Versuchseinrichtung

##### 4.1 Förderanlage

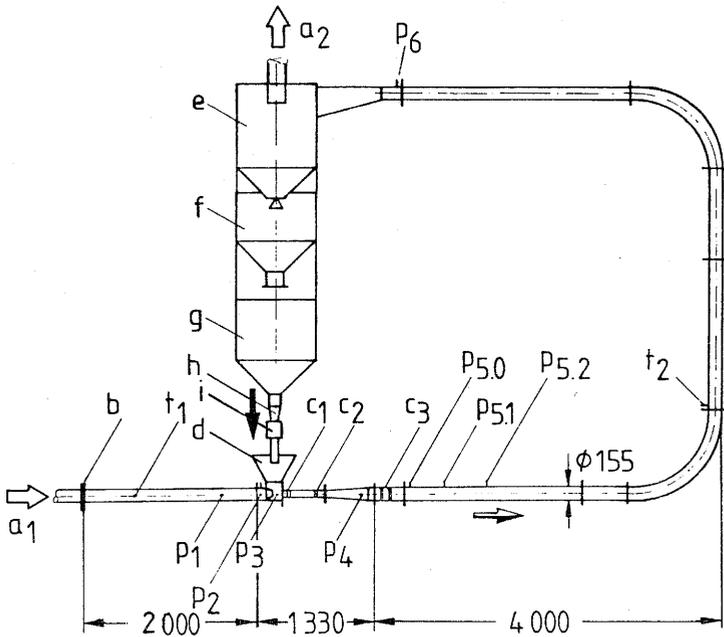
Zur experimentellen Untersuchung von Gutaufgabeinjektoren wurde eine Niederdruckförderanlage aufgebaut, die aus folgenden wesentlichen Teilen besteht, Bild 18:

- Gebläse und Durchsatzmeßstrecke für die Treibluft
- Gutaufgabeinjektor
- Förderleitung
- Abscheide- und Vorratsbehälter mit Fördergutdosierung
- Absauggebläse mit Drosselung für variable Förderdrücke und Durchsatzmeßstrecke für den Förderluftstrom nach dem Injektor.

Der Gutaufgabeinjektor für die Druck- und Geschwindigkeitsmessungen, Bild 19, entspricht der Grundform nach Bild 1. Es wurden Treibdüsen und Mischrohre mit den in Tafel 2 zusammengestellten Abmessungen verwendet, wobei der Mischrohrenlauf und der Diffusor jeweils passend verlängert wurden. Um die Feststoffströmung im Beschleunigungsbereich beobachten zu können, wurde ein weiterer Injektor mit Rechteckquerschnitt, Bild 20, angefertigt, bei dem das Mischrohr und der Diffusor austauschbar sind.

##### 4.2 Druckmessung

Um den Druckverlauf zu messen, wurden am Injektor, Bild 19, in kurzen Abständen Meßbohrungen mit 2 mm Durchmesser angebracht. Die Verbindungsleitungen zu den Druckmeßgeräten waren aus durchsichtigem Kunststoff, damit Verstopfungen, die besonders bei staubförmigem Fördergut auftraten, rasch erkannt werden konnten. Als Druckmeßgeräte dienten: U-Rohre mit Wasser oder Quecksilber, Betzmanometer und kapazitive Druckaufnehmer.



**Bild 18:** Versuchsanlage mit Gutaufgabeinjektor und Förderleitung.  $a_1$  Treibluft vom Gebläse;  $a_2$  Abluft zur Normventuridüse und zum Absauggebläse; b Normblende;  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  Feststoffgeschwindigkeitsmeßstellen; d Injektor; e Fördergutabscheider; f Zwischenspeicher; g Fördergutvorratsbehälter; h Fördergutdosiereinrichtung; i Rohrweiche (Injektor-Waage);  $p_1$  bis  $p_6$  Druckmeßstellen (weitere Druckmeßstellen am Injektor Bild 19);  $t_1$ ,  $t_2$  Temperaturmeßstellen.

Treibdüsen	Durchmesser $d_T$	mm	59,8	69,8	79,3		
Mischrohre	Durchmesser $d_M$	mm	80	90	100		
	Länge $l_M$	mm	500	500	0	250	500

Tafel 2: Treibdüsen und Mischrohre für den Gutaufgabeinjektor.

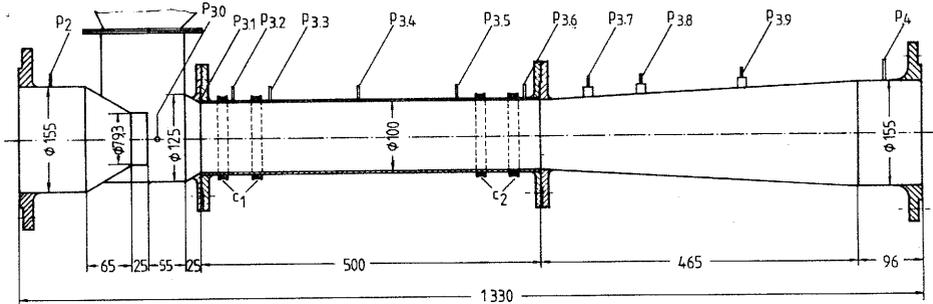


Bild 19: Gutaufgabeinjektor für Druck- und Feststoffgeschwindigkeitsmessungen.  $c_1$ ,  $c_2$  Feststoffgeschwindigkeitsmeßstellen;  $p_2$  bis  $p_4$  Druckmeßstellen.

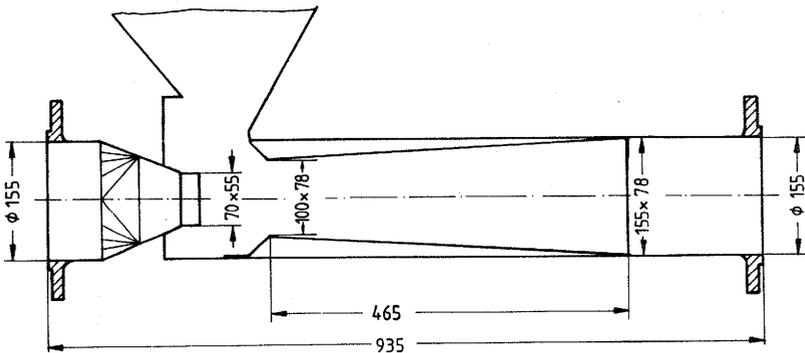


Bild 20: Gutaufgabeinjektor für Foto- und Videoaufnahmen.

### 4.3 Messung des Luft- und Feststoffdurchsatzes

#### Luftdurchsatz

Um das Ansaugverhältnis zu bestimmen, muß der Luftmassenstrom vor und nach dem Injektor ermittelt werden. Der Luftmassenstrom vor dem Injektor wurde mit einer Normblende, der Luftmassenstrom nach dem Injektor mit einer Normventuridüse nach DIN 1952 gemessen. Die Normventuridüse hat den Vorteil, daß sie unempfindlich gegen kleinere Staubbeimengungen ist. Vor den Meßgeräten wurde jeweils eine Einlaufstrecke von etwa 40 Rohrdurchmessern mit einem Wabengleichrichter und Lochscheibe nach VDI-Richtlinie 2040 angeordnet. Die Wirkdrücke und die mit Thermoelementen gemessenen Temperaturen wurden kontinuierlich registriert.

Während der Messung wurde der Zwischenspeicher luftdicht abgeschlossen. Obwohl dadurch nur ein diskontinuierlicher Betrieb möglich ist, wurde dieses Verfahren gegenüber einer kontinuierlichen Ausschleusung mit einer Zellenradschleuse vorgezogen, da bei einer Zellenradschleuse der Leckluftstrom von der Druckdifferenz abhängt [ 31 ] und damit nur schwierig zu korrigieren ist. Außerdem besteht bei körnigen Fördergütern die Gefahr von Beschädigungen.

#### Feststoffdurchsatz

Der Feststoffdurchsatz wurde mit konischen Düsen mit verschiedenen Austrittsdurchmessern und mit einem Flachschieber dosiert. Damit wurde sowohl bei staubförmigen als auch bei grobkörnigen Fördergütern ein gleichmäßiger Durchsatz erreicht. Allerdings mußte besonders bei den feinen Glaskugeln eine sorgfältige Erdung durchgeführt werden, um Durchsatzänderungen durch elektrostatische Aufladung zu vermeiden. Zur Bestimmung des Durchsatzes wurde der Gutstrom über eine Rohrweiche in einen Behälter umgelenkt und die Füllzeit für etwa 30 kg Feststoff gemessen (Durchsatzkennlinien im Anhang Bild 51).

#### 4.4 Messung der Luft- und Feststoffgeschwindigkeit

##### Geschwindigkeitsmessung der Luft

An mehreren Stellen im Injektor wurde das Geschwindigkeitsprofil mit Prandtl-Staurohren gemessen. Andere Sonden, wie z.B. Hitzdrahtanemometer oder Heißleitersonden, sind gegen mechanische Einwirkungen zu empfindlich oder haben einen zu kleinen Meßbereich. Das verwendete Prandtl-Staurohr war aus Edelstahl und hatte einen Meßkopfdurchmesser von 4 mm und eine Staurohrbohrung von 1,5 mm.

Der dynamische Druck und der Weg wurden mit elektrischen Meßaufnehmern gemessen und mit einem xy-Schreiber registriert. Weil bei Messungen mit feinkörnigen Fördergütern die Bohrung für den Gesamtdruck rasch verstopfte, wurde mit einem Gebläse die Druckmeßleitung in Intervallen gespült. Bei Luftgeschwindigkeiten größer 100 m/s wurde die Kompressibilität berücksichtigt. Für die Luftgeschwindigkeit gilt dann näherungsweise [ 32 ]

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\left(1 + \frac{1}{4} Ma^2\right) \cdot \rho_L}} \quad (32).$$

##### Messung der Feststoffgeschwindigkeit

Zur Geschwindigkeitsmessung von Feststoffteilchen sind folgende physikalische Prinzipien üblich:

1. Verweilzeitmessung
2. Doppler-Effekt
3. Impuls- bzw. Kraftmessung

Verweilzeitverfahren nach dem Prinzip fotografischer Methoden erfordern einen sehr großen Auswerteaufwand. Radiometrische Methoden konnten aus Sicherheitsgründen nicht eingesetzt werden. Optische Methoden wurden nicht angewendet, da die Justierung der Fotozellen und Lämpchen mit zunehmendem Rohrdurchmesser immer schwieriger wird und bereits bei 50 mm systema-

tische Fehler durch Dejustierung [18] auftreten.

Der Doppler-Effekt, der bei der Reflexion von mechanischen oder elektromagnetischen Wellen an bewegten Teilchen auftritt, wird zur Feststoffgeschwindigkeitsmessung mit Ultraschall [33], Mikrowellen [34] oder Laserstrahlen [35] angewendet. Da diese Verfahren auf kleine Teilchen beschränkt sind und sehr teure Geräte erfordern, kamen sie für die vorliegende Arbeit nicht infrage.

Mit Impulsmeßverfahren, wie sie beispielsweise von Barth [36] und Rink [37] angewendet wurden, kann die Feststoffgeschwindigkeit nach dem Austritt aus dem Injektor oder in einem längeren Rohrstück gemessen werden. Da durch die Meßapparatur die Strömung verändert wird, ist das Verfahren nicht geeignet, um die Geschwindigkeiten an mehreren Stellen im Injektor zu bestimmen.

Für die eigenen Messungen wurde daher ein Verweilzeitverfahren ausgewählt, bei dem die Zeitmessung mit Hilfe der Induktivitätsänderungen von zwei Spulen durch ferromagnetische Teilchen durchgeführt wird, siehe Bild 19. Das Meßprinzip wurde von Hehn [38] vorgeschlagen und von Fouad [39] ergänzt. Damit das Magnetfeld nicht abgeschirmt wird, wurden das Mischrohr und das Meßrohr nach dem Injektor aus Kunststoff gefertigt. Störeinflüsse durch elektrostatische Aufladung wurden durch eine aufgesprühte Graphitschicht und Erdung vermieden. Die Mitten der beiden Spulenpaare auf dem Mischrohr hatten je 50 mm Abstand, das Spulenpaar nach dem Injektor hatte 150 mm Mittenabstand. Bei den Abständen wurde berücksichtigt, daß bei zu kleiner Entfernung die Felder der beiden Spulen sich gegenseitig stören, während bei zu großer Entfernung im Bereich der Feststoffbeschleunigung die Mittelwertbildung zu ungenau wird. Die Meßsignale wurden mit einem Trägerfrequenzmeßverstärker verstärkt und von einem Kathodenstrahl-speicheroszilloskop registriert.

Die ferromagnetischen Teilchen wurden durch Bekleben von Fördergutteilchen mit Eisenpulver hergestellt, wobei etwa 10 mg ( $1,27 \text{ mm}^3$ ) Eisenpulver benötigt wurden, um ein gut auswertbares

Signal zu erhalten. Für feinkörnige Fördergüter kann das Meßverfahren daher nicht eingesetzt werden. Weil auch bei Polystyrolgranulat die Einzelkornmasse durch das Eisenpulver verdoppelt wird, wurden geschäumte Styroporkugeln als Trägermaterial zur Markierung verwendet. Weizen, Mais und grobe Glaskugeln haben größere Einzelkornmassen und die Verteilung der Kornmassen ist breiter, so daß die eisenbeklebten Teilchen innerhalb der Verteilung liegen. Die markierten Teilchen haben die gleiche mittlere Schwebegeschwindigkeit wie das jeweilige Fördergut, damit werden bei Reynolds-Zahlen  $Re_S > 10^3$  die markierten Teilchen und das Fördergut gleich beschleunigt.

## 5. Meßergebnisse und Vergleich mit theoretisch berechneten Werten

### 5.1 Förderguteigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften der Fördergüter sind in Tafel 3 zusammengestellt. Zusätzlich ist aus Bild 21 die Form der Teilchen zu ersehen. Die Größe der körnigen Fördergüter wird durch den Partikeldurchmesser  $d_S$ , der gleich dem Durchmesser der massengleichen Kugel ist, angegeben. Die Partikelgröße der staubförmigen Fördergüter wird durch die mittlere Siebmaschenweite  $d_{S50}$  gekennzeichnet (Siebkennlinien Anhang Bild 52).

Die Schwebegeschwindigkeiten von Hornschotenklee, Polystyrol, Weizen, Mais und den groben Glaskugeln wurden mit einem Steigrichter von 192,3 mm Innendurchmesser und 2 m Höhe gemessen. Um den Einfluß unterschiedlicher Luftdichte zu eliminieren, wurden die Luftgeschwindigkeiten auf die Bezugsluftdichte  $\rho_{LO} = 1,2 \text{ kg/m}^3$  bei konstantem dynamischem Druck umgerechnet [40]. Die Schwebegeschwindigkeiten der feinen Glaskugeln und des Quarzsandes konnten mit dem vorhandenen Schwebestand nicht gemessen werden, weil die Teilchen zu klein sind. Sie wurden aus den Siebkennlinien unter Annahme kugelförmiger massengleicher Teilchen iterativ berechnet (Schwebekennlinien Anhang Bild 53).

Guteigenschaften	Glas- kugeln fein 1 a <sub>1</sub>	Glas- kugeln fein 2 a	Quarz- sand b	Horn- schoten- klee c	Poly- styrol d	Weizen e	Mais f	Glas- kugeln grob g
Partikeldurchmesser d <sub>s</sub> (aus M <sub>s</sub> ) mm	-	-	-	1,08	2,7	3,6	7,3	3,73
Partikelgröße d <sub>s50</sub> (Sieb) mm	0,065	0,068	0,120	1,06	2,45	2,8	8,5	3,7
Einzelkornmasse M <sub>s</sub> mg	0,00035	0,0005	0,0025	0,85	11,2	33,5	256	79,4
Korndichte ρ <sub>s</sub> kg/m <sup>3</sup>	2 410	2 900	2 736	1 290	1 070	1 411	1 310	2 920
Schüttdichte ρ <sub>sch</sub> kg/m <sup>3</sup>	1 250	1 490	1 500	760	645	828	712	1 720
Schwebegeschwindigkeit w <sub>s</sub> (gemessen) m/s	-	-	-	4,7	6,7	8,4	10,6	15,8
Reynolds-Zahl Re <sub>ss</sub> (bei w <sub>s</sub> , d <sub>s</sub> )	1,17	1,53	6,10	340	1 206	2 016	5 160	3 930
Widerstandsbeiwert des Korn c <sub>ws</sub> (bei w <sub>s</sub> , d <sub>s</sub> )	-	-	-	0,69	0,71	0,79	0,93	0,48
Widerstandsbeiwert der massengleichen Kugel c <sub>wK</sub> (bei Re <sub>ss</sub> )	23,7	18,9	6,15	0,67	0,45	0,4	0,4	0,4
Schwebegeschwindigkeit der massengleichen Kugel w <sub>sK</sub> (berechnet) m/s	0,27	0,34	0,76	4,8	8,4	11,8	16,1	17,2
Formfaktor k <sub>f</sub>	-	-	-	0,98	0,80	0,71	0,66	0,92
Gleitreibungsbeiwert f <sup>1)</sup>	-	0,18	-	0,26	0,27	0,30	0,35	0,18
Elastizitätsmodul E <sup>2)</sup> N/mm <sup>2</sup>	-	8·10 <sup>4</sup>	-	-	26·10 <sup>2</sup>	27·10 <sup>2</sup>	10·10 <sup>2</sup>	8·10 <sup>4</sup>

1) Gegen blankes Stahlblech bei Gleitgeschwindigkeit 10 m/s

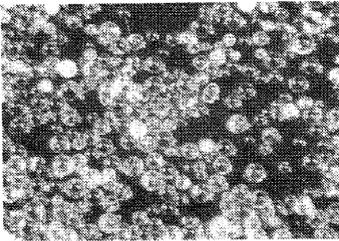
2) nach [41, 46 und Firmenschrift Kunststoffe BASF, Ludwigshafen, 1969]

Tafel 3: Kennzeichnung der Fördergüter.

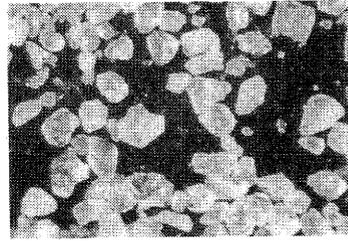
Aus der gemessenen Schwebegeschwindigkeit und dem Durchmesser  $d_S$  der massengleichen Kugel erhält man den Widerstandsbeiwert  $c_{wS}$  der beliebig geformten Partikel:

$$c_{wS} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} \cdot \frac{d_S \cdot g}{w_S^2} \quad (33).$$

Die so berechneten Widerstandsbeiwerte sind zum Teil wesentlich größer als die der massengleichen Kugeln bei gleicher Reynolds-Zahl. Daher ist die berechnete Schwebegeschwindigkeit der massengleichen Kugel größer als die gemessene Schwebegeschwindigkeit der Partikel. Das Verhältnis der gemessenen zur berechneten Schwebegeschwindigkeit ist ein Maß für die Abweichung von der Kugelform und wird nach Brauer [24] als Formfaktor  $k_f$  bezeichnet.



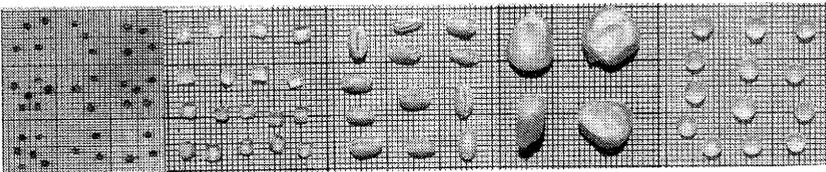
500  $\mu$ m



500  $\mu$ m

a) feine Glaskugeln

b) Quarzsand



c)Hornschootenklee

d)Poly-styrol

e) Weizen

f) Mais

g)grobe Glaskugeln

Bild 21: Aufnahmen der verschiedenen Partikel

Der Widerstandsbeiwert  $c_{wS}$  der beliebig geformten Partikel wurde mit dem Querschnitt der massengleichen Kugel bestimmt. Der tatsächliche Widerstandsbeiwert der Partikel hängt von der angeströmten Fläche und damit von der Orientierung des Teilchens in der Strömung ab. Bezieht man den Luftwiderstand auf die größte projizierte Fläche, ergeben sich die in Tafel 4 angegebenen Widerstandsbeiwerte für Polystyrol, Weizen und Mais. Diese  $c_w$ -Werte entsprechen denen vergleichbarer Körper [2], wobei die abgerundeten Kanten den Widerstand vermindern. Dieser Einfluß zeigte sich auch beim Vergleich von unbenutztem und gebrauchtem Polystyrolgranulat.

Fördergut	$A_{proj.}$ $mm^2$	$c_w$
Polystyrol	7	0,58
Weizen	14,3	0,54
Mais	75	0,50

Tafel 4: Größte projizierte Fläche und damit errechneter  $c_w$ -Wert bei Schwebegeschwindigkeit von Polystyrol, Weizen und Mais.

Unbenutztes Polystyrol hat scharfe, überstehende Kanten, und in diesem Zustand eine Schwebegeschwindigkeit von 6,2 m/s bei einem Widerstandsbeiwert  $c_{wS}$  von 0,83. Nach wenigen Förderumläufen sind die Kanten abgerundet, der Widerstandsbeiwert sinkt auf 0,71, die Schwebegeschwindigkeit steigt auf 6,7 m/s. Weil die Teilchen dauernd Taumel- und Rotationsbewegungen ausführen, wird die angeströmte Fläche und der Widerstandsbeiwert ständig verändert. Mohsenin [41] berichtet über Untersuchungen des Luftwiderstandes von Maiskörnern bei verschiedenen Orientierungen. Bei  $Re_s = 2\ 000$  betragen die Widerstandsbeiwerte 0,5 bis 1,15, im Mittel etwa 0,83 und entsprechen damit annähernd den eigenen Werten in Tafel 3 und 4. Die Widerstandsbeiwerte  $c_{wS}$  aus Tafel 3 können daher mit guter Näherung verwendet werden.

Die Gleitreibungsbeiwerte wurden an einer vorhandenen Meßeinrichtung mit einer rotierenden Scheibe [42] mit 1,0 m Durchmesser, die eine auswechselbare Oberflächenauflage aus blankem oder verzinktem Stahlblech oder aus PVC hatte, bei  $0,4 \text{ N/cm}^2$  Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeiten von 2 - 5 - 10 m/s bestimmt. Mit steigender Gleitgeschwindigkeit fallen die Reibungsbeiwerte leicht ab, Bild 54 im Anhang. Die Reibung gegen verzinktes Stahlblech war geringfügig höher, gegen PVC etwas kleiner als gegen blankes Stahlblech. Die ermittelten Gleitreibungsbeiwerte liegen im Bereich der üblichen Literaturangaben [42, 43, 45]

Die Gutfeuchte von Hornschotenklee, Weizen und Mais, die neben der Sorte einen erheblichen Einfluß auf die Stoffeigenschaften hat [41, 44], betrug 11 bis 13 %. Zwischen den Versuchen wurde das Fördergut mit einem Steigsichter von Abrieb und Bruchkorn gereinigt. Besonders bruchempfindlich war Mais, während bei Weizen und Polystyrolgranulat vorwiegend Abrieb auftrat. Auch bei den groben Glaskugeln entstanden nur wenige gebrochene und abgesplitterte Anteile.

## 5.2 Feststoffbewegung im Gutaufgabeinjektor

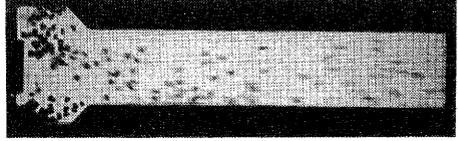
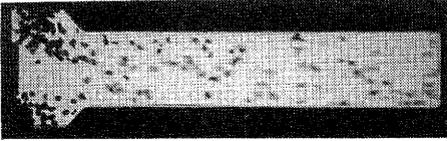
Um einen Einblick in die Vorgänge im Gutaufgabeinjektor zu erhalten, wurde die Feststoffbewegung fotografiert und gleichzeitig mit der Videokamera aufgezeichnet. Die Bilder 22 und 23 zeigen einige typische Aufnahmen der Feststoffbewegung in der Mischkammer und im Mischrohr sowie im Diffusor. Das Fördergut fällt als zylinderförmige Gutwolke in die Mischkammer und wird vom Treibluftstrahl umgelenkt, ähnlich wie in Kapitel 3.3 als Modell beschrieben. Die Eindringtiefe wird mit abnehmender Schwebegeschwindigkeit des Fördergutes geringer, was den berechneten Bahnkurven entspricht. Die dichte Gutwolke, Bild 22, wird beim grobkörnigen Mais nach etwa 80 bis 90 mm, bei Polystyrolgranulat und den feinen Glaskugeln nach etwa 180 bis 200 mm aufgelöst. In Bild 22 b ist bei Polystyrolgranulat im Neutralzustand  $q = 1,0$  zu sehen, wie die senkrechte Gutwolke nach hinten abgelenkt wird. Diese Ablenkung wird durch die im

Injektor im Neutralzustand

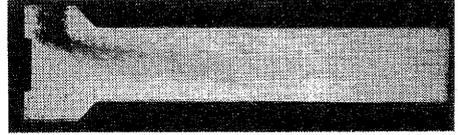
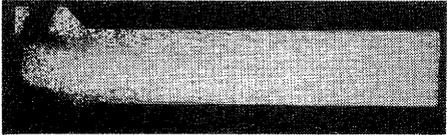
$$q = 1,0$$

Injektor mit Luftansaugung

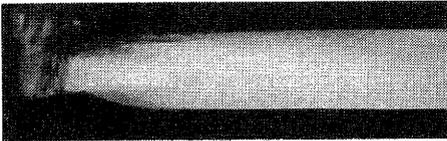
$$q = 1,2$$



a) Mais



b) Polystyrol



c) feine Glaskugeln

Bild 22: Feststoffbewegung in der Mischkammer und im 500 mm langen Mischrohr bei 0,55 kg/s Gutdurchsatz und einer senkrechten Eintrittsgeschwindigkeit  $c_{oy}$  von 3 m/s.  $v_T = 125$  m/s; Belichtungszeit  $t = 1$  ms.

Freistrahلبereich mitgerissene und im Mischrohr wieder zurückgeblasene Luft verursacht. Diese Luft bildet einen flachen Ringwirbel aus, in dem leichte Teilchen zirkulieren und bei feinen Glaskugeln die Beobachtung erschweren. Ein Teil des Fördergutes bleibt im Neutralzustand in der Randzone des Mischrohres und wird deshalb weniger beschleunigt.

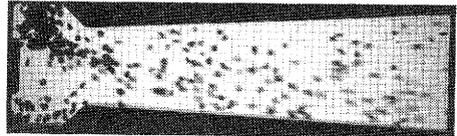
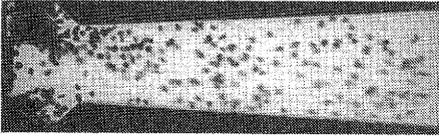
Aus den Fotografien wurde mit der Belichtungszeit und dem zurückgelegten Weg die Feststoffgeschwindigkeit am Mischrohr-ende bestimmt. Sie beträgt bei Mais etwa 10 bis 12 m/s und stimmt damit gut überein mit der nach dem induktiven Meßver-

Injektor im Neutralzustand

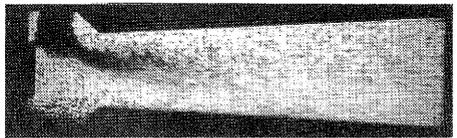
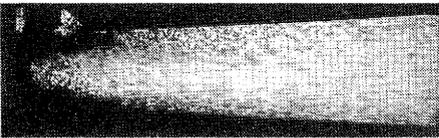
$$q = 1,0$$

Injektor mit Luftansaugung

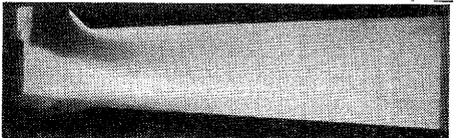
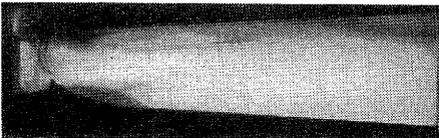
$$q = 1,2$$



a) Mais  $\dot{m}_S = 1,1 \text{ kg/s}$



b) Polystyrol  $\dot{m}_S = 1,1 \text{ kg/s}$



c) feine Glaskugeln  $\dot{m}_S = 0,56 \text{ kg/s}$

Bild 23: Feststoffbewegung in der Mischkammer und im Diffusor des Injektors ohne Mischrohr.

$$c_{0y} = 3 \text{ m/s}, v_T = 125 \text{ m/s}, \text{ Belichtungszeit } t = 1 \text{ ms.}$$

fahren ermittelten mittleren Geschwindigkeit.

Wird Luft zusätzlich angesaugt  $q = 1,2$ , dringt das Fördergut tiefer in den Treibstrahl ein. Die Ablagerungen am Boden der Mischkammer sind geringer.

Beim Injektor ohne Mischrohr, Bild 23, zeigen sich die gleichen Tendenzen wie beim Injektor mit Mischrohr, Bild 22.

### 5.3 Druckverlauf

Die Strömungsvorgänge im Gutaufgabeinjektor werden durch die Verläufe der Luft- und Feststoffgeschwindigkeit sowie durch den Druckverlauf gekennzeichnet. Typische Verläufe sind in Bild 24 dargestellt.

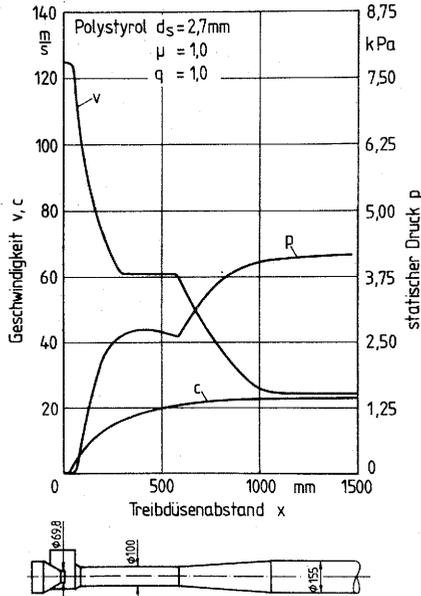


Bild 24: Verlauf des statischen Druckes  $p$ , der Luftgeschwindigkeit  $v$  und der Feststoffgeschwindigkeit  $c$  im Injektor.  
 $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $d_M = 100 \text{ mm}$ ,  $l_M = 500 \text{ mm}$ ,  $d_R = 155 \text{ mm}$ .

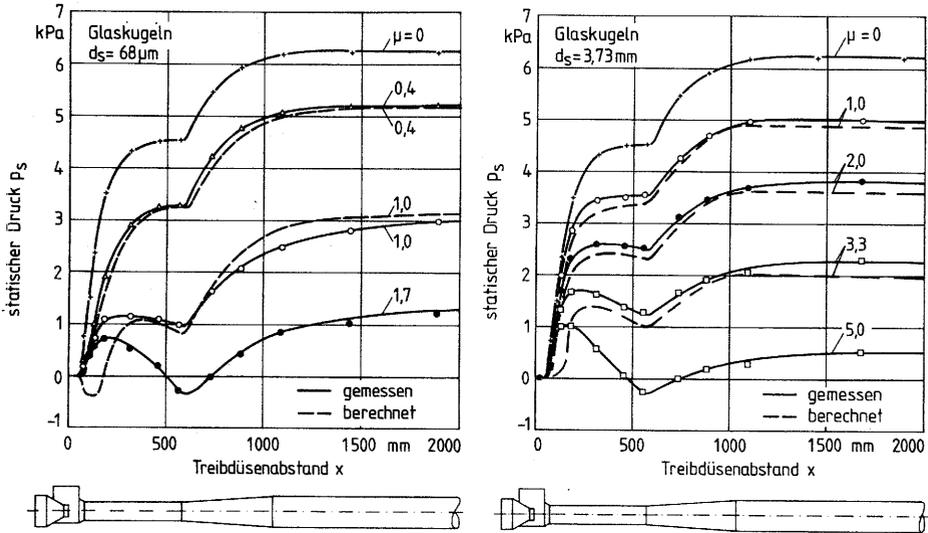
Die Luftgeschwindigkeit  $v$  beginnt mit der Treibstrahlgeschwindigkeit  $v_T$ , fällt am Anfang des Mischrohres steil ab bis zur mittleren Geschwindigkeit  $v_M$  im Mischrohr und nimmt im Diffusor weiter ab bis zur Geschwindigkeit  $v_R$  in der Förderleitung. Die Feststoffgeschwindigkeit  $c$  steigt zunächst steil an, geht dann in einen flacheren Verlauf über und erreicht am Ende des Injektors etwa 80 % der Luftgeschwindigkeit. Der statische Druck  $p$  nimmt

zunächst rasch zu bis zu einem Maximum in der Mitte des Mischrohres bei etwa 30 % des dynamischen Druckes des Treibstrahles und fällt dann wieder leicht ab. Im Diffusor steigt der Druck bis zum Ende des Injektors auf etwa 45 % des dynamischen Druckes des Treibstrahles weiter an.

Die Bilder 25 bis 30 zeigen den Einfluß verschiedener Parameter auf den Druckverlauf. Mit steigendem Gutdurchsatz, Bild 25, wird der Druckanstieg, besonders im Mischrohr, geringer. Das Druckmaximum verschiebt sich in Richtung Mischrohranfang, und der Druckabfall wird größer. Durch eine Verkürzung des Mischrohres könnte dieser Druckverlust vermieden werden. Bei den größeren Glaskugeln verringert sich auch der Druckanstieg im Diffusor, da das Fördergut noch beschleunigt wird. Der maximale Druck bei grobem Fördergut wird im Abstand von etwa 4 Förderleitungsdurchmessern nach dem Diffusoraustritt erreicht. Die feinen Glaskugeln dagegen werden im Diffusor und in der anschließenden Förderleitung verzögert, so daß in diesem Bereich der Druck mehr ansteigt als ohne Gutbeladung. Nach dem Diffusor nimmt der Druck auf einer Länge von etwa 10 Förderleitungsdurchmessern noch um etwa 20 % zu.

Die berechneten Drücke nähern den gemessenen Verlauf sowohl bei den feinen als auch bei den groben Glaskugeln gut an. Die Unterschiede am Injektorende betragen weniger als 10 %. Nur im Anfangsbereich des Mischrohres ist der berechnete Druck bei den Glaskugeln bei Gutbeladung  $\mu = 1,0$  und bei den groben Glaskugeln bei Gutbeladung  $\mu = 3,3$  zunächst deutlich niedriger. Diese Abweichungen entstehen, weil in erster Näherung mit der Geschwindigkeit des Einzelkorns gerechnet wurde. Wird die Geschwindigkeit der Gutwolke mit Hilfe des modifizierten Widerstandsbeiwertes  $c_w^+$  nach Kapitel 3.3 ermittelt, ist eine bessere Annäherung auch in diesem Bereich zu erreichen.

In der kürzlich erschienenen Arbeit von Wagenknecht [ 47 ] wird ebenfalls ein Verfahren zur Berechnung von Gutaufgabeinjektoren mitgeteilt. Bei diesem Verfahren werden die durch die Luftgeschwindigkeitsänderungen verursachten Druckänderungen mit dem Energiesatz berechnet und die Energieverluste durch empirisch



**Bild 25:** Einfluß der Gutbeladung  $\mu$  auf den Druckverlauf im Neutralzustand des Injektors bei grob- und feinkörnigen Glaskugeln.  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_M = 500$  mm,  $p_{dT} = 9,4$  kPa.  $v_T = 125$  m/s,  $\eta_D = 0,85$  für Berechnung.

ermittelte Umsetzungsgrade berücksichtigt. Die Druckänderungen durch die Änderung der Feststoffgeschwindigkeit werden nach dem Impulssatz berechnet. Die Bewegungsgleichung des Feststoffes erfordert zur Lösung ein numerisches Verfahren, wobei der Luftgeschwindigkeitsverlauf durch abschnittsweise konstante Mittelwerte ersetzt wird. Abweichungen von den Meßwerten werden durch empirische Korrekturfaktoren berücksichtigt. Ein kontinuierlicher Druckverlauf kann nach diesem Rechenverfahren nicht ermittelt werden. Der damit berechnete Druck ist am Mischrohrende um etwa 16 % und am Injektoraustritt um etwa 18 % höher als die in Bild 24 angegebenen eigenen Meßwerte. Das eigene Rechenverfahren liefert jeweils etwa 8 % zu niedrige Werte.

Die Förderguteigenschaften beeinflussen den Druckverlauf, Bild 26, erheblich. Mit abnehmender Schwebegeschwindigkeit wird der Druckanstieg geringer, da die höhere Beschleunigung von feinerem Fördergut zu größeren Verlusten führt.

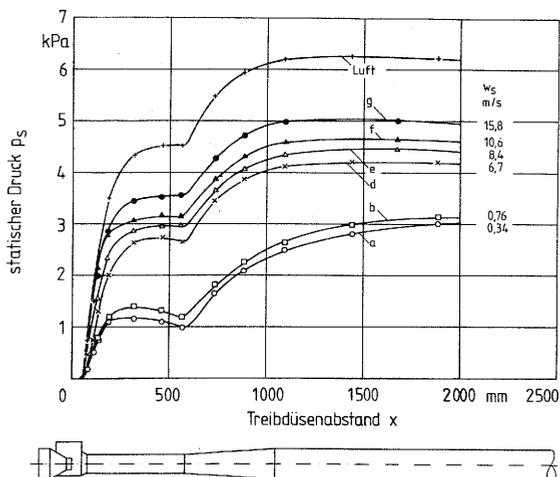
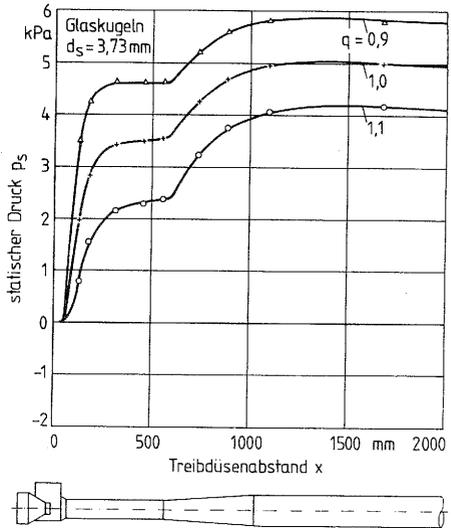
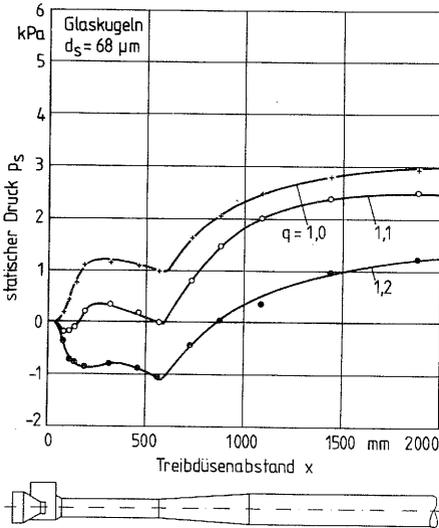


Bild 26: Einfluß der Feststoffeigenschaften auf den Druckverlauf im Neutralzustand des Injektors bei Gutbeladung  $\mu = 1$ .  
 $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_M = 500$  mm,  $p_{dT} = 9,4$  kPa.  
 a = Glaskugeln  $d_S = 0,068$  mm, b = Quarzsand  $d_S = 0,12$  mm  
 d = Polystyrol  $d_S = 2,7$  mm, e = Weizen  $d_S = 3,6$  mm,  
 f = Mais  $d_S = 7,3$  mm, g = Glaskugeln  $d_S = 3,73$  mm (weitere Stoffeigenschaften Tafel 3).

Bild 27 zeigt den Einfluß der Luftansaugung auf den Druckverlauf bei feinen und bei groben Glaskugeln. Zusätzlich angesaugte Luft verursacht einen wesentlichen Druckverlust im Mischrohr, während im Diffusor aufgrund der höheren Geschwindigkeiten ein größerer Druckanstieg als im Neutralzustand erfolgt. Zum Beispiel bewirken bereits 10 % zusätzlich angesaugte Luft bei den groben Glaskugeln nahezu die gleiche Druckabnahme am Injektoraustritt wie eine Erhöhung der Gutbeladung von  $\mu = 1$  auf  $\mu = 2$ . Bei den feinen Glaskugeln wird bei 20 % zusätzlich angesaugter Luft nur



**Bild 27:** Vergleich der Druckverläufe im Injektor bei Rückblasen  $q = 0,9$ , bei Neutralzustand  $q = 1,0$  und bei Ansaugung zusätzlicher Luft  $q = 1,1$  und  $q = 1,2$  bei konstantem Gutdurchsatz  $\dot{m}_S = 0,55 \text{ kg/s}$ ,  $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $d_M = 100 \text{ mm}$ ,  $l_M = 500 \text{ mm}$ ,  $p_{dT} = 9,4 \text{ kPa}$ .

noch etwa die Hälfte des maximalen Druckes nach dem Injektor erreicht wie im Neutralzustand. Durch Rückblasen von 10 % Treibluft wird dagegen bei den groben Glaskugeln im Mischrohr ein zusätzlicher Druckanstieg von etwa 30 % gegenüber dem Neutralzustand erreicht. Der Druckanstieg im Diffusor ist aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten etwas niedriger als im Neutralzustand, so daß insgesamt der Druck um etwa 20 % zunimmt. Der Gutaufgabeinjektor sollte daher für eine wirtschaftliche Arbeitsweise möglichst im Neutralzustand oder, soweit von der Staubbelastung her zulässig, bei etwa 10 bis 15 % Rückblasen betrieben werden.

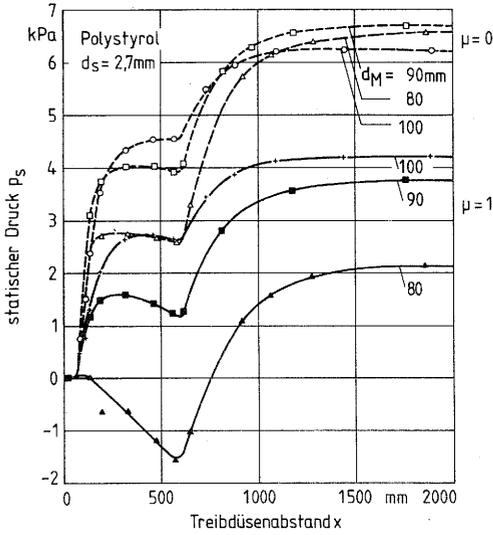
Ein Vergleich von Meß- und Rechenwerten wurde in Kapitel 3.4 durchgeführt und ergab eine gute Übereinstimmung.

Die Bilder 28 bis 30 zeigen den Einfluß der geometrischen Verhältnisse des Injektors. Mit kleiner werdendem Mischrohrdurchmesser, Bild 28 a, wird bei konstantem Treibdüsendurchmesser und einer konstanten Mischrohrlänge  $l_M = 500$  mm, der statische Druck im Mischrohr niedriger. Das Druckmaximum wird in Richtung Mischrohranfang verschoben. Der Druck fällt zum Mischrohrende besonders bei Gutbeladung stärker ab, da durch die höhere Luftgeschwindigkeit die Verluste durch Feststoffbeschleunigung und Wandreibung zunehmen.

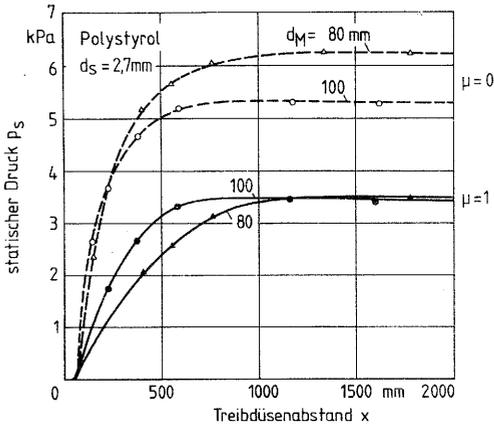
Ohne Fördergut unterscheiden sich die Drücke nach dem Injektor nur wenig, wobei der höchste Druck mit dem Mischrohr mit Durchmesser  $d_M = 90$  mm erreicht wird. Mit Fördergut dagegen wird der höchste Druck mit dem Mischrohr mit Durchmesser  $d_M = 100$  mm erreicht, während die Drücke bei den anderen Mischrohren wesentlich niedriger liegen. Im Diffusor steigt der Druck bei kleinem Mischrohrdurchmesser aufgrund der höheren Geschwindigkeitsdifferenz mehr als beim größeren Mischrohr.

Ohne Mischrohr, Bild 28 b, ist der Durchmesser  $d_M$  gleich dem Anfangsdurchmesser des Diffusors. Der Druck am Injektorende ist beim Durchmesser  $d_M = 80$  mm um etwa 20 % höher als beim größeren Durchmesser  $d_M = 100$  mm. Bei Gutbeladung  $\mu = 1$  steigt der Druck beim kleineren Durchmesser flacher an als beim größeren Durchmesser, aber beide Druckverläufe erreichen den gleichen Endwert.

Mit den Bildern 24 bis 28 wurde bereits gezeigt, daß der Druckverlauf im Mischrohr ein Maximum aufweist, dessen Lage von der Gutbeladung und den Förderguteigenschaften sowie vom Mischrohrdurchmesser abhängt. Wenn das Mischrohr an der Stelle des Druckmaximums endet, kann ein unnötiger Druckverlust vermieden und dadurch ein höherer Enddruck erreicht werden, wie Bild 29 zeigt. Bei zu kurzem Mischrohr erfolgt der Impulsaustausch unvollständig, der Enddruck wird geringer, z.B. Mischrohrlänge  $l_M = 250$  mm und  $l_M = 0$  bei Gutbeladung  $\mu = 0$  oder  $l_M = 0$  bei  $\mu = 1$ . Bei höheren Beladungen von Polystyrolgranulat, etwa ab  $\mu = 2$ , wird der Injektor ohne Mischrohr günstiger als der mit Mischrohr. Bei der Berechnung des Druckes für den Injektor ohne Mischrohr muß



a) mit Mischrohr  
 $l_M = 500\text{ mm}$



b) ohne Mischrohr

**Bild 28:** Einfluß des Mischrohrdurchmessers  $d_M$  auf den Druckverlauf bei Neutralzustand  $q = 1,0$ .  $d_T = 69,8\text{ mm}$ ,  $p_{dT} = 9,4\text{ kPa}$ ,  $v_T = 125\text{ m/s}$ .

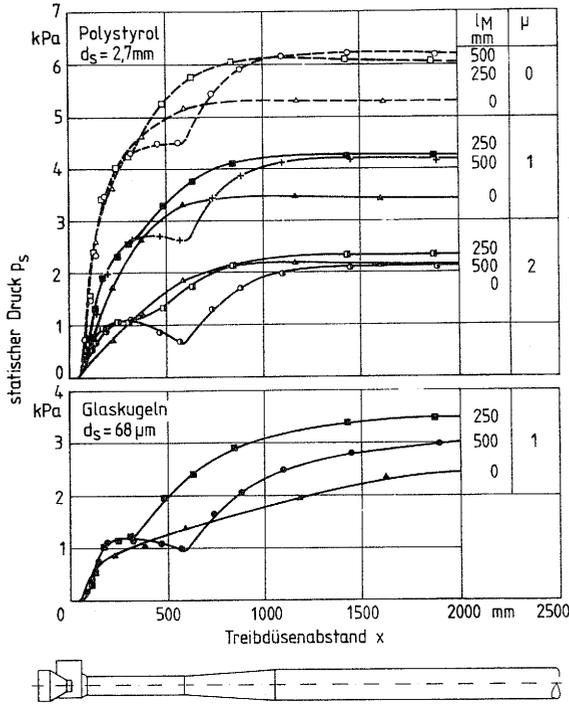
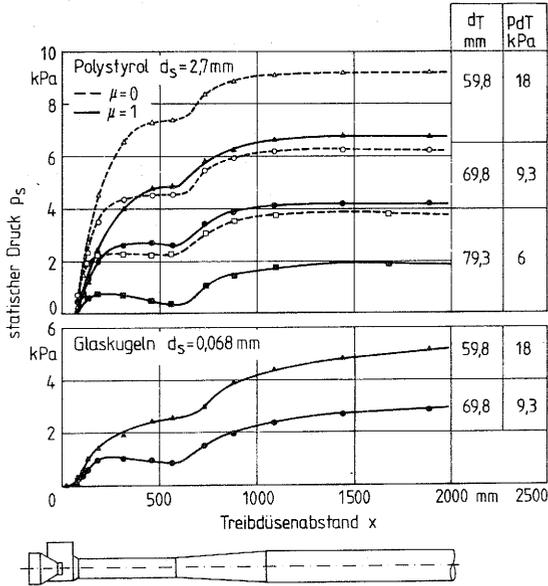


Bild 29: Einfluß der Mischrohrlänge  $l_M$  bei konstantem Mischrohrdurchmesser  $d_M = 100 \text{ mm}$  auf den Druckverlauf im Neutralzustand  $q = 1,0$ .  $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $p_{dT} = 9,4 \text{ kPa}$ ,  $v_T = 125 \text{ m/s}$ .

berücksichtigt werden, daß durch die ungleiche Geschwindigkeitsverteilung am Diffusoreintritt der Diffusorwirkungsgrad auf etwa  $\eta_D = 0,6$  abnimmt.

In Bild 30 ist der Einfluß des Treibdüsendurchmessers  $d_T$  auf den Druckverlauf bei konstantem Mischrohrdurchmesser  $d_M$  dargestellt. Um auf die gleiche Geschwindigkeit in der Förderleitung zu kommen, wurde der Treibluftmassenstrom konstant eingestellt. Bei einer kleineren Treibdüse ist daher die Luftgeschwindigkeit  $v_T$



**Bild 30:** Einfluß des Treibdüsendurchmessers  $d_T$  bzw. des dynamischen Druckes  $p_{dT}$  des Treibstrahles auf den Druckverlauf im Neutralzustand  $q = 1,0$  bei konstantem Treibluftmassenstrom  $\dot{m}_{LT}$ .  $d_M = 100$  mm,  $l_M = 500$  mm.

und damit der Treibstrahlimpuls höher als bei einer größeren Treibdüse. Der statische Druck im Mischrohr steigt dadurch mit abnehmendem Treibdüsendurchmesser an, während der Druckanstieg im Diffusor gleich bleibt. Bei kleinerem Treibdüsendurchmesser wird aber ein geringerer Anteil des dynamischen Druckes  $p_{dT}$  des Treibstrahls in statischen Druck umgewandelt als bei größerem Treibdüsendurchmesser, z.B. bei  $\mu = 0$  und  $d_T = 59,8$  mm ist am Injektoraustritt  $p_s = 0,51 \cdot p_{dT}$ , bei  $d_T = 69,8$  mm dagegen ist  $p_s = 0,68 \cdot p_{dT}$ .

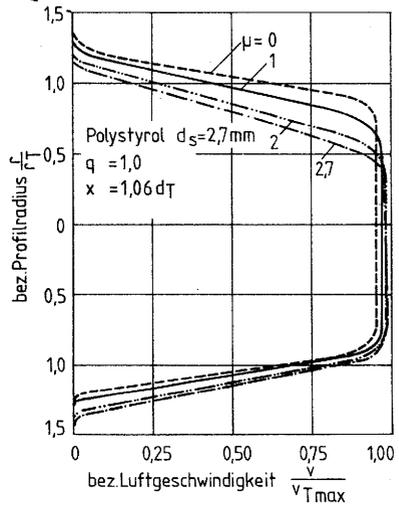
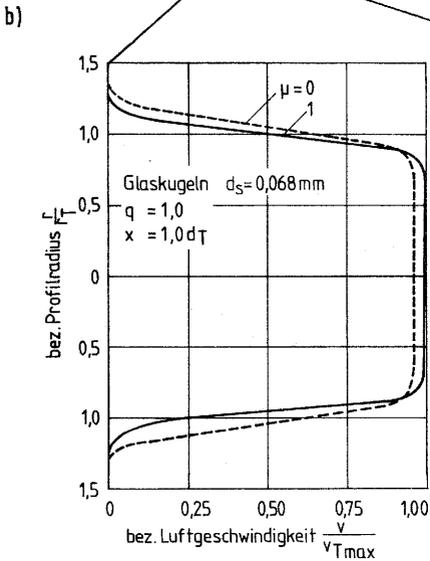
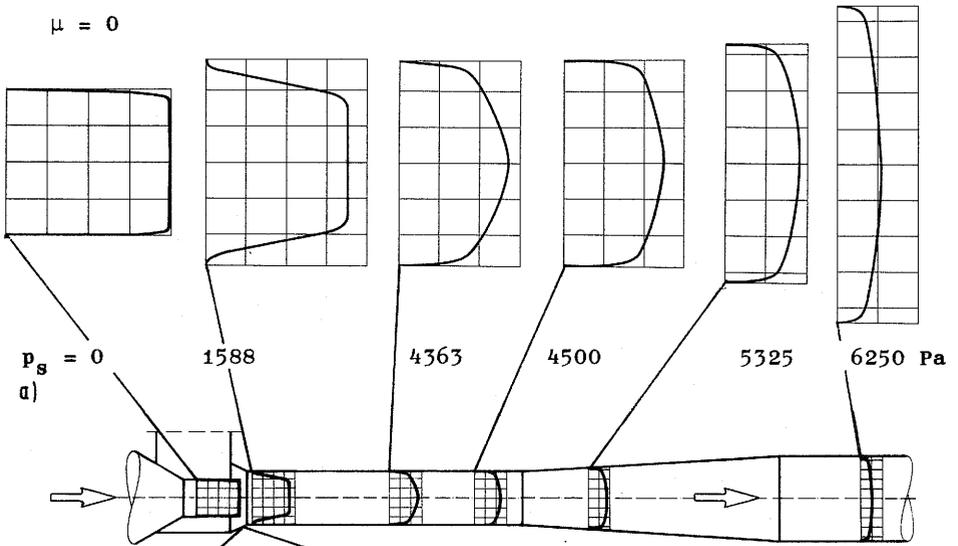
Die Druckmessungen werden für die Ermittlung der Injektorkennlinien in Kapitel 6 weiter ausgewertet und daraus weitere Hinweise für die konstruktive Ausführung von Injektoren abgeleitet.

#### 5.4 Verlauf der Luftgeschwindigkeit

Der Verlauf der Luftgeschwindigkeit ist notwendig, um die Feststoffbeschleunigung und den Druckverlauf zu berechnen. Da bisher in der Literatur keine Angaben über den Geschwindigkeitsverlauf der Luft in Treibstrahlen bei Druckanstieg vorhanden sind, wurde in Kapitel 3.1 aus dem Druckverlauf der eigenen Messungen bei reiner Luft ein mittlerer Geschwindigkeitsverlauf bestimmt. Der Verlauf wurde auf die Strömung mit Feststoff übertragen, wobei die Verzögerung des Treibstrahls durch das Fördergut im Freistrahlsbereich der Mischkammer berücksichtigt wurde. Um diese Annahmen zu überprüfen, wurden Geschwindigkeitsprofile bei reiner Luftströmung und bei der Förderung von Polystyrolgranulat und feinen Glaskugeln ( $d_g = 68 \mu\text{m}$ ) bei verschiedenen Ansaugverhältnissen und Gutbeladungen an mehreren Stellen im Injektor aufgenommen.

In Bild 31 sind einige Profile, die in der senkrechten Ebene in verschiedenen Abständen von Treibdüse bei reiner Luft und bei der Förderung von Polystyrol und feinen Glaskugeln im Neutralzustand des Injektors gemessen wurden, zusammengestellt. Die Profile in der waagerechten Ebene sind bei reiner Luft annähernd deckungsgleich, während bei Luftansaugung oder Rückblasen und bei Feststoffförderung die Profile in der senkrechten Ebene stärker beeinflusst werden als die Profile in der waagerechten Ebene. Zur Ergänzung wurden die statischen Drücke an der jeweiligen Meßstelle eingetragen.

Am Austritt aus der Treibdüse weicht das Geschwindigkeitsprofil des Treibstrahls geringfügig von einem Kolbenprofil ab, Bild 31 a. Die maximale Geschwindigkeit ist nur etwa 5 % höher als die mittlere Geschwindigkeit. Im Freistrahlsbereich der Mischkammer bleibt die Zentralgeschwindigkeit konstant, während die Strahlbreite geringfügig zunimmt. Am Ende des Mischrohrinlaufes, etwa einhalb Treibdüsendurchmesser von der Treibdüse entfernt, ist die Zentralgeschwindigkeit bereits um etwa 10 % gefallen, während der Druck auf etwa 1 600 Pa angestiegen ist. Dies bestätigt die Annahme, daß ab dem Mischrohrinlauf der Druck ansteigt und damit der Freistrahlsbereich aufhört. Der Strahl erreicht etwa 200 mm



d)

**Bild 31:** Geschwindigkeitsprofile der Luft im Gutaufgabeinjektor.

$d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $l_F = 55 \text{ mm}$ ,  $d_M = 100 \text{ mm}$ ,  $l_M = 500 \text{ mm}$ ;

$v_{zmax} = 128 \text{ m/s}$ ,  $v_T = 125 \text{ m/s}$ ,  $q = 1,0$ .

nach der Treibdüse die Mischrohrwand. Dieser Abstand entspricht annähernd dem in Kapitel 3.4 angenommenen Beginn des Reibungseinflusses. Bis zur Mischrohrmitte fällt die Zentralgeschwindigkeit auf etwa 55 % des Ausgangswertes ab, während der Druck auf 4 360 Pa angestiegen ist. In der zweiten Hälfte des Mischrohres gleichen sich die Geschwindigkeitsunterschiede weiter aus, bis am Mischrohrende das Profil der turbulenten Rohrströmung erreicht ist. Bei einer kleineren Treibdüse  $d_T = 59,8$  mm ergaben die Messungen, daß das Profil der turbulenten Rohrströmung bis zum Mischrohrende noch nicht ausgebildet und damit der Impulsaustausch noch nicht abgeschlossen ist. Der leicht ansteigende Druckverlauf gegen Ende des Mischrohres bei Gutbeladung  $\mu = 0$  in Bild 30 bestätigt dies ebenfalls.

Den Einfluß des Feststoffes auf die Geschwindigkeitsprofile der Luft am Ende des Mischrohreinlaufes zeigen die Bilder 31 c und d. Der Treibstrahl wird durch das Polystyrolgranulat mit steigender Gutbeladung an der oberen Seite stärker verzögert und nach unten abgelenkt. Bei der Förderung von feinen Glaskugeln, Bild 31 c, wird die Luftströmung an der Unterseite zusätzlich durch die Feststoffablagerungen in der Mischkammer, die in Bild 26 zu sehen sind, eingeengt. Der Strahl wird dadurch in den äußeren Bereichen verzögert, kann aber nicht nach unten ausweichen. Die Zentralgeschwindigkeit wird bei beiden Fördergütern weniger vermindert als bei reiner Luft. Gleichzeitig wird mit steigender Gutbeladung ein geringerer statischer Druck erreicht. Die Summe aus Druckkraft und Impulsänderung des Feststoffes ist annähernd konstant und bestätigt damit die in Kapitel 3.1 getroffene Annahme.

Bild 32 zeigt in schematischer Darstellung wie sich die Geschwindigkeitsprofile bei Förderung von Polystyrolgranulat im Verlaufe des Mischrohres weiter verändern. Durch die Verteilung des Feststoffes über den ganzen Mischrohrquerschnitt wird auch die Luftgeschwindigkeitsverteilung gleichmäßiger.

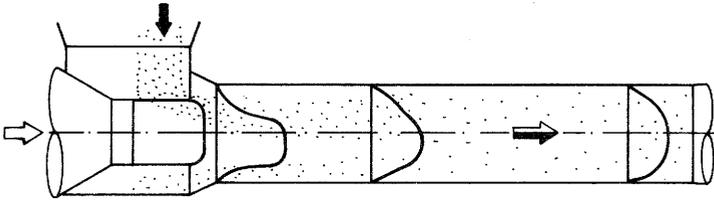
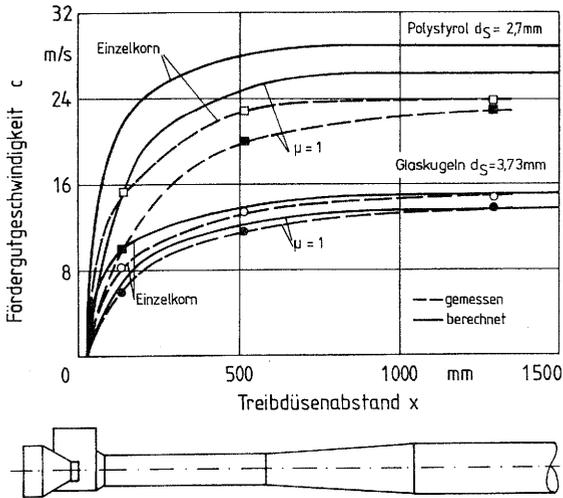


Bild 32: Schematische Darstellung der Luftgeschwindigkeitsverteilung bei Gutbeladung.

### 5.5 Verlauf der Feststoffgeschwindigkeit

Die Feststoffgeschwindigkeit wurde am Anfang und am Ende des Mischrohres und nach dem Injektoraustritt gemessen. Dabei wurden von Polystyrolgranulat, Weizen, Mais und groben Glaskugeln die mittlere Einzelkorngeschwindigkeit, d.h. die Geschwindigkeit eines einzelnen frei fliegenden Teilchens und die mittlere Geschwindigkeit eines Teilchens in einer Gutwolke bei verschiedenen Gutbeladungen ermittelt. Die markierten Teilchen wurden unmittelbar nach dem Dosierschieber in das Fallrohr zugeführt. Im Fördergut verbliebene Teilchen konnten über mehrere Umläufe Meßsignale erzeugen, bis die Eisenschicht abgerieben war. Wenn Teilchen zerbrachen oder die Eisenschicht weitgehend abgelöst war, erzeugte die verringerte Eisenmasse nur noch ein schwaches, nicht auswertbares Signal. Jedem Meßpunkt liegen bis zu 50 Einzelmeßwerte zugrunde, die statistisch ausgewertet wurden. Die relative Standardabweichung beträgt am Mischrohranfang etwa 14 %, am Mischrohrende etwa 8 % und am Injektoraustritt etwa 7 %. Die wichtigsten Einflüsse auf den Verlauf der Feststoffgeschwindigkeit im Gutaufgabeinjektor zeigen die Bilder 33 bis 36.

In Bild 33 sind die Verläufe der Einzelkorngeschwindigkeit und der Fördergutgeschwindigkeitsverlauf bei Gutbeladung  $\mu = 1$  von Polystyrolgranulat und von groben Glaskugeln ( $d_s = 3,73$  mm) dargestellt. Bei beiden Fördergütern steigt die Geschwindigkeit bei



**Bild 33:** Vergleich zwischen gemessener und berechneter Fördergutgeschwindigkeit im Injektor.  $d_T = 69,8\text{ mm}$ ,  $d_M = 100\text{ mm}$ ,  $l_M = 500\text{ mm}$ ,  $v_T = 125\text{ m/s}$ ,  $q = 1,0$ .

Gutbeladung  $\mu = 1$  am Mischrohranfang weniger an als beim Einzelkorn, da sich die Gutwolke erst allmählich auflöst. Bis zum Injektorende verringern sich die Unterschiede.

Die berechneten Kurven nähern den gemessenen Geschwindigkeitsverlauf von groben Glaskugeln sehr gut an. Bei Polystyrolgranulat liegen die Meßwerte sowohl für das Einzelkorn als auch für eine Gutbeladung von  $\mu = 1$  unterhalb der berechneten Kurven. Die Unterschiede betragen am Mischrohrrende etwa 22 % und am Injektorende etwa 15 bis 20 %. Die Beschleunigung des Polystyrolgranulats ist besonders im Anfangsbereich geringer als berechnet. Die eingetragenen Meßpunkte ergeben sich aus den Mittelwerten mehrerer Einzelmessungen, wobei die Maximalwerte die berechneten Werte erreichen. Die niedrigen Geschwindigkeiten treten bei Teilchen auf, die nur in den Randbereich des Strahles gelangen und dort weniger beschleunigt werden als in Strahlmitte. Bei Polystyrolgranulat ist dieser Anteil wesentlich größer als bei den groben

Glaskugeln. Die Fördergutgeschwindigkeit bei Gutbeladung  $\mu = 1$  wurde in erster Näherung mit dem gleichen Korrekturfaktor für grobe Glaskugeln und für Polystyrolgranulat berechnet. Der Zahlenwert des Faktors  $k$  beschreibt die Verhältnisse bei den groben Glaskugeln gut, während bei Polystyrolgranulat der Zahlenwert zu groß ist.

Bei Polystyrolgranulat und Gutbeladung  $\mu = 1,0$  wird mit folgenden Zahlenwerten eine bessere Annäherung erreicht:

$$\begin{aligned}c_w^+ &= 0,08 c_w \text{ für } x \leq d_T \\c_w^+ &= 0,4 c_w \text{ für } d_T \leq x \leq 2 d_T \\c_w^+ &= c_w \text{ für } 2 d_T < x.\end{aligned}$$

Als Ergänzung wird aus den Meßwerten und der berechneten Geschwindigkeit des Einzelkorns für einige Stellen im Injektor ein Korrekturfaktor bestimmt, Tafel 5. Mit diesem Faktor kann die mittlere Fördergutgeschwindigkeit bei verschiedenen Gutbeladungen und damit der Druckverlauf im Injektor genauer berechnet werden. Das Verhältnis der gemessenen Fördergutgeschwindigkeit zur berechneten Geschwindigkeit des einzelnen Kornes wird umso kleiner je größer der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten und damit die notwendige Korrektur der Rechnung wird. Mit steigender Gutbeladung wird die erforderliche Korrektur größer. Die Korrekturfaktoren für die Geschwindigkeiten von Weizen und Mais liegen zwischen den Werten der groben Glaskugeln und denen des Polystyrols. Für die staubförmigen Fördergüter konnten keine Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt und deshalb auch keine Korrekturfaktoren ermittelt werden. Die Korrekturfaktoren dürften etwa 10 bis 15 % niedriger sein, als die von Polystyrol.

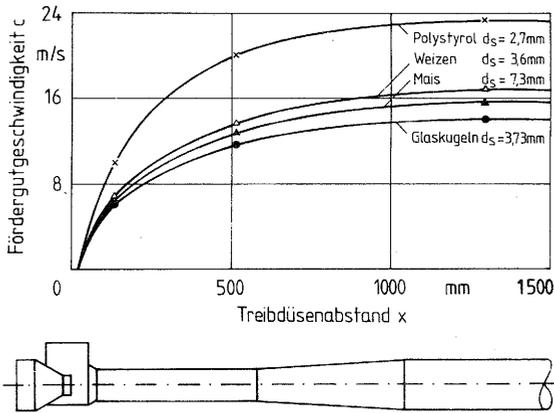
Die Geschwindigkeitsverläufe der körnigen Fördergüter, Bild 34, werden mit steigender Schwebegeschwindigkeit flacher, die Geschwindigkeiten werden niedriger. Die Reihenfolge der Kurvenverläufe entspricht den berechneten Kurven in Bild 10.

		bezogene Fördergutgeschwindigkeit $\frac{c_{\text{gem.}}}{c_{\text{theoret.}}}$					
		grobe Glaskugeln			Polystyrol		
		Mischrohr		Injektor- ende	Mischrohr		Injektor- ende
		Anfang	Ende		Anfang	Ende	
Gutbeladung $\mu$	EK	0,81	0,98	1,0	0,67	0,83	0,84
	1	0,53	0,86	0,93	0,40	0,72	0,81
	2	0,44	0,77	0,82	0,32	0,66	0,76
	3	0,35	0,63	0,77	0,25	0,59	0,71
	4	0,29	0,69	0,72	-	-	-
	5	0,23	0,68	0,69	-	-	-

EK = Einzelkorn

**Tafel 5:** Verhältnis der gemessenen Fördergutgeschwindigkeit  $c_{\text{gem.}}$  zur berechneten Geschwindigkeit des Einzelkorns  $c_{\text{theoret.}}$  bei groben Glaskugeln  $d_S = 3,73$  mm und Polystyrolgranulat  $d_S = 2,7$  mm in Abhängigkeit von der Gutbeladung am Anfang und Ende des Mischrohres und am Ende des Injektors.  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_M = 500$  mm,  $d_R = 155$  mm,  $v_T = 125$  m/s,  $q = 1,0$ .

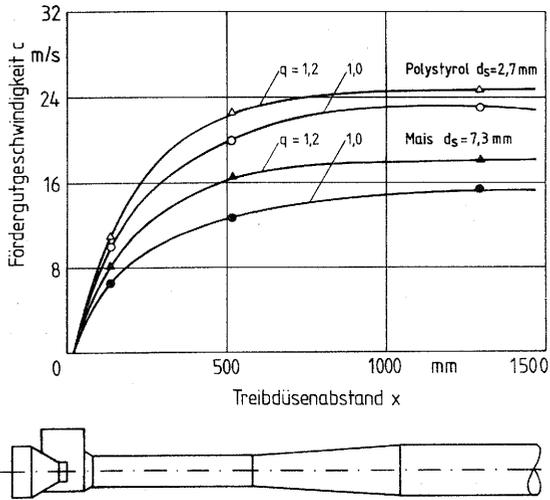
**Bild 35** zeigt den Einfluß der Luftansaugung auf die Feststoffgeschwindigkeit bei der Förderung von Polystyrol und Mais bei konstantem Gutdurchsatz  $\dot{m}_S$ . Durch die Ansaugung zusätzlicher Luft steigt die Fördergutgeschwindigkeit steiler an und erreicht im gesamten Injektor höhere Werte als ohne Luftansaugung. Die höhere Geschwindigkeit wird erreicht, weil durch die Ansaugung der Gutstrom tiefer in den Treibstrahl gelangt und durch die höhere Luftgeschwindigkeit eine größere Beschleunigung erfolgt. Bei Luftansaugung entsteht daher außer dem Druckverlust durch die Beschleunigung der angesaugten Luftmasse ein zusätzlicher Verlust durch die größere Beschleunigung des Fördergutes.



**Bild 34:** Gemessener Verlauf der Feststoffgeschwindigkeit bei verschiedenen Fördergütern.  $d_T = 69,8\text{ mm}$ ,  $d_M = 100\text{ mm}$ ,  $l_M = 500\text{ mm}$ ,  $v_T = 125\text{ m/s}$ ,  $q = 1,0$ ,  $\mu = 1,0$ . Schwebegeschwindigkeiten: Polystyrol  $w_s = 6,7\text{ m/s}$ , Weizen  $w_s = 8,4\text{ m/s}$ , Mais  $w_s = 10,6\text{ m/s}$ , Glaskugeln  $w_s = 15,8\text{ m/s}$

Bei kleinerem Mischrohrdurchmesser aber sonst gleichen Bedingungen, steigt die Feststoffgeschwindigkeit erwartungsgemäß an, Bild 36, weil die Luftgeschwindigkeit im Mischrohr höher ist. Im Mischrohr wird eine höhere Fördergutgeschwindigkeit erreicht als in der Förderleitung notwendig ist, daher wird das Fördergut im Diffusor und in der Förderleitung verzögert, wobei die überschüssige kinetische Energie unter Verlusten in potentielle Energie der Luftströmung umgewandelt wird. Die Korrekturfaktoren für die geänderten geometrischen Verhältnisse ergeben annähernd die gleichen Zahlenwerte wie in Tafel 5.

Mit Hilfe der gemessenen Geschwindigkeitsverläufe und den daraus ermittelten Korrekturfaktoren lassen sich nun die Drücke im Injektor genauer berechnen.



**Bild 35:** Einfluß der Luftansaugung auf den gemessenen Verlauf der Fördergutgeschwindigkeit.  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_m = 500$  mm,  $v_T = 125$  m/s,  $\dot{m}_S = 0,55$  kg/s.

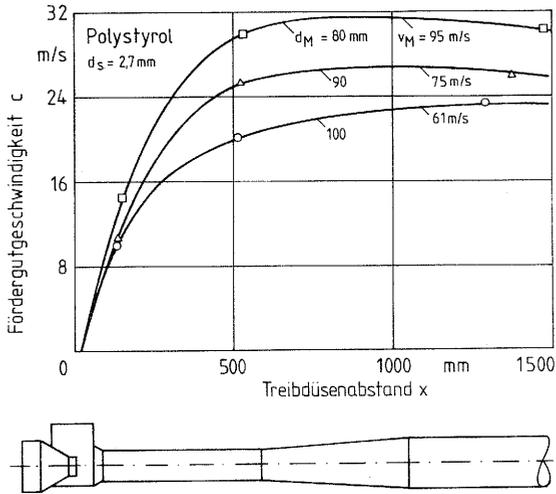


Bild 36: Einfluß des Mischrohrdurchmessers  $d_M$  auf den Fördergutgeschwindigkeitsverlauf.  $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $l_M = 500 \text{ mm}$ ,  $v_T = 125 \text{ m/s}$ ,  $q = 1,0$ ,  $\mu = 1,0$ .

## 6. Kennlinien von Gutaufgabeinjektoren

### 6.1 Anwendung von Kennlinien

Gutaufgabeinjektoren sind entweder ein Teil einer pneumatischen Förderanlage oder dienen zur Einspeisung in Windsichter, Trockner oder Mühlen. Um einen Injektor für diese Aufgabe auszuwählen und um den Betriebspunkt festzulegen, ist eine Charakterisierung des Injektors durch Kennlinien, ähnlich wie bei Gebläsen oder Pumpen, zweckmäßig. Während Gebläse durch den statischen Druck und den Volumenstrom der Luft gekennzeichnet werden, ist für den Betrieb von Gutaufgabeinjektoren zwar auch der statische Druck  $p_{sn}$  maßgebend, aber statt dem Volumenstrom der Luft ist der Fördergutdurchsatz  $\dot{m}_G$  die zweite wichtige Größe.

Segler [11] gibt statt dem statischen Druck die Grenzrohrlänge des Injektors in Abhängigkeit vom Gutdurchsatz als Kennlinie an. Die Grenzrohrlänge ist die horizontale Förderleitungslänge bei der der Injektor im Neutralzustand arbeitet. In Prüfberichten von Körnergebläsen für die Landtechnik und in Firmenangaben wird diese Darstellungsart häufig verwendet. Muschelknautz [16] bezeichnet die Abhängigkeit des statischen Drucks am Injektoraustritt vom Gutdurchsatz oder der Gutbeladung als Injektorkennlinie, wobei als Parameter die Luftansaugung dient. Diese Kennlinien haben den in Bild 37 schematisch dargestellten Verlauf. Ohne Fördergut erzeugt der Injektor den höchsten Druck. Mit steigendem Durchsatz fällt der Druck bis auf Null ab. Zusätzlich angesaugte Luft verursacht Beschleunigungsverluste, die zu einem geringeren Druck als im Neutralzustand führen. Wird an der Gut-aufgabestelle ein Teil der Treibluft ausgeblasen, steigt der Druck nach dem Injektor an, da die Rückströmung ihren Impuls an die Grundströmung überträgt (Beschreibung Kapitel 3.4).

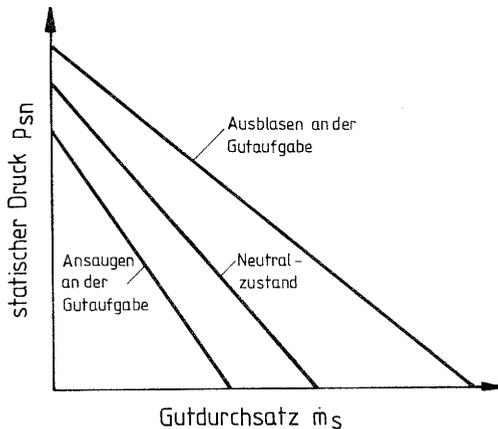
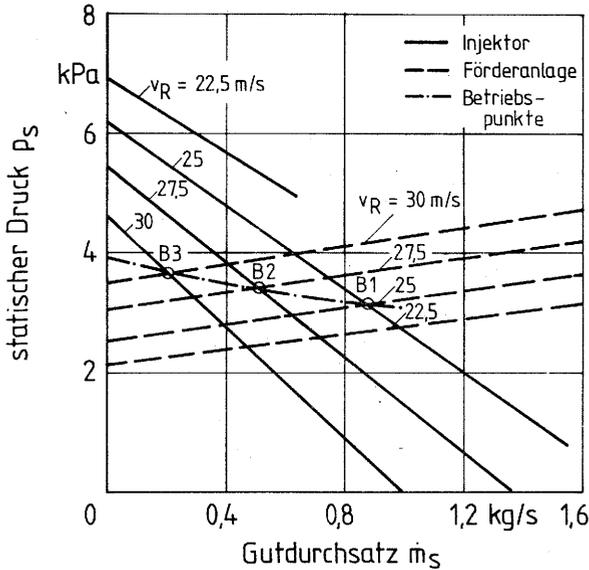


Bild 37: Kennlinien eines Gutaufgabeinjektors.

Aus einer Kombination von Injektorkennlinie und Anlagenkennlinie, Bild 38, können die möglichen Betriebspunkte ermittelt werden. Die übliche Anlagenkennlinie der pneumatischen Förderung [21] muß hierzu umgezeichnet werden, indem der Kurvenparameter (Gutdurchsatz  $\dot{m}_s$ ) und die Abszisse (Luftgeschwindigkeit  $v$ )

vertauscht werden. Die Schnittpunkte der Kennlinien mit gleicher Luftgeschwindigkeit ergeben die möglichen Betriebspunkte (B 1 bis B 3).



**Bild 38:** Betriebskennlinienfeld für pneumatische Förderanlagen mit Gutaufgabeinjektoren.  $d_T = 69,8$  mm,  $d_M = 100$  mm,  $l_M = 500$  mm,  $d_R = 155$  mm,  $l_R = 75$  m,  $v_T = 125$  m/s, Polystyrolgranulat  $d_S = 2,7$  mm,  $\rho_S = 1\,070$  kg/m<sup>3</sup>.

Die Injektorkennlinien wurden mit eigenen Meßergebnissen gezeichnet, während die Kennlinien der pneumatischen Förderanlage für eine horizontale Rohrleitung von 75 m Länge berechnet wurden.

Der Betriebspunkt B 1 entspricht dem Neutralzustand  $q = 1,0$  des Injektors. Wird der Fördergutfurchsatz verringert, sinkt der Druckverlust in der Förderanlage. Der Injektor saugt zusätzliche Luft an, man erhält die Betriebspunkte B 2 oder B 3. Wird dagegen der Fördergutfurchsatz erhöht, steigt der Druckverlust in der Förderanlage. Der Injektor bläst einen Teil der Treibluft aus. Im vorliegenden Beispiel hat die Injektorkennlinie für

$q = 0,9$  bzw.  $v_R = 22,5$  m/s keinen Schnittpunkt mit der zugehörigen Anlagenkennlinie, weil die zurückgeblasene Luft die Steigerung des Gutdurchsatzes beschränkt.

Wird der gewünschte Betriebspunkt nicht erreicht, muß ein Injektor mit einer anderen Kennlinie oder eine Zellenradschleuse eingesetzt werden. Aus Bild 38 ist auch das Verhalten beim Anfahren zu ersehen. Ohne Fördergut werden zunächst etwa 30 % Luft zusätzlich zur Treibluft angesaugt und damit eine Luftgeschwindigkeit von etwa 33 m/s erreicht. Bei Gutzufuhr nimmt der statische Druck des Systems Injektor-Förderanlage entlang der eingetragenen Kurve der Betriebspunkte ab. Die gemeinsame Darstellung der Kennlinien des Injektors und der Anlage gibt damit einen raschen Überblick für die Auswahl von Injektoren und über das Verhalten des Systems bei Betriebsänderungen.

## 6.2 Einflüsse auf die Kennlinie des Gutaufgabeinjektors

Um verschiedene Injektoren besser miteinander vergleichen zu können, wird die Kennlinie in eine dimensionslose Kennlinie umgeformt. Dazu wird die Differenz zwischen maximalem statischem Druck  $p_{sn}$  am Ende des Injektors und dem statischen Druck  $p_{sT}$  in der Mischkammer auf den dynamischen Druck des Treibstrahls bezogen. Die dimensionslose Größe heißt Druckziffer  $\psi$ .

$$\psi = \frac{p_{sn} - p_{sT}}{p_{dT}} \quad (34)$$

Der Gutmassenstrom  $\dot{m}_g$  wird wie bei der pneumatischen Förderung üblich, durch die Gutbeladung  $\mu$  ersetzt. Mit dem Ansaugverhältnis  $q$ , das das Verhältnis Luftmassenstrom nach dem Injektor (Förderluftmassenstrom) zu dem Luftmassenstrom vor dem Injektor (Treibluftmassenstrom) bezeichnet, erhält man, entsprechend Bild 37, die in Bild 39 schematisch dargestellten Kennlinien.

Um den Einfluß des Fördergutes zu erfassen wird berücksichtigt, daß im Injektor vor allem Beschleunigungsvorgänge ablaufen. Die charakteristische Kennzahl für diese Vorgänge ist die Barth-Zahl [21, 48], die als Verhältnis des Luftwiderstandes von Partikeln

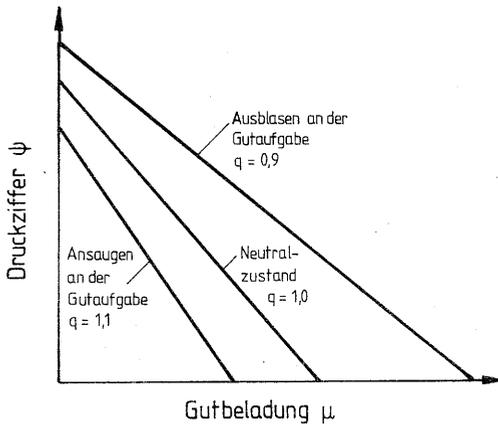


Bild 39: Kennlinien des Gutaufgabeinjektors dimensionslos dargestellt für ein Fördergut und verschiedene Luftansaugverhältnisse.

zu ihrer Massenträgheitskraft aufgefaßt werden kann. Entsprechend der Definition von Vollheim [ 48 ] lautet die Barth-Zahl:

$$Ba = \frac{3}{4} \cdot c_w \cdot \frac{\rho_L}{\rho_S} \cdot \frac{d_T}{d_S} \quad (35).$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  wird mit der Treibstrahlgeschwindigkeit  $v_T$  als Anströmgeschwindigkeit bestimmt.

Verwendet man den Kehrwert der Ba-Zahl als Kennzahl, entspricht ein grobkörniges Fördergut einer großen Kennzahl  $1/Ba$ , während ein feinkörniges Fördergut einer kleinen Kennzahl entspricht. Das gilt für die bei der pneumatischen Förderung meist vorliegenden Dichteverhältnisse  $\rho_S / \rho_L = 1\ 000$  bis  $3\ 000$ . Bei den üblichen Fördergütern und Abmessungen von Gutaufgabeinjektoren betragen die Kennzahlen  $1/Ba = 5 \dots 65 \dots 400$ . Für einen bestimmten Injektor bei konstantem Luftansaugverhältnis erhält man die in Bild 40 schematisch dargestellten Kennlinien. Da bei kleinerer Korngröße die Beschleunigungsverluste ansteigen, verlaufen die

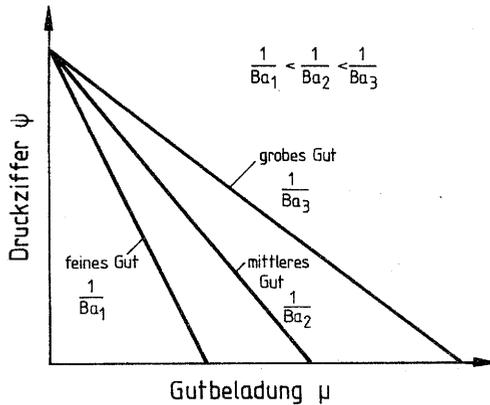


Bild 40: Dimensionslose Kennlinien des Gutaufgabeinjektors bei verschiedenen Fördergütern und konstantem Luftansaugverhältnis.

Kennlinien von feinkörnigen Fördergütern steiler als von gröberem Fördergut.

Statt der Druckziffer kann auch der energetische Wirkungsgrad des Injektors als dimensionslose Vergleichsgröße verwendet werden [11, 17, 20]. Jedoch ist die genaue Bestimmung der gesamten zugeführten Energie bei Gutzufuhr und besonders bei Luftansaugung und Rückblasen kaum möglich, weiterhin ist die Berechnung des statischen Druckes nach dem Injektor (Förderdruck) aus dem Wirkungsgrad aufwendiger als aus der Druckziffer.

Die wichtigsten Einflüsse auf die Kennlinien von Gutaufgabeinjektoren werden an einigen Beispielen gezeigt. Im Niederdruckbereich können die Kennlinien, Bild 41, durch Geraden dargestellt werden. Im Neutralzustand ohne Gutbeladung werden mit diesem Injektor etwa 70 % des dynamischen Treibstrahl Druckes als statischer Druck am Injektorausstritt erreicht. Bei einer Gutbeladung von etwas mehr als  $\mu = 3$  ist die Druckziffer und damit der statische Druck am Injektorausstritt Null.

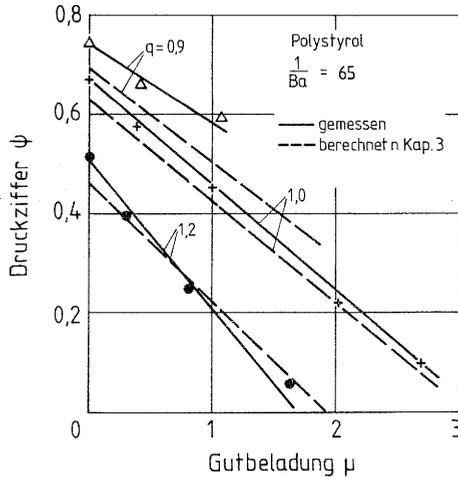


Bild 41: Einfluß der Luftansaugung auf die dimensionslosen Kennlinien des Gutaufgabeinjektors bei Förderung von Polystyrolgranulat.  $(d_M/d_T)^2 = 2,05$ ,  $l_F/d_T = 0,79$ ,  $l_M/d_M = 5$ ,  $(d_R/d_T)^2 = 5$ .

Wie bereits bei den nicht dimensionslosen Kennlinien, Bild 37, beschrieben, wird die Kennlinie bei Luftansaugung zu niedrigeren Enddrücken und damit zu niedrigeren Druckziffern verschoben und verläuft steiler als im Neutralzustand. Bei Rückblasen werden dagegen höhere Druckziffern erreicht und die Kennlinie verläuft etwas flacher als im Neutralzustand. Die Feststoffzufuhr bei Rückblasen wird durch die über den Gutaufgabeschacht austretende Luft begrenzt. Eine weitere Steigerung könnte erreicht werden, wenn die zurückströmende Luft von der Gutzufuhr getrennt würde, wie es z.B. an der Rückblasse, Bild 2, durchgeführt wurde.

Die berechneten und gemessenen Kennlinien zeigen eine gute Übereinstimmung, bis auf die Kennlinie des Rückblasbereiches, für die zu niedrige Werte berechnet wurden. Ähnliche Übereinstimmungen wurden auch für die anderen Fördergüter bei gleicher Injektorgeometrie erreicht, während bei anderen Querschnittsver-

hältnissen und bei Injektoren ohne Mischrohr etwas größere Unterschiede auftraten.

Der Einfluß der Feststoffeigenschaften ist aus Bild 42 für den Neutralzustand des Injektors zu ersehen. Mit steigender Kennzahl  $1/Ba$  werden die Kennlinien flacher, wobei die feinen Glaskugeln mit  $1/Ba = 5,5$  die steilste Kennlinie und die groben Glaskugeln mit  $1/Ba = 363$  die flachste Kennlinie aufweisen, während die Kennlinie des Polystyrolgranulates eine mittlere Steigung hat. Die Kennlinien für andere Fördergüter können näherungsweise interpoliert werden.

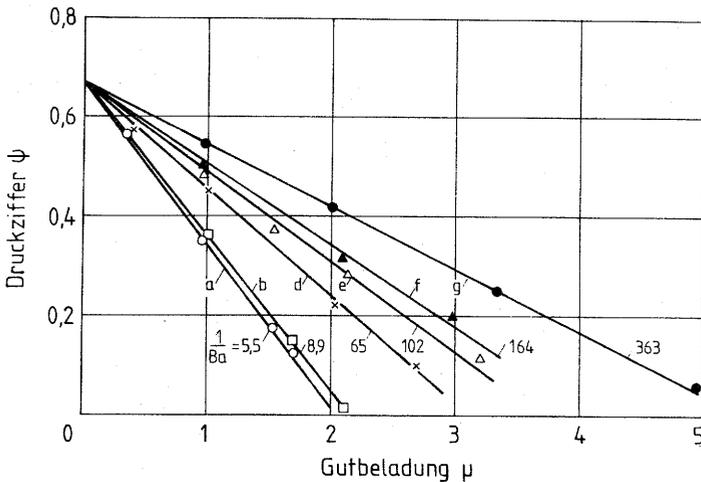


Bild 42: Einfluß der Förderguteigenschaften auf die Injektor-kennlinie.  $(d_M/d_T)^2 = 2,05$ ,  $l_F/d_T = 0,79$ ,  $l_M/d_M = 5$ ,  $(d_R/d_T)^2 = 5$ ;  $q = 1,0$ ,  $p_{dT} = 9,4$  kPa. a feine Glaskugeln  $d_S = 0,068$  mm, b Quarzsand  $d_S = 0,12$  mm, d Polystyrolgranulat  $d_S = 2,7$  mm, e Weizen  $d_S = 3,6$  mm, f Mais  $d_S = 7,3$  mm, g grobe Glaskugeln  $d_S = 3,73$  mm; weitere Stoffeigenschaften in Tafel 3.

Die Kennlinien werden mit abnehmender Mischrohrlänge flacher, Bild 43 und beginnen bei einer niedrigeren Druckziffer. Dies gilt sowohl im Neutralzustand als auch bei Luftansaugung.

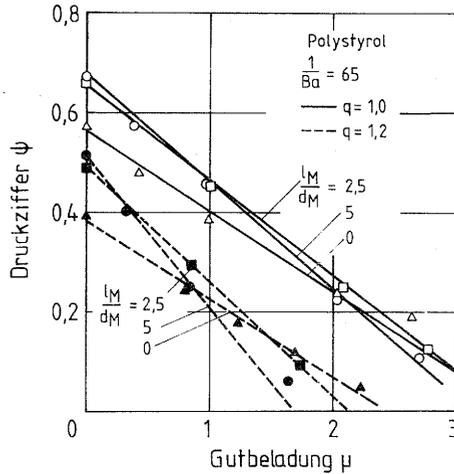
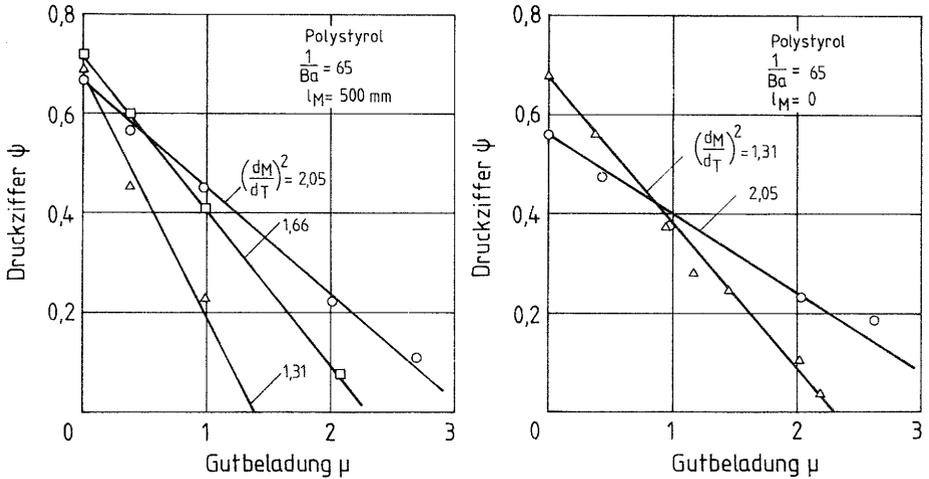


Bild 43: Einfluß der Mischrohrlänge auf die Injektorkennlinie (Angaben zum Injektor außer Mischrohrlänge wie zu Bild 42).

Einen großen Einfluß auf die Injektorkennlinien hat das Verhältnis des Mischrohrquerschnittes zum Treibdüsenquerschnitt, Bild 44. Bei einer Mischrohrlänge  $l_M = 500$  mm liegen die Anfangspunkte der Kennlinien dicht beieinander, Bild 44 a, während die Steigung der Kennlinien mit abnehmendem Flächenverhältnis größer wird. Ein größerer Mischrohrdurchmesser wird daher mit steigender Gutbeladung günstiger. Ohne Mischrohr, Bild 44 b, beginnt die Kennlinie mit dem größeren Flächenverhältnis wesentlich tiefer und schneidet die Kennlinie für das kleinere Flächenverhältnis etwa bei Gutbeladung  $\mu = 1,0$ . Die gleichen Tendenzen treten auch bei anderen Fördergütern auf.



**Bild 44:** Einfluß des Verhältnisses von Mischrohrquerschnitt zu Treibdüsenquerschnitt auf die Injektorkennlinien bei konstantem Treibdüsendurchmesser.  
 $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $q = 1,0$ ,  $p_{dT} = 9,4 \text{ kPa}$ .

Um den Aufwand zur Berechnung der Kennlinien zu verringern, wurde an Hand der Meßergebnisse eine einfache empirische Näherungsgleichung aufgestellt. Die Druckziffer  $\psi$  wird dazu in einen Anteil  $\psi_L$  für die reine Luft und einen Anteil  $\psi_S$  für den Feststoffeinfluß aufgeteilt:

$$\psi = \psi_L - \psi_S \quad (36).$$

Unter Annahme einer inkompressiblen Strömung und der Vernachlässigung der Reibung im Mischrohr wird der Druckzifferanteil  $\psi_L$  der reinen Luft mit dem Impulssatz (für das Mischrohr) und dem Energiesatz (für den Diffusor) berechnet. Nach einer einfachen Umformung ergibt sich:

$$\psi_L = 2 \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \left[ 1 - q^2 \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^2 \right] + \eta_D \cdot q^2 \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^4 \left[ 1 - \left(\frac{d_M}{d_R}\right)^4 \right] \quad (37).$$

Aus den Meßergebnissen an Injektoren mit Mischrohr­längen von  $l_M/d_M = 5$  und Flächenverhältnissen  $(d_T/d_M)^2$  von 0,36 bis 0,76 ergibt sich für den Druckzifferanteil  $\psi_S$  folgende Näherungs­gleichung:

$$\psi_S = 2,62 \cdot Ba^{0,25} \cdot \left(\frac{d_T}{d_M}\right)^{4,27} \cdot q^2 \cdot \mu \quad (38).$$

Die empirischen Gleichungen nähern die eigenen Meßergebnisse und Meßergebnisse aus der Arbeit Wagenknecht [ 18 ] auf etwa  $\pm 10$  bis  $\pm 20$  % an, Tafel 6. Vergleichswerte aus den Arbeiten von Wagenknecht [ 18, 47 ] können nur für einzelne Punkte, nicht für eine ganze Kennlinie herangezogen werden, da keine vollständigen Meßreihen mit konstantem Luftansaugverhältnis mit und ohne Gut­beladung mitgeteilt werden.

Betriebsbedingungen	q	1,01	1,14	0,89
	$\mu$	1,6	1,01	2,33
Druckziffer	berechnet	0,42	0,38	0,44
	aus Meß­werten	0,36	0,34	0,36

Tafel 6: Vergleich zwischen berechneten Druckziffern nach Gleichung (36) bis (38) und aus Meßwerten [ 18 ] bestimmten Druckziffern. Injektor:  $d_T = 20$  mm,  $d_M = 33,3$  mm,  $l_M = 160$  mm,  $d_R = 52,5$  mm, Polyethylengranulat:  $d_S = 3$  mm,  $\rho_S = 918$  kg/m<sup>3</sup>,  $\eta_D = 0,8$ .

### 6.3 Optimierung von Gutaufgabeinjektoren

Damit bei gegebenem dynamischem Druck des Treibstrahls ein möglichst großer statischer Druck am Ende des Gutaufgabeinjektors erreicht wird, ist eine Optimierung der konstruktiven Ausführung des Injektors erforderlich. Aus den experimentellen Untersuchungen werden Grundsätze für die Optimierung abgeleitet.

Wird das Verhältnis von Treibdüsenquerschnitt  $A_T$  zu Mischrohr­querschnitt  $A_M$  verändert, durchläuft die Druckziffer  $\psi$  ein aus-

geprägtes Maximum, Bild 45. Das optimale Querschnittsverhältnis

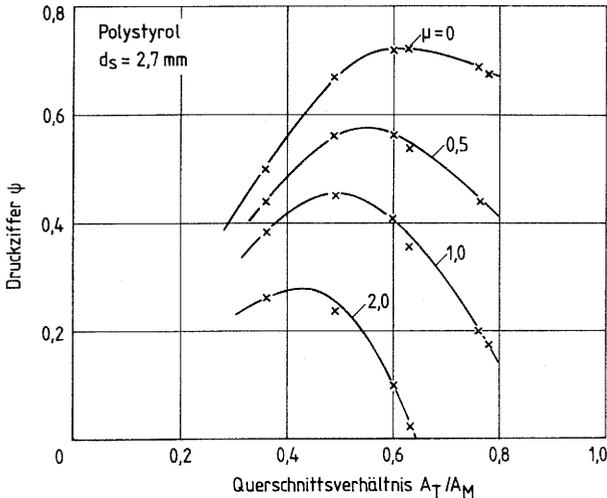
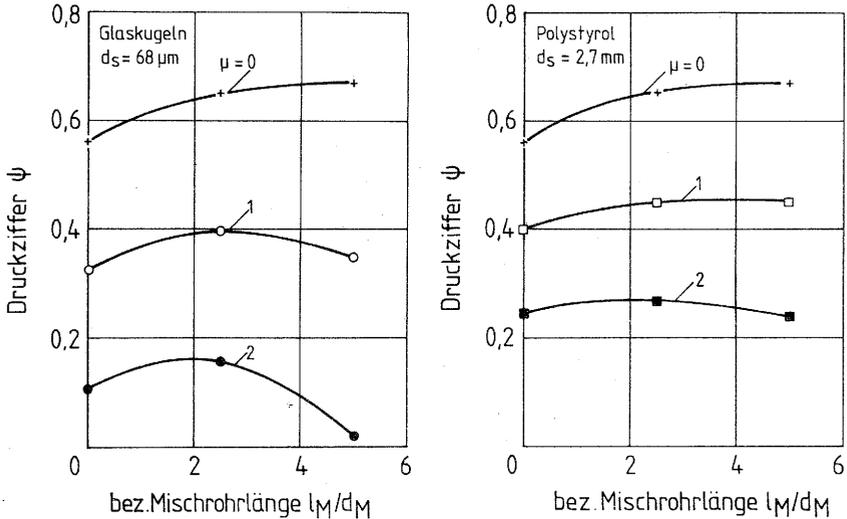


Bild 45: Einfluß des Querschnittsverhältnisses Treibdüse zu Mischrohr auf die Druckziffer bei verschiedenen Gutbeladungen.  $q = 1,0$ ,  $l_M/d_M = 5$ .

verschiebt sich mit zunehmender Gutbeladung zu kleineren Werten. Wird das Mischrohr verkürzt, werden die Kurven flacher und das Optimum tritt bei etwas größeren Querschnittsverhältnissen auf. Bei staubförmigen Fördergütern wird die maximale Druckziffer bei einem etwa 10 bis 15 % kleineren Querschnittsverhältnis erreicht als bei größeren Fördergütern.

Auch die optimale Mischrohrlänge hängt von der Gutbeladung und den Förderguteigenschaften, Bild 46, sowie von den Querschnittsverhältnissen ab, Bild 47. Bei einem Flächenverhältnis Mischrohr zu Treibdüse von etwa 2 : 1 beträgt die optimale Mischrohrlänge ohne Gutbeladung etwa das 4- bis 5fache des Mischrohrdurchmessers und nimmt bei Gutbeladung 2 auf eine Länge von etwa dem doppelten Mischrohrdurchmesser ab. Der Injektor reagiert bei den feinen Glaskugeln auf Änderungen der Mischrohrlänge empfindlicher als bei körnigem Polystyrolgranulat. Die optimale Misch-

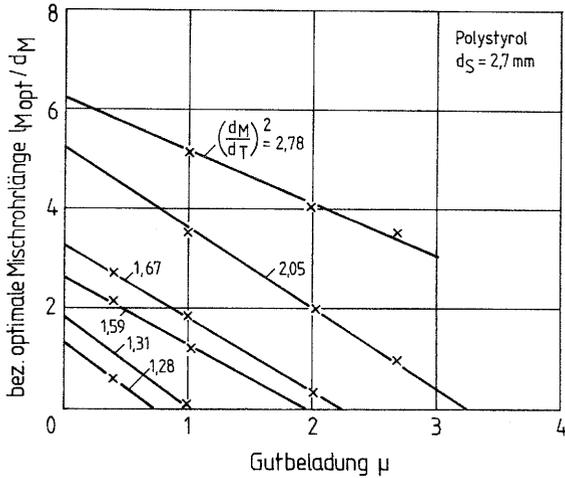


**Bild 46:** Druckziffer in Abhängigkeit von der Mischrohrlänge und der Gutbeladung.  $d_T = 69,8 \text{ mm}$ ,  $d_M = 100 \text{ mm}$ ,  $(d_T/d_M)^2 = 0,49$ ,  $q = 1,0$ ,  $p_{dT} = 9,4 \text{ kPa}$ .

rohrlänge wird kleiner, wenn sich der Treibdüsendurchmesser dem Mischrohrdurchmesser nähert, Bild 47.

An den Diffusor sollte sich eine gerade Rohrstrecke von etwa dem 4fachen Rohrdurchmesser bei mittel- und grobkörnigem Fördergut und von etwa dem 10fachen Rohrdurchmesser bei staubförmigem Fördergut anschließen, damit der maximale statische Druck erreicht wird.

Der Abstand  $l_p$  zwischen Treibdüse und Mischrohrenlauf hat nur einen geringen Einfluß auf die Kennlinie, solange der Treibstrahldurchmesser am Mischrohranfang kleiner als der Mischrohrdurchmesser ist.



**Bild 47:** Einfluß des Querschnittsverhältnisses Treibdüse zu Mischrohr und der Gutbeladung auf die optimale Mischrohlänge von Injektoren.  $q = 1,0$ .

Die optimale konstruktive Ausführung des Gutaufgabeinjektors ändert sich je nach Betriebsbedingung. In vielen Fällen kann aber mit einem Gutaufgabeinjektor, dessen Mischrohrquerschnitt doppelt so groß wie der Treibdüsenquerschnitt und dessen Mischrohlänge 3- bis 5fach größer als der Mischrohrdurchmesser ist, eine Druckziffer im Bereich des Optimums erreicht werden.

Mit den Gleichungen von Kapitel 3 ist auch eine mathematische Optimierung möglich, wozu allerdings ein großer Rechenaufwand erforderlich ist. Für eine konstante Mischrohlänge von  $l_M/d_M = 5$  können die Querschnittsverhältnisse näherungsweise mit den Gleichungen (37) und (38) rechnerisch optimiert werden.

#### 6.4 Experimentelle Überprüfung der Ähnlichkeitsbedingungen für Gutaufgabeinjektoren

Die für einen Injektor ermittelten Kennlinien können auf andere Injektoren und Fördergüter übertragen werden, wenn die dimensionslosen Größen als Ähnlichkeitsbedingungen Gültigkeit haben. Zur experimentellen Überprüfung dieser Bedingungen wurde eine zusätzliche Modellanlage erstellt und Messungen mit staubförmigen Glaskugeln  $d_S = 0,065$  mm und Samen von Hornschotenklee  $d_S = 1,08$  mm im Niederdruckbereich durchgeführt.

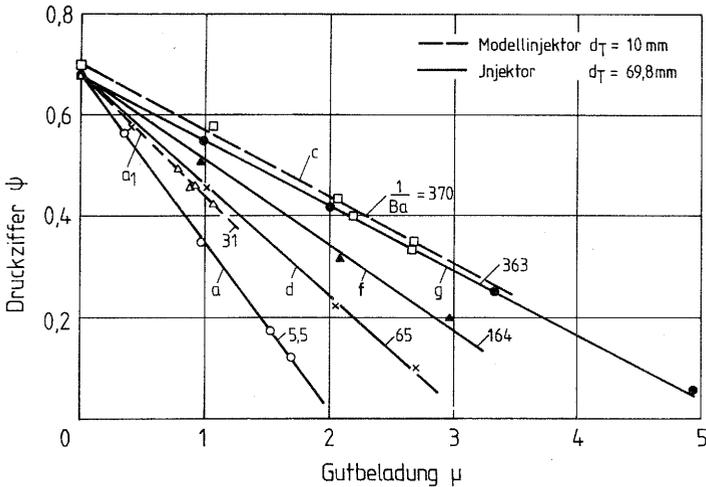
Der Treibdüsendurchmesser  $d_T$  des Modellinjektors betrug 10 mm. Die übrigen Maße des Modellinjektors entstanden durch geometrisch ähnliche Verkleinerung des für die Versuche zu Bild 42 verwendeten Injektors. Die Modellanlage war im Prinzip wie die in Kapitel 4 beschriebene Anlage aufgebaut. Die Treibluft wurde aus einem Druckluftnetz gespeist und der Durchsatz der Treibluft wie auch der Förderluft wurde mit Prandtl-Staurohren gemessen.

Bei etwa gleicher Kennzahl  $1/Ba = 370$  bzw.  $1/Ba = 363$  verlaufen die Kennlinien für die Förderung von Hornschotenklee im Modellinjektor und für die groben Glaskugeln im größeren Injektor annähernd deckungsgleich und bestätigen damit die Gültigkeit der dimensionslosen Größen als Ähnlichkeitsbedingungen. Auch die Kennlinie für die staubförmigen Glaskugeln  $d_S = 0,065$  mm mit der Kennzahl  $1/Ba = 31$  verläuft in dem nach den Ähnlichkeitsbedingungen erwarteten Bereich, Bild 48.

Zur weiteren Überprüfung werden Meßwerte aus der Arbeit Wagenknecht [18, 47] herangezogen. Wie bereits beschrieben können allerdings nur einzelne Punkte, aber keine vollständige Kennlinie aus der Arbeit ermittelt werden. Bei Polyethylengranulat  $d_S = 3$  mm und einem Injektor mit einem Treibdüsendurchmesser  $d_T = 20$  mm, ist die Kennzahl  $1/Ba = 218$  und die Druckziffer  $\psi = 0,36$  bei Gutbeladung  $\mu = 1,6$  ohne Luftansaugung  $q = 1,0$ . Die eigenen Messungen an einem geometrisch ähnlichen Injektor mit  $d_T = 59,8$  mm ergeben bei Polystyrolgranulat  $d_S = 2,7$  mm bei gleicher Gutbeladung und einer Kennzahl  $1/Ba = 76$  eine Druck-

ziffer  $\psi = 0,3$ . Der Unterschied der Druckziffern entspricht der nach den unterschiedlichen Kennzahlen  $1/Ba$  erwarteten Größe.

Die Meßergebnisse und der Vergleich mit der Literatur bestätigen damit die Gültigkeit der Barth-Zahl zusammen mit der Druckziffer  $\psi$ , der Gutbeladung  $\mu$  und den geometrischen Verhältnissen als Ähnlichkeitsbedingungen für Gutaufgabeinjektoren im Niederdruckbereich.



**Bild 48:** Einfluß der Barth-Zahl auf die Kennlinien von geometrisch ähnlichen Gutaufgabeinjektoren. Modellinjektor:  $d_T = 10$  mm,  $d_M = 14,3$  mm,  $l_M = 71,65$  mm; größerer Injektor  $d_T = 69,8$  mm wie für Bild 42. a - g Fördergüter nach Tafel 3;  $q = 1,0$ .

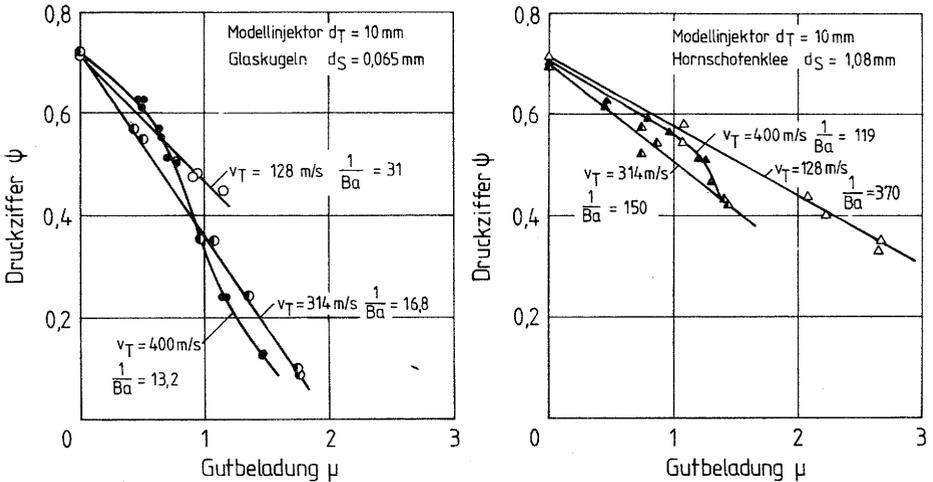
## 6.5 Kennlinien von Mittel- und Hochdruckinjektoren

Zur Einspeisung in Strahlmühlen oder in Kohlestaubfeuerungen gewinnen Gutaufgabeinjektoren auch für den Mittel- und Hochdruckbereich an Bedeutung. Zum Abschluß der Arbeit wird deshalb ein Ausblick auf Kennlinien von Gutaufgabeinjektoren bei höheren Druckdifferenzen gegeben.

Mit dem in Kapitel 6.4 beschriebenen Gutaufgabeinjektor und Fördergut wurden Kennlinien bei Treibstrahlgeschwindigkeiten von 314 m/s und 400 m/s ermittelt. Der Druck vor der Treibdüse war dabei 0,9 bar bzw. 2 bar, während nach dem Injektor bei reiner Luft 0,52 bar bzw. 1 bar Druck erreicht wurde. Die Treibstrahlgeschwindigkeit von 400 m/s wird durch Nachexpansion im Anschluß an die konvergente Düse erzielt. Unter Berücksichtigung der Dichteänderung durch die adiabate Expansion wird der dynamische Druck des Treibstrahls berechnet und damit die Druckziffer bestimmt, Bild 49. Zum Vergleich wurde die Kennlinie bei Niederdruck ( $v_T = 128$  m/s) eingezeichnet. Alle drei Kennlinien beginnen annähernd bei der gleichen Druckziffer  $\psi = 0,7$ . Die Kennlinien beider Fördergüter verlaufen bei Schallgeschwindigkeit des Treibstahls steiler als bei niedrigeren Geschwindigkeiten. Der Unterschied entspricht annähernd der Abnahme der Kennzahl  $1/Ba$ . Bei der Berechnung der Barth-Zahl wurde der Anstieg des Widerstandsbeiwertes  $c_w$  bei Machzahlen größer etwa 0,5 berücksichtigt [27].

Bei Überschallgeschwindigkeit des Treibstrahles ( $v_T = 400$  m/s) weichen die Kennlinien bei mittleren Beladungen von  $\mu \approx 1,0$  vom linearen Verlauf ab, wobei die Druckziffer stark abfällt. Die Kennlinie läßt sich auch bei kleineren Beladungen nicht nach der Barth-Zahl den Kennlinien des Niederdruckbereiches zuordnen. Ähnliche nichtlineare Kennlinien von Mitteldruckinjektoren teilt Muschelknautz [16] mit.

Eine Ursache für den steilen Abfall der Kennlinie und damit des geringeren Druckaufbaus im Injektor könnte das Erreichen der kritischen Geschwindigkeit des Luft-Feststoffgemisches im Mischrohr sein. Die kritische Geschwindigkeit  $v_{kr}$  bei Gas-Feststoff-



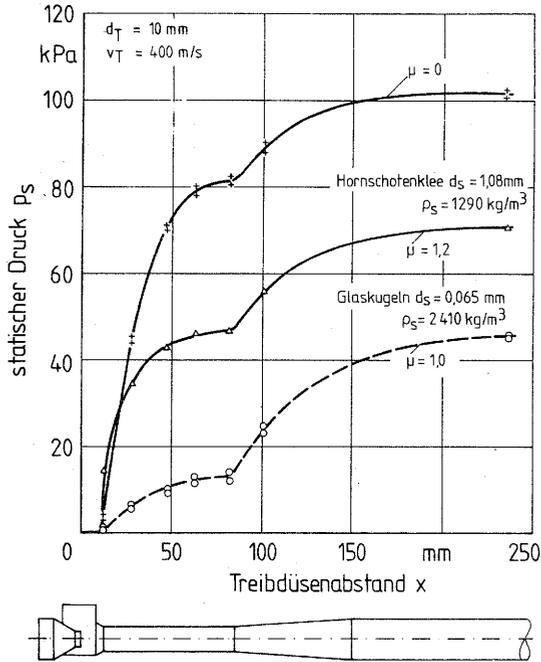
**Bild 49:** Einfluß der Kompressibilität auf die Kennlinien des Gutaufgabeinjektors (Modellinjektor wie bei Bild 48).

strömungen ist [ 20 ]:

$$v_{kr} = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu \cdot \frac{c}{v}}} \cdot a_L \quad (39).$$

Bei einer Beladung von  $\mu = 1,0$  und einem Geschwindigkeitsverhältnis von  $c/v = 1,0$  ist die kritische Geschwindigkeit  $v_{kr} = 220$  m/s. Die mittlere Geschwindigkeit am Mischrohrende beträgt etwa 200 m/s, während die maximale Geschwindigkeit mit 220 bis 230 m/s die kritische Geschwindigkeit erreicht.

Zur weiteren Erläuterung werden in Bild 50 Druckverläufe bei Überschallgeschwindigkeit des Treibstrahls gezeigt. Der Druck verläuft ähnlich wie im Niederdruckbereich. Auffallend ist aber der geringe Druckanstieg im Mischrohr bei den feinen Glaskugeln. Nur etwa 30 % des Enddruckes werden im Mischrohr erreicht, während bei gleicher Beladung im Niederdruckbereich etwa 60 % des Enddruckes im Mischrohr erreicht werden. Der geringe Druckan-



**Bild 50:** Druckverlauf im Gutaufgabeinjektor bei Überschallgeschwindigkeit des Treibstrahls. Modellinjektor wie bei Bild 49.  $v_T = 400 \text{ m/s}$ ,  $q = 1,0$ .

stieg kann durch die hohe Gutbeschleunigung und die kritische Geschwindigkeit verursacht werden.

Der Druck nach dem Injektor bei kompressibler Strömung reiner Luft im Neutralzustand läßt sich nach einem Vorschlag von Muschelknautz [ 25 ] mit dem bekannten Betz-Diagramm [ 49 ] berechnen, wenn die Druckverluste bei der Verzögerung der Luft berücksichtigt werden. Bei dem untersuchten Injektor betragen die Verluste etwa 38 %, sowohl bei Schallgeschwindigkeit als auch bei Überschallgeschwindigkeit des Treibstrahles.

Die Untersuchungen zeigen, daß die Kennlinien bis zur Schallgeschwindigkeit des Treibstrahls geradlinig wie im Niederdruckbereich verlaufen und durch die Barth-Zahl charakterisiert werden können. Bei Überschallgeschwindigkeit des Treibstrahls weichen die Kennlinien dagegen vom linearen Verlauf ab. Die Klärung des Betriebsverhaltens von Injektoren bei höheren Drücken, wie sie zum Beispiel für die Einspeisung in Kohlevergasungsanlagen interessant sind, erfordert weitere wissenschaftliche, theoretische und experimentelle Untersuchungen.

## 7. Zusammenfassung

Die Strömungsvorgänge in Gutaufgabeinjektoren für die pneumatische Förderung wurden untersucht. Dabei wurde der Verlauf der mittleren Luftgeschwindigkeit ermittelt und damit die Bahnkurven und der Geschwindigkeitsverlauf des Feststoffes sowie der Druckverlauf im Gutaufgabeinjektor für den Niederdruckbereich berechnet. Die berechneten Kurven wurden experimentell überprüft, indem die geometrischen und betrieblichen Parameter des Injektors durch mehrere Treibdüsen und Mischrohre sowie durch 6 Fördergüter von 0,065 mm bis 7,3 mm Korngröße variiert wurden. Die Meßwerte werden durch die berechneten Druck- und Geschwindigkeitsverläufe gut angenähert. Zur Veranschaulichung der Strömungsvorgänge wurden Geschwindigkeitsprofile der Luft in der Mischkammer, im Mischrohr und im Diffusor gemessen und die Feststoffbewegung fotografiert.

Für die Auslegung und Beurteilung von Gutaufgabeinjektoren wird das Betriebsverhalten durch Kennlinien, ähnlich wie bei Gebläsen, charakterisiert. Die Bestimmung der Betriebspunkte des Systems aus Gutaufgabeinjektor und pneumatischer Förderanlage wird beschrieben. Zum besseren Vergleich verschiedener Gutaufgabeinjektoren wird die Kennlinie in eine dimensionslose Darstellung umgeformt, wobei der Einfluß der Förderguteigenschaften durch die Barth-Zahl erfaßt wird. Die Meßergebnisse werden in dieser Form dargestellt und die Optimierung der Betriebsbedingungen und der konstruktiven Ausführung gezeigt.

Durch Messungen an einer zusätzlichen Versuchsanlage mit einem geometrisch ähnlich verkleinerten Injektor wurde die Gültigkeit der dimensionslosen Größen als Ähnlichkeitsbedingungen für den Niederdruckbereich bestätigt. Die an der gleichen Anlage gemessenen Kennlinien des Mitteldruckbereiches fallen steiler ab als die des Niederdruckbereiches und lassen sich nicht nach der Barth-Zahl den Kennlinien des Niederdruckbereiches zuordnen. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern einen Beitrag für die bessere und einfachere Auslegung von Gutaufgabeinjektoren für die pneumatische Förderung.

## 8. Schrifttum

- [1] Thompson, J.: On a jet pump or apparatus for drawing up water by the power of a jet. Report Brit. Ass. London, England 1852
- [2] Eck, B.: Technische Strömungslehre, Bd. 1 Grundlagen. Berlin: Springer, 1978
- [3] Dencker, C. H.: Untersuchungen an Gebläseförderanlagen für Heu und Stroh. RKTL-Schrift Heft 1. Berlin: Beuth, 1928
- [4] Feldle, G.: Vertikale hydraulische Feststoffförderung nach dem Strahlpumpenverfahren. Fördern und Heben 28 (1978) 12, S. 839/843.
- [5] Flügel, G.: Berechnung von Strahlapparaten. VDI-Forschungsheft 395. Düsseldorf: VDI, 1939.
- [6] Weydanz, W.: Die Vorgänge in Strahlapparaten. Düsseldorf: VDI, 1963.
- [7] Jung, R.: Die Berechnung und Anwendung der Strahlgebläse. VDI-Forschungsheft 479. Düsseldorf: VDI, 1960.
- [8] Broecker, E.: Vermischung von Flüssigkeits- oder Gasströmen bei kleiner Gesamtdruckänderung. Forsch. Ing. Wesen 24 (1958) 6, S. 169/177 und 25 (1959) 1, S. 17/25.
- [9] Blenke, H.,  
K. Bohner u.  
E. Vollmerhaus: Untersuchungen zur Berechnung des Betriebsverhaltens von Treibstrahlförderern. Chem. Ing. Techn. 35 (1963) 3, S. 201/208.
- [10] Sillem, H.: Untersuchungen zur kompressiblen Gasströmung in Strahlapparaten mit konstantem Mischrohrquerschnitt. VDI-Z Fortschrittberichte Reihe 7 Nr. 1. Düsseldorf: VDI, 1965.
- [11] Segler, G.: Pneumatic grain conveying. Braunschweig: Im Selbstverlag, 1951.
- [12] Gerdorn, W. u.  
F. Köhler: Gebläse mit in eine injektorartige Druckluftdüse mündendem Zulauf für Körnergut. Patentschrift Nr. 667 347 DRP (1938)
- [13] Barth, W.: Vorrichtung zur Aufgabe von Festteilchen in eine pneumatische Förderleitung. Auslegeschrift Nr. 1 099 453, DBP (1961).

- [14] Beckmann, H.: Verfahren und Vorrichtung zum Einbringen von Gut in pneumatische Leitungen. Patentschrift Nr. 937 039, DBP (1955).
- [15] Segler, G.: Maschinen in der Landwirtschaft. Hamburg: Parey, 1956.
- [16] Muschelknautz, E., G. Gliersiepen, N. Rink: Strömungsvorgänge bei der Zerkleinerung in Strahlmühlen. Chem. Ing. Techn. 42 (1970) 1, S. 6/15.
- [17] Schroeder, Th.: Berechnung von Strahlapparaten für die Flugstaubrückführung. Energie 6 (1954) 12, S. 399/403.
- [18] Bohnet, M. und U. Wagenknecht: Strömungstechnische Untersuchungen an Gas-Feststoffinjektoren. Chem. Ing. Techn. 50 (1978) 2, MS 564/78, S. 1/20.
- [19] Buhrke, H.: Bemessung von Strahlschleusen. Hebezeuge und Fördermittel 9 (1969) 3, S. 79/83.
- [20] Weber, M.: Strömungsfördertechnik. Mainz: Krausskopf, 1974.
- [21] Muschelknautz, E. u. H. Wojahn: Auslegung pneumatischer Förderanlagen. Chem. Ing. Techn. 46 (1974) 6, S. 223/235.
- [22] Günther, G.: Verbrennungen und Feuerungen. Berlin: Springer, 1974.
- [23] Lenze, B.: Bestimmung der Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofile im Kern- und Übergangsbereich von Freistrahlen. Chem. Ing. Techn. 49 (1977) 12, MS 545/77, S. 1/28.
- [24] Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Aarau: Sauerländer, 1971.
- [25] Rausch, W.: Untersuchungen über den Luftwiderstand von körnigen und staubförmigen Gütern im Luftstrom. Ing. Archiv 26 (1958) 5, S. 319/332.
- [26] Kürten, H., J. Raasch und H. Rumpf: Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfeld konstanter Geschwindigkeit. Chem. Ing. Techn. 38 (1966) 9, S. 941/948.
- [27] Naumann, A.: Luftwiderstand der Kugel bei hohen Unterschallgeschwindigkeiten. Allg. Wärmetechn. 4 (1953) 10, S. 217/221.
- [28] Schauki, N.: Der Widerstand von Zylinder und Kugel bei instationären Strömungsverhältnissen. Diss. Universität Karlsruhe 1972.

- [29] Riquarts, H.P.: Die Bewegung eines kugelförmigen Einzelkorns im turbulenten Strömungsfeld. Forsch. Ing.Wes. 41 (1975) 1, S. 16/28.
- [30] Sprenger, H.: Experimentelle Untersuchungen an geraden und gekrümmten Diffusoren. Diss. ETH Zürich 1959.
- [31] Finkbeiner, T.: Der Mechanismus der Zellenradschleuse für Schüttgut. VDI-Forschungsheft 563. Düsseldorf: VDI, 1974.
- [32] Wuest, W.: Strömungsmeßtechnik. Braunschweig: Vieweg, 1969.
- [33] Pfau, B.: Simultane Geschwindigkeits-, Konzentrations- oder Partikelgrößenmessung mit Ultraschall in Zweiphasenströmungen. Verfahrenstechn. 8 (1974) 2, S. 54/59.
- [34] Harris, J.: Flow measurement using microwave radar techniques. Powder Technol. 6 (1972) 2, S. 85/89.
- [35] Scholz, R.; P. Voss-Spilker, R. Jeschar: Experimentelle Bestimmung von Tropfen- und Gasgeschwindigkeiten mittels Laser- und Hitzdrahtanemometrie in einer Freistrahl-Nebelströmung. Verfahrenstechn. 11 (1977) 7, S. 416/420.
- [36] Barth, W.: Strömungsvorgänge beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen mit besonderer Berücksichtigung der Vorgänge bei pneumatischer Förderung. Chem. Ing. Techn. 30 (1958) 3, S. 171/80.
- [37] Rink, N.: Die Gutbeschleunigung in Laval-Strahlrohren und ihre Anwendung zur Strahlmahlung. Diss. Universität Karlsruhe 1974.
- [38] Hehn, K. H.: Messung der Geschwindigkeit eines mit Preßluft beförderten Kies-Sandgemisches. Hottinger Meßtechnische Briefe (1968) 2, S. 28/29.
- [39] Fouad, H. A. und W. Brinkmann: Untersuchungen zur pneumatischen Einzelkornförderung in einer Schlauchleitung. Grundl. Landtechn. 25 (1975) 6, S. 177/186.
- [40] Segler, G. und W. Hutt: Pneumatische Fördersysteme und Beitrag zur Berechnung der Flugförderung. Grundl. Landtechn. 29 (1979) 1, S. 13/19.

- [41] Mohsenin, N.: Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach, 1978.
- [42] Kutzbach, H.D. und R. Scherer: Das Reibverhalten von Körnerfrüchten - eine Schrifttumsübersicht. Grundl. Landtechn. 27 (1977) 6, S. 213/219.
- [43] Siegel, W.: Experimentelle Untersuchungen zur pneumatischen Förderung körniger Stoffe in waagerechten Rohren und Überprüfung der Ähnlichkeitsgesetze. VDI-Forschungsheft 538. Düsseldorf: VDI 1970.
- [44] Scherer, R. und H.D. Kutzbach: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten. Grundl. Landtechn. 28 (1978) 1, S. 6/12.
- [45] Flatow, I.: Untersuchungen über die pneumatische Flugförderung in lotrechten Rohrleitungen. VDI-Forschungsheft 555. Düsseldorf: VDI, 1973.
- [46] Winnacker, K. und L. Küchler: Chemische Technologie Bd. 2 Anorganische Technologie II. München: Hanser, 1970.
- [47] Wagenknecht, U.: Untersuchung der Strömungsverhältnisse und des Druckverlaufes in Gas/Feststoff-Injektoren. Diss. Universität Braunschweig 1981.
- [48] Vollheim, R.: Pneumatischer Transport. Leipzig: VEB-Verlag, 1971.
- [49] Hütte Des Ingenieurs Taschenbuch, Bd. 1 Theoretische Grundlagen. Berlin: Ernst, 1955.

9. Anhang

9.1 Fördergutdosierung

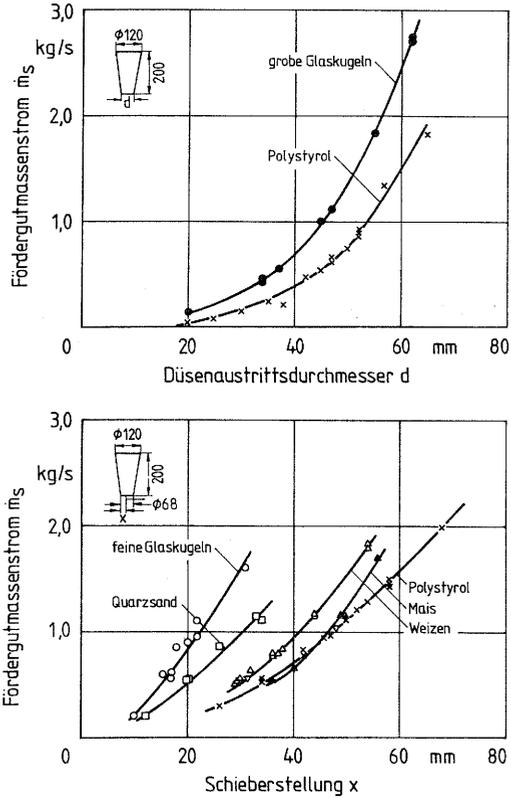
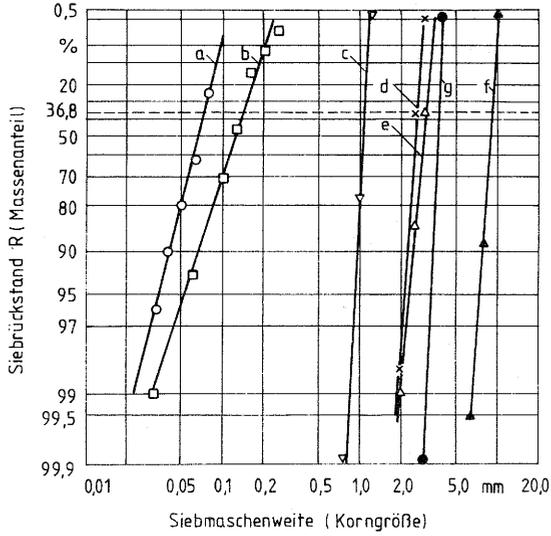
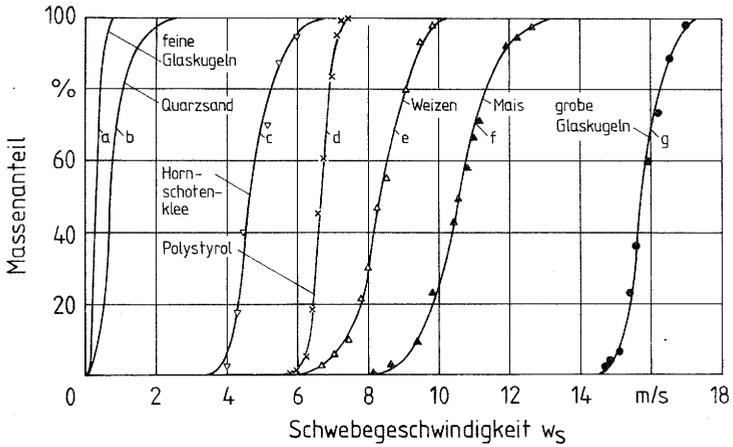


Bild 51: Fördergutmassenstrom  $\dot{m}_G$  durch konische Düsen in Abhängigkeit vom Düsenaustrittsdurchmesser bzw. von der Stellung des Dosierschiebers.



**Bild 52:** Siebkennlinien der Fördergüter nach Tafel 3.



**Bild 53:** Schwebekennlinien der Fördergüter nach Tafel 3.

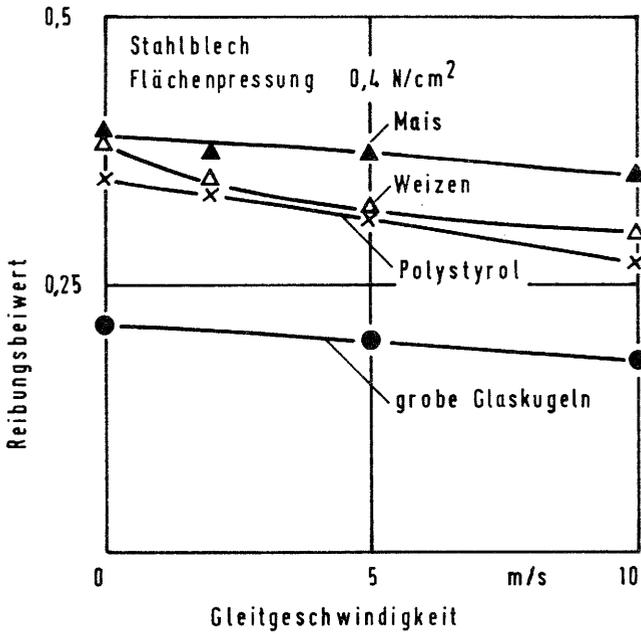
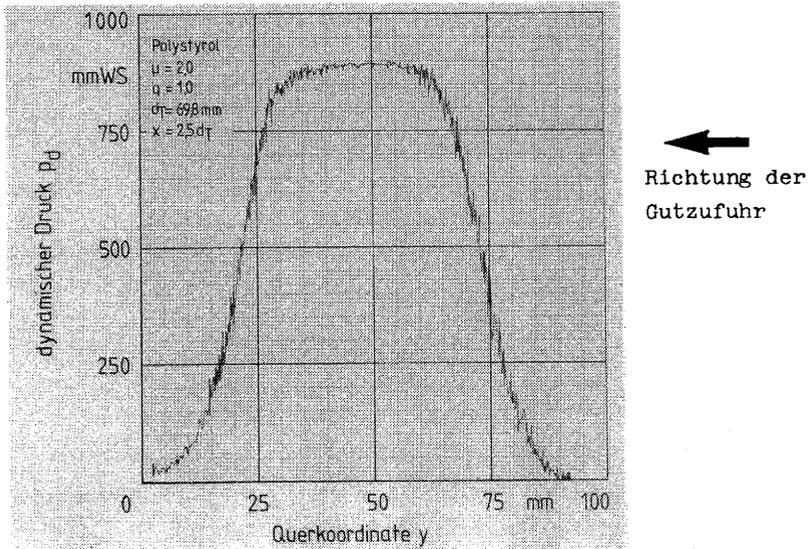


Bild 54: Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf den Reibungsbeiwert zwischen Stahlblech (blankgezogen und entfettet) und verschiedenen Feststoffen (Stoffeigenschaften und Versuchsbeschreibung in Kapitel 5.1).

### 9.3 Messung der Luftgeschwindigkeit



**Bild 55:** Meßschieb des dynamischen Druckes der Luftströmung im Mischrohr im Abstand  $x = 2,5 d_T$  von der Treibdüse bei Gutbeladung  $\mu = 2$ .

Als Ergänzung zu den in Kapitel 5.3 dargestellten Geschwindigkeitsprofilen im Mischrohr, zeigt **Bild 55** einen Originalmeßschieb eines Luftgeschwindigkeitsprofils, abgebildet durch den dynamischen Druck. Aus **Bild 55** ist zu sehen, daß die örtlichen Schwankungen des dynamischen Druckes gering sind. Weiterhin ist zu sehen, daß der Treibstrahl durch den Fördergutmassenstrom nach unten abgelenkt wird.

#### 9.4 Beobachtung der Feststoffbewegung im Gutaufgabeinjektor

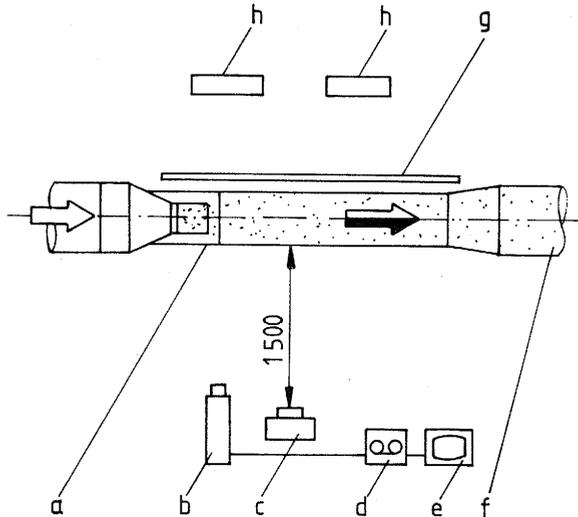


Bild 56: Anordnung der Geräte für Foto- und Videoaufnahmen der Feststoffbewegung im Gutaufgabeinjektor.

- a Injektor; b Videokamera (50 Bilder pro Sekunde);
- c Spiegelreflexkamera (Weitwinkelobjektiv);
- d Videorekorder; e Monitor; f Förderleitung;
- g Milchglasscheibe; h Halogenfilmleuchten.

#### 9.5 Fehlerbetrachtung zu den experimentellen Untersuchungen

Die Meßunsicherheit der experimentellen Ergebnisse ergibt sich aus den zufälligen und systematischen Fehlern der unmittelbar gemessenen Größen und der Fehlerfortpflanzung in den weiteren Auswertungen. Unmittelbar meßbare Größen bei den durchgeführten Messungen sind geometrische Abmessungen, Massen, Zeiten, Temperaturen und Drücke. Die Meßfehler dieser Größen ergeben sich aus der Ablesegenauigkeit, wenn systematische Fehler ausgeschlossen werden. Die relativen Fehler hängen vom gemessenen Betrag ab, der besonders bei den Drücken in weiten Bereichen

variiert.

Ablesegenauigkeiten der Drücke und der Temperaturen:

Druck:

Betz-Manometer:  $\pm 1$  Pa  
U-Rohrmanometer:  $\pm 20$  bis  $\pm 100$  Pa (je nach Druckschwankungen)  
Vielfachmanometer:  $\pm 30$  bis  $\pm 100$  Pa (je nach Druckschwankungen)  
Kapazitive Druckaufnehmer: je nach Meßbereich und Spreizung der Skala des Schreibers.

Meßstelle: Blendenwirkdruck:  $\pm 15$  Pa  
Wirkdruck Venturidüse:  $\pm 15$  Pa  
vor Injektor  $p_2$ :  $\pm 80$  Pa  
nach Injektor  $p_{5.1}$ :  $\pm 60$  Pa  
Dynamischer Druck bei Luftgeschwindigkeitsmessung:  
 $\pm 50$  Pa (für  $v \leq 130$  m/s)  
 $\pm 100$  Pa (für  $v > 130$  m/s)

Temperaturen:  $\pm 0,5$  K

Die Meßunsicherheit der abgeleiteten Größen wird nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung aus den Einzelfehlern ermittelt. Hierzu wird die Bestimmungsgleichung der abgeleiteten Größe nach den gemessenen Größen partiell abgeleitet und durch den Betrag der Größe dividiert. Das Rechenverfahren wird am Beispiel des Widerstandsbeiwertes der Feststoffpartikel gezeigt.

$$\text{Bestimmungsgleichung: } c_{wS} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} \cdot \frac{d_S \cdot g}{w_S^2} \quad (40)$$

Die Meßunsicherheiten der Einzelgrößen sind:

Feststoffdichte	$\Delta \rho_S / \rho_S = \pm 2$	%
Luftdichte	$\Delta \rho_L / \rho_L = \pm 0,5$	%
Partikeldurchmesser	$\Delta d_S / d_S = \pm 1,3$	%
Schwebegeschwindigkeit	$\Delta w_S / w_S = \pm 3$	%

Der Meßfehler der Schwebegeschwindigkeit ergibt sich aus den Meßfehlern des Luftmassenstromes, des Sichterrohrdurchmessers und aus dem Einfluß des Rohrprofiles im Sichterrohr. Da bei einem turbulenten Geschwindigkeitsprofil die Geschwindigkeit in der Rohrmitte um 10 bis 20 % größer ist als die mittlere Geschwindigkeit, können Teile ausgetragen werden, die eine höhere Schwebegeschwindigkeit haben, als der mittleren Rohrgeschwindigkeit entspricht. Durch ein kurzes Sichterrohr kann dieser Fehler verringert werden.

Da  $\rho_S \gg \rho_L$  kann  $\rho_S - \rho_L = \rho_S$  gesetzt werden. Die partielle Ableitung der Bestimmungsgleichung bezogen auf den Betrag des  $c_w$ -Wertes lautet:

$$\frac{\Delta c_{wS}}{w_S} = \frac{\Delta \rho_S}{\rho_S} + \frac{\Delta \rho_L}{\rho_L} + \frac{\Delta d_S}{d_S} + 2 \frac{\Delta w_S}{w_S} \quad (41).$$

Zahlenwerte eingesetzt ergibt:

$$\frac{\Delta c_{wS}}{c_{wS}} = 9,8 \%$$

Die Meßunsicherheiten weiterer wichtiger abgeleiteter Größen sind:

Luftmassenstrom	$\Delta \dot{m}_{LT} / \dot{m}_{LT} = \pm 2 \%$
Gutbeladung	$\Delta \mu / \mu = \pm 5 \%$
Druckziffer	$\Delta \psi / \psi = \pm 7 \%$
Feststoffgeschwindigkeit	$\Delta c / c = \pm 7 \text{ bis } \pm 10 \%$

Dieser Meßfehler enthält den Fehler aus der Messung des Spulenabstandes, der Zeitmessung sowie den systematischen Fehlern durch die Lage der Meßspulen. Wegen der Beschleunigung hat die Feststoffgeschwindigkeit einen degressiven Verlauf. Durch die Linearisierung bei der Messung ergibt sich je nach Krümmung des Geschwindigkeitsverlaufes ein systematischer Fehler von 1 bis 6 %. Diesen Fehlern sind die statistischen Streuungen von 15 bis 30 % überlagert.

Barth-Zahl

$$\Delta Ba/Ba = \pm 13 \%$$

Luftmassenstromverhältnis

$$\Delta q/q = \pm 4 \%$$

Trotz genauer Messung der Einzelgrößen ergeben sich bei einigen abgeleiteten Größen verhältnismäßig große Meßunsicherheiten, da sie aus mehreren Einzelgrößen, die teilweise quadratisch eingehen, ermittelt werden.



## LEBENS LAUF

-----

Werner Hutt, geb. am 07.09.1946 in Schorndorf, Rems-Murr-Kreis;  
verheiratet seit 08.08.1969 mit Christa Hutt, geb. Nuding,  
zwei Kinder von 6 und 9 Jahren.

1953 - 1957	Grundschule Winterbach
1957 - 1966	Gymnasium Schorndorf
03.03.1966	Abitur
01.04.1966 - 31.03.1968	Bundeswehr
04.04.1968 - 04.10.1968	Industriepraktikum in Firma
17.02.1969 - 03.04.1969	Daimler-Benz, S-Untertürkheim
WS 68/69 - WS 72/73	Studium an der Universität Stuttgart, Fachrichtung Maschinenbau; Hauptfach Chemische Verfahrenstechnik.
14.12.1972	Studienabschluß als Diplom-Ingenieur.
01.02.1973 - 31.12.1980	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und ab 01.01.1976 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Agrar- technik der Universität Hohenheim.
seit 01.02.1981	Mitarbeiter der Bayer AG, Leverkusen Bereich Anlagentechnik.



vervielfältigungen  
f. u. t. müllerbader  
Forststraße 18 · 7024 Filderstadt 4  
Telefon (0711) 771567