

Auslegung von Rutschen an Sorterendstellen

**unter besonderer Berücksichtigung der
Gleitreibungsbedingungen von Stückgütern**

von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Dortmund
zur Erlangung des Grades eines
Doktor - Ingenieurs
genehmigte Dissertation

von
Diplom-Ingenieur
Thorsten Böcker
aus Witten

Berichter:
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Reinhardt Jünemann

Mitberichter:
em. Prof. Dr.-Ing. Dr. E.h. Erich Bahke

Dortmund, Juni 1996

Diese Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Fraunhofer Institut für Materialfluß und Logistik in Dortmund.

Dem Leiter des Institutes, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Reinhardt Jünemann möchte ich an dieser Stelle danken, daß er mir das Thema dieser Arbeit zur selbstständigen Bearbeitung überlassen und das entsprechende Umfeld für die Durchführung der Versuche zur Verfügung gestellt hat.

Mein weiterer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. E.h. Erich Bahke, der die kritische Durchsicht der Arbeit und das Korreferat übernommen hat. Er stand mir in vielen Diskussionen beratend zur Seite.

Die gute Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern und Studenten des Institutes trug erheblich zum Gelingen dieser Arbeit bei; ihnen allen möchte ich für ihre Anregungen und Unterstützung besonders danken.

Dortmund, im Juni 1996

Thorsten Böcker

I. Inhalt

I. Inhalt.....	V
II. Verwendete Symbole	VII
1. Einleitung, Problemstellung	1
1.1 Stand der Forschung	1
1.1.1 Funktionen eines Sortier- und Verteilsystems	1
1.1.2 Stand der Forschung bei der Auslegung von Rutschen	3
1.1.3 Stand der Forschung zu Gleitreibungsvorgängen bei Stückgütern unter praxisnahen Bedingungen.....	4
1.2 Problemstellung	5
1.3 Ziel der Arbeit	6
1.4 Vorgehensweise.....	8
2. Versuche.....	11
2.1 Definition der Testgüter und Testoberflächen.....	11
2.1.1 Testgüter	11
2.1.2 Testoberflächen.....	15
2.2 Bodenebenheitsmessungen.....	16
2.2.1 Testgüter	16
2.2.2 Rutsche, Gleitebene	19
2.3 Reibungsmessungen	19
2.3.1 Reibungsmessungen zur Ermittlung der Parameterabhängigkeiten.....	21
2.3.2 Reibungsmessungen zur Abschätzung des Luftströmungs- einflusses auf die Reibung	24
2.4 Lage der Güter auf dem Kippschalenelement	27
2.5 Ermittlung der Bahnkurven auf ebener Rutsche.....	28
2.5.1 Vorversuche Kippschalensorter	28
2.5.2 Hauptversuche Kippschalensorter.....	32
2.6 Ermittlung der Bahnkurven bei ebener, gerader Rutsche mit Begrenzung durch seitliche Überhöhung.....	36

3. Berechnungsmodelle.....	39
3.1 Reibungseinflüsse	39
3.2 Bahnkurven	43
3.2.1 Ebene Rutsche	43
3.2.2 Ebene, gerade Rutsche mit Begrenzung durch seitliche Überhöhung.....	46
3.2.3 Ideale Kontur der Überhöhung, hyperbolische Spirale	51
3.2.4 Umsetzung der Berechnungsmodelle in das Berechnungs- programm	55
4. Ergebnisse.....	59
4.1 Versuche.....	59
4.1.1 Bodenebenheitsmessungen an Testgütern und Rutsche.....	59
4.1.2 Reibungsmessungen.....	66
4.1.3 Lage der Güter auf dem Kippschalenelement	79
4.1.4 Bahnkurvenuntersuchungen ebene Rutsche	81
4.1.5 Bahnkurvenuntersuchungen gerade, ebene Rutsche mit Begrenzung durch seitliche Überhöhung	93
4.2 Berechnungen.....	98
4.2.1 Beispiel der Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten mittels des aufgestellten Modells	98
4.2.2 Auslegung einer Sorterendstellenrutsche, Auslegungsdiagramme	100
4.2.3 Vergleich zwischen Berechnungsmodellen und Versuchsergebnissen	107
5. Diskussion der Ergebnisse.....	115
5.1 Reibungseinflüsse auf die Stückgutbewegung.....	115
5.2 Bewegungsverhalten von Stückgütern auf Rutschen, Berechnungsverfahren.....	117
6. Schlußfolgerungen, Ausblick.....	125
7. Zusammenfassung	127
8. Literatur	129
III. Anhang.....	133
III. 1 Bodenebenheitsmessungen	134
III. 2 Reibungsmessungen.....	145
III. 3 Bahnkurven, Messungen ebene Rutsche.....	160
III. 4 Bahnkurven, Messungen Rutsche mit Überhöhung.....	166
III. 5 Auslegungsdiagramme für ebene Rutschen.....	172

II. Verwendete Symbole

Lateinische Symbole

a	Spiralenkonstante
A_1, A_2	Strömungsquerschnitte
A, A_φ, A_z	Hangabtriebskräfte
A, B	Koeffizienten der empirischen Reibungsgleichung
a, b', b, b_1, b_2, h	Hilfsgrößen Abb. 3-6. und 3-7.
b	Breite Schachtel
c	Höhe Schachtel
F_p	Andruckkraft
F_{st}	Gesamtströmungswiderstand
F_n	Normalkraft
F_r	Radialkraft
F_t	Tangentialkraft
F_φ	Tangentialkraft in φ -Richtung
F_z	Zugkraft
f	Berührflächenanteil
G	Gewichtskraft
g	Gravitationskonstante
h_1	Einlaufkantenhöhe
h_2	Strömungsspalthöhe
l_1	Länge vordere Einlaufkante
l_2	Länge Auflagefläche Schachtelboden
l_3	Länge hintere Einlaufkante
l	Länge Schachtel

m	Gutmasse
M	Mittelpunkt Krümmungsradius
N	Normalkraft
O	Mittelpunkt Spirale
Δp	Differenzdruck
p_1, p_2	Einzeldrücke
r_k	Radius Kreis
r_{sp}	Radius Spirale
R, R_x, R_y	Reibkraft bzw. Reibkraftkomponenten
S	Schnittpkt. zw. Polarnormalen und Krümmungsradius
s	Gutweg
T	Berührungspunkt Tangente und Krümmungsradius
\dot{V}	Volumenstrom
v, v_1, v_2, v_x, v_y	Gutgeschwindigkeiten
Δx_o	Streuung Abwurffoffset
Δx_{st}	Streuung Bahnkurven
Z	Zentrifugalkraft Kreis
Z_{Sp}	Zentrifugalkraft Spirale
Z', Z''	Kantenkräfte

Griechische Symbole

α	Neigungswinkel Gleitebene
α'	korrigierte Ebenenneigung
α_{max}	größtes Gefälle
β	Überhöhungswinkel
δ	Hilfswinkel Spirale
ε	Hilfswinkel Spirale
γ	Anstellwinkel Begrenzung
γ	Hilfswinkel Abb.3-6
κ	Hilfswinkel Spirale
μ	Gleitreibbeiwert
ρ	Krümmungsradius Spirale
ρ_l	Dichte Luft
τ	Hilfswinkel Spirale
ζ	Verlustfaktor unstetige Querschnittsveränderung

1. Einleitung, Problemstellung

Sortier- und Verteilanlagen gewinnen aufgrund der gestiegenen Anforderungen an den Lieferservice zunehmend an Bedeutung. Die Kommissionierung von großen Gütermengen in kurzer Zeit ist nur durch den Einsatz von Hochleistungssortiersystemen zu schaffen.

Ziel ist es, automatische Systeme zu entwickeln, um in den personalintensiven Bereichen Kommissionierung und Versand weitere Rationalisierungseffekten im Materialfluß und Qualitätsverbesserungen in den Abläufen zu erzielen. Die bestehende Technologie auf dem Sortermarkt ermöglicht es inzwischen, fast alle Arten von Stückgütern automatisch zu verteilen. An den Schnittstellen zu den vor- und nachgeschalteten Bereichen des Sorters sind zur Zeit jedoch immer noch große Automatisierungslücken zu finden. So wird z.B. die Entleerung der Endstelle, d.h. das Packen von Ladeeinheiten vorwiegend manuell vorgenommen.

Daher ist dort ein Entwicklungsbedarf bezüglich der Gestaltung der Sorterendstellen zu sehen, da die Nachautomatisierung des Sortiervorgangs im wesentlichen von der Gestaltung der Endstelle abhängt. Endstellen können in verschiedener Art und Weise aufgebaut sein. Das Spektrum der in der Praxis eingesetzten Endstellentypen reicht von der einfachen Beutelendstelle über die Rutschenendstelle bis hin zur aktiv angetriebenen Fördertechnik.

Da die Rutschenendstelle sowohl im Handel als auch in der Distribution von Waren eine große Verbreitung hat, soll sich diese Arbeit vornehmlich mit der *Auslegung und Gestaltung von Rutschen an Sortier- und Verteilanlagen* beschäftigen.

1.1 Stand der Forschung

1.1.1 Funktionen eines Sortier- und Verteilsystems

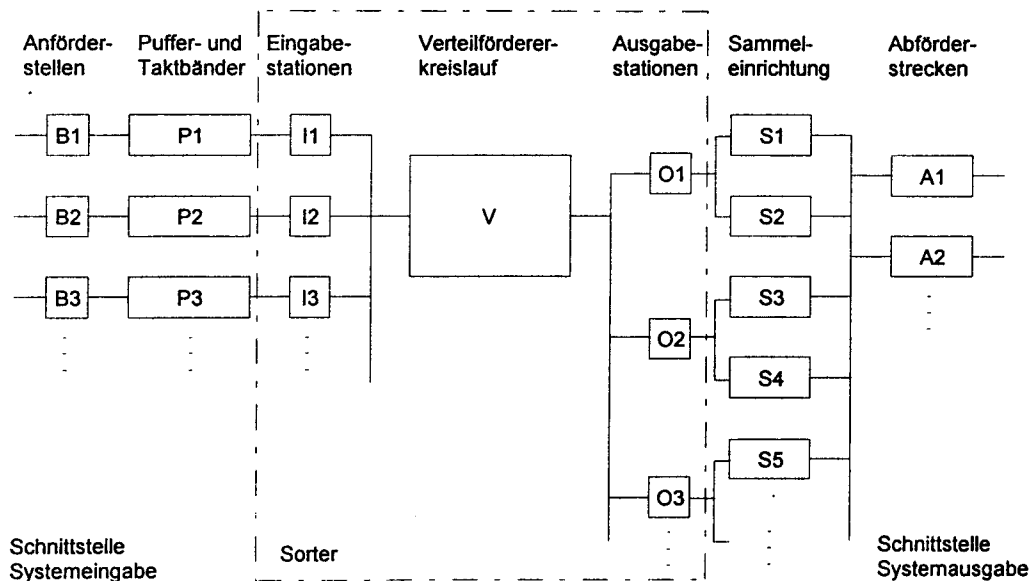
Ein Sortiersystem hat nach VDI 3619 [29] folgende funktionale Bestandteile:

- Systemeingabe
- Vorbereitung
- Identifizierung
- Verteilung
- Systemausgabe

Diese Grundfunktionen lassen sich den Grundfunktionen des Materialflusses beim Kommissionieren (VDI 3590) [28] zuordnen, wenn die Einzelfunktionen einer Sortier- und Verteilanlage genauer aufgeschlüsselt werden [4].

Das System "Sortier- und Verteilanlage" läßt sich in Untereinheiten aufgliedern, die die o.g. Einzelfunktionen technisch umsetzen:

Abb. 1-1. Systembild Sortier- und Verteilanlagen

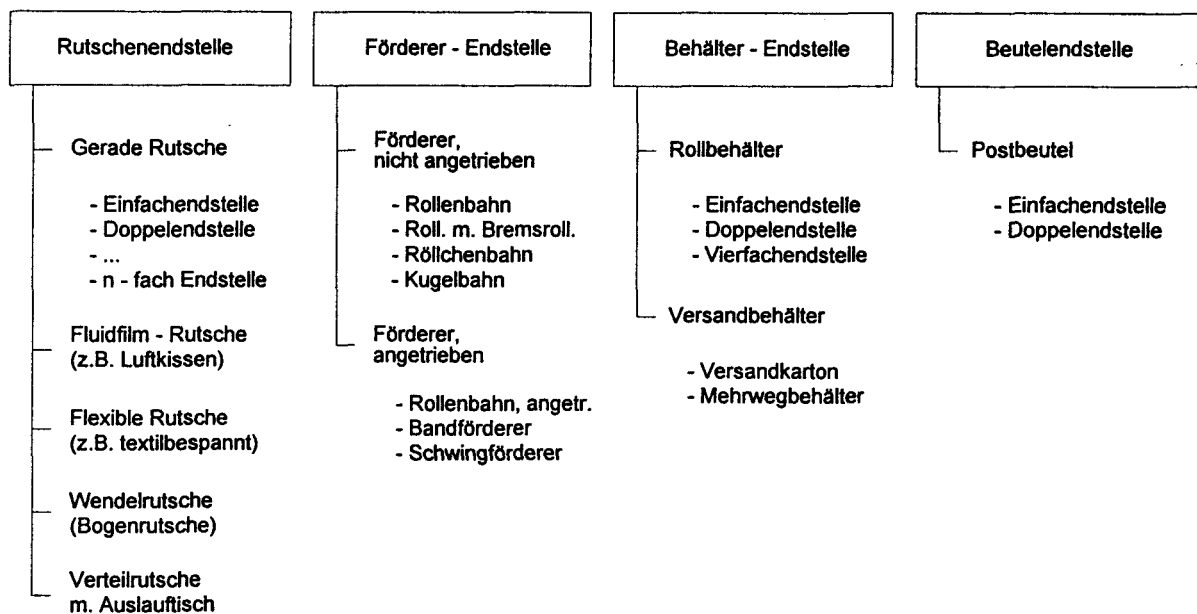


Von den oben aufgeführten Grundfunktionen eines Sorters ist in diesem Zusammenhang die "Systemausgabe" von Bedeutung. Sie ist Schnittstelle zu den nachgeschalteten Bereichen wie Packerei und Versand. Die "Systemausgabe" umfaßt meistens eine *Sammeleinrichtung für Waren in einer Endstelle*, in einigen Fällen auch zusätzlich den Ausgabemechanismus des Sorters. Für die Sammeleinrichtung kommen die in Abb. 1-2. aufgeführten technischen Ausführungsformen einer Endstelle in Frage.

Die Systematik der Sorterendstellen zeigt im Überblick, welche Möglichkeiten bestehen, die Waren nach dem Sortierprozeß in den *Sortierzielen* zu sammeln. Die Auswahl der richtigen Endstelle hängt vom jeweiligen Einsatzfall ab. Sowohl das Gutspektrum als auch die Anforderungen durch die Gutempfindlichkeit spielen dabei eine Rolle, weiterhin sind auftragspezifische Anforderungen (Puffermenge, Auftragsanzahl usw.) zu berücksichtigen.

Ein wichtiges Kriterium bei manuell bedienten Endstellen ist die ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes. Bei automatisierten Endstellen ist die orientierungs- und lagegerechte Zuführung der Güter ein Planungskriterium.

Abb. 1-2. Systematik der Sorterendstellen



1.1.2 Stand der Forschung bei der Auslegung von Rutschen

Die *Rutsche als Sorterendstelle* ist weit verbreitet. Sie wird in vielen Anlagen der Post, der Paketdienstleister und des Handels verwendet. Es ist bisherige Praxis, daß die Endstellenrutschen von den Sorterherstellern je nach Kundenanforderung für den jeweiligen Einsatzfall maßgeschneidert werden. Auslegungsrichtlinien existieren z.Zt. nicht, die einzigen Gestaltungshinweise dazu sind vom Posttechnischen Zentralamt [7,25] herausgegeben worden und stehen in vielen Fällen nur für innerbetriebliche posttechnische Zwecke zur Verfügung.

Der einzige wissenschaftliche Beitrag zu diesem Thema, der einem weiteren Interessentenkreis zur Verfügung stand, ist die Dissertation von Thüsing [27] aus dem Jahr 1953. In dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen für die Auslegung von geraden oder gekrümmten Rutschen erarbeitet. Die Berechnungen basieren auf der Annahme eines *Punktlastmodells* unter Verwendung eines *konstanten Gleitreibungskoeffizienten*. Aus Mangel an analytischen Lösungsmöglichkeiten wurden die Bahnkurven z.T. iterativ mit graphischen Verfahren ermittelt. Bei der Berechnung der Bewegungsbahnen von Gütern in Wendelrutschen wird hierbei immer von einem "eingeschwungenen" Zustand des Gutes in der Überhöhung ausgegangen. Der Kraftansatz wurde daher vereinfacht auf die Annahme, daß das Gut sich (theoretisch) in einer *unendlich langen Wendelrutsche* befindet, um den Überhöhungswinkel der Gutbahn zu berechnen.

Die Berechnung von Übergängen von geraden Rutschen auf gekrümmte Rutschen wurde bislang noch nicht vorgenommen. Bekannte Auslegungsverfahren für ebene Rutschen behandeln zur Zeit nur die eindimensionale Gutbewegung. Sie lassen keine zweidimensionale Auslegung der Rutschen zu.

In der Arbeit von Droste [31] aus dem Jahr 1995 werden Kinematiken von Kippschalenelementen untersucht und verglichen. In diesem Zusammenhang nimmt Droste auch Bahnkurven auf ebenen Rutschen bei verschiedenen Neigungswinkeln auf, jedoch ohne das Ziel einer eingehenden Untersuchung aller verschiedenen, auftretenden Einflußgrößen auf den Rutschvorgang von Stückgütern. Ein praxisnahes Testgüterspektrum kommt nicht zur Anwendung.

1.1.3 Stand der Forschung zu Gleitreibungsvorgängen bei Stückgütern unter praxisnahen Bedingungen

Für die Berechnung der Bewegungsbahnen von Gütern auf Rutschen ist die genaue Kenntnis der Gleitreibungsbedingungen erforderlich.

Nach Kragelski, Dobycin und Kombalov [20] gibt es bis heute keine zufriedenstellende Theorie der kinematischen Reibung. Daher wird zur Berechnung in der Praxis meistens die einfache Beziehung $R = \mu N$ verwendet, die Leonardo da Vinci schon im Jahre 1508 gefunden hatte. Eine erste Formulierung der Reibungsgesetze wurde von Coulomb im Jahre 1785 vorgenommen. Erst ab 1939 konnten die Verhältnisse der Festkörperreibung genauer beschrieben werden (zitiert nach [20,13]). Diese Erkenntnisse auf Basis einer molekular-mechanischen Betrachtung der Reibungsvorgänge bilden im wesentlichen bis heute den Stand der Forschung zu diesem Bereich der Reibungsforschung. Es wird dabei davon ausgegangen, daß zwischen den beiden Gleitflächen sich ein "dritter Körper" herausbildet, der elastisch-viskose Eigenschaften aufweist. Dabei treten sowohl "zwischenmolekulare Wechselwirkungskräfte bei den in Kontakt stehenden Oberflächen" als auch Kräfte "durch die Formänderung (umkehrbare oder nicht umkehrbare) des Relief der sich berührenden Körper infolge einer pflügenden Wirkung der Unebenheiten bei rauhen Oberflächen" auf [20]. Die Reibung hängt nach diesen Erkenntnissen im wesentlichen vom Druck zwischen den Körpern und der Gleitgeschwindigkeit ab.

Es wurden verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Gleichung für den Reibbeiwert gemacht. Am einfachsten anwendbar für die Praxis erscheint der *Ansatz von Kragelski, Dobycin und Kombalov* [20] zu sein, der auf einer *empirischen Gleichung* von Franke (1882) aufbaut:

$$T = (a + bv)e^{-cv} + d \quad (1-1.)$$

Hierbei ist T die Reibkraft, v die Geschwindigkeit und a , b , c , d sind Faktoren.

Es wurde bei ihren Untersuchungen unter anderem festgestellt, daß der Reibbeiwert bei zunehmender Geschwindigkeit ein *Maximum* durchläuft.

Neben diesen theoretischen Untersuchungen wurden verschiedene praxisnahe Untersuchungen zum *Reibungsverhalten von Bandförderern mit gleitender Abtragung* durchgeführt, da diese Parameter sehr wichtig für den Betrieb der Anlagen sind.

So werden von Koster [18,19] leicht *steigende Reibbeiwertsverläufe* bei steigender Gleitgeschwindigkeit beschrieben. Auch Grimmer u. Thormann [16] kamen zu ähnlichen Ergebnissen, die jedoch stark abhängig vom verwendeten Gurt waren. Weiterhin wurde festgestellt,

daß die gefundenen Gleitreibbeiwerte von der *Temperatur* zwischen den Gleitflächen abhängen. Eine neuere Veröffentlichung von Thormann und Wißerodt [26] beschreibt die Reibungsabhängigkeiten zwischen Drahtgurten und thermoplastischen Kunststoffen. Hier wird ebenfalls festgestellt, daß der Reibbeiwert bei steigender Gleitgeschwindigkeit steigt.

Aus den obigen Untersuchungen kann verallgemeinernd gefolgert werden, daß der Gleitreibungbeiwert bei zunehmender Gleitgeschwindigkeit (innerhalb praxisrelevanter Gleitgeschwindigkeiten) steigt. Diese Erkenntnisse gelten jedoch nur für die Reibpaarung von gleitend abgetragenen Gurten an Bandförderern.

Zum Reibungsverhalten von Stückgütern auf Rutschen sind dem Autor mit Ausnahme der Dissertation von Vogt und Versuchen der Oberpostdirektion (OPD) Düsseldorf keine Untersuchungen bekannt. Bei Vogt [30] wird das Verhalten von Gütern auf Rutschen unter besonderer Beachtung des *Feuchtigkeitseinflusses* betrachtet. Ein Geschwindigkeitseinfluß oder Flächenpressungseinfluß wird dort nicht betrachtet. Die Versuche der OPD Düsseldorf haben die Untersuchung des Reibbeiwertes von Stückgütern zum Gegenstand. Als Ergebnis wurde ein optimaler Rutschenneigungswinkel von 24 Grad für lackierte Blechrutschen gefunden (zitiert nach [25], S. 4).

Es ist zusammenfassend festzustellen, daß zur Zeit keine Ergebnisse zum Reibungsverhalten von Stückgütern unter Beachtung des Geschwindigkeits- und Flächenpressungseinflusses vorliegen.

1.2 Problemstellung

Aus dem Stand der Forschung lassen sich verschiedene Ansatzpunkte für Verbesserungen an Sortern ableiten. Aus den bisher vorliegenden Erkenntnissen wird deutlich, daß es vor allem an den Methoden mangelt, die Stückgutbewegung bei der Ausgabe von einer Sortieranlage analytisch oder empirisch zu erfassen und daraus Schlußfolgerungen für die Planung einer Sortieranlage abzuleiten. Die bestehenden Verfahren erlauben keine Auslegung von Rutschen an Sorterendstellen, da es mit den zur Verfügung stehenden Erkenntnissen oder Methoden nicht möglich ist, die Endstellenbreite und -länge zu bestimmen.

Zum einen fehlten in der Vergangenheit (50er und 60er Jahre) die technischen Möglichkeiten, Bewegungsbahnen von Gütern berührungslos zu erfassen und sie anschließend auszuwerten. Dazu kommt, daß die großen Mengen an Daten, die bei diesen Versuchen zu bearbeiten sind, nur schwer zu bewältigen waren. Zum anderen gingen die bestehenden Berechnungsverfahren von anderen Einsatzfällen für die Verwendung von Rutschen aus, die mit dem heutigen Einsatz von Sorterendstellen nicht vergleichbar sind.

Da jedoch die Planung von Hochgeschwindigkeitssortern nur mit einer genauen Kenntnis der Gutbewegung beim Abwurf in die Endstelle möglich ist, ist es unabdingbar, dazu Auslegungsrichtlinien und -diagramme zu erarbeiten.

Ansonsten sind Fehlplanungen die Folge, die sich vor allem in überdimensionierten Endstellenbreiten, Fehlsortierungen oder Gutbeschädigungen niederschlagen. Beides ist jedoch mit finanziellen Einbußen für den Betreiber einer Sortieranlage verbunden. Sortier- und Verteilanlagen haben z.T. 300 oder mehr Endstellen, in diesen Fällen ist eine *Überdimensionierung der Breite der Endstelle* mit erheblichen baulichen Mehrkosten verbunden. Wenn beispielsweise auf einer Länge von 150 Endstellen je Endstelle 0,2 m eingespart werden können, entspricht dies einer gesparten Länge von 30 m. Bei einer Sortieranlagenbreite von ca. 25 m kommt diese Länge einer Einsparung 750 m² Hallenfläche gleich.

Die *Fehlsortierungen* sind besonders in der Versandhandelsbranche mit erheblichen Folgekosten verbunden. Die Fehlsortierung muß zunächst erkannt und korrigiert werden, was zum Teil erst beim Endkunden der Fall sein kann. Die Korrektur einer fehlerhaften Lieferung oder einer Fehlkommissionierung ist andererseits mit großem abwicklungstechnischen Aufwand verbunden und erfordert eigenes Abwicklungspersonal. Dadurch entstehen an mehreren Stellen Mehrkosten beim Betreiber und eine Verminderung der logistischen Qualität, da mit einer Verlängerung der Lieferzeiten und einer Verminderung des Servicegrades zu rechnen ist. Eine weitere wichtige Größe ist der Verlust eines Kunden aufgrund von Fehllieferungen. Der dadurch entstehende Umsatzverlust ist in vielen Fällen erheblich größer als die Kosten für die Korrektur einer Fehllieferung, entsprechende Kalkulationen zu diesem Thema liegen bei großen Handelsketten vor.

Diese Beispiele zu einer Fehldimensionierung des Sortierendstellenbereiches sollen verdeutlichen, wie groß die wirtschaftliche Bedeutung einer genauen Planung und Auslegung der Endstellenrutsche ist. Es wären noch weitere Auswirkungen auf den Betrieb einer Sortieranlage zu belegen, an dieser Stelle sollen die aufgeführten Beispiele jedoch ausreichend sein.

1.3 Ziel der Arbeit

Die Analyse des Standes der Forschung hat gezeigt, daß zwei *Untersuchungsschwerpunkte* gesetzt werden müssen, um Auslegungsrichtlinien für die Gestaltung von Sortierendstellen zu erhalten:

1. Ermittlung der *Abhängigkeiten des Reibungsbeiwertes* von der *Gutgeschwindigkeit* und dem *Gutgewicht*
2. Erarbeitung von *Auslegungsverfahren zur Bestimmung der Bahnkurven von Stückgütern* auf Endstellenrutschen.

Diese Hauptziele der Arbeit sind nur zu erreichen, wenn die Problematik im Zusammenhang mit den möglichen Einflußgrößen auf die Gutbewegung gesehen wird.

Daher müssen folgende *Unterziele* erreicht werden, um die Erforschung der Hauptziele durchzusetzen:

1. Definition eines repräsentativen Gutspektrums zu Versuchszwecken
2. Definition einer repräsentativen Rutschenoberfläche
3. Definition eines Versuchssortertyps und genaue Kenntnis seiner kinematischen Eigenschaften
4. Kenntnis der tatsächlichen Kontur des Gutbodens und der seiner Berührungsfläche mit der Rutsche
5. Erforschung der Unterschiede im Verhalten von formstabilen und von biegeweichen Gütern
6. Kenntnis der Lage von Gütern auf dem Sorterelement nach der Eingabe

Das verwendete Testmaterial muß in jedem Fall *repräsentativ* für die heutzutage sortierten Güter sein, da ansonsten keine Möglichkeiten bestehen, die Ergebnisse auf konkrete Anwendungsfälle umzusetzen. Es muß über das verwendete Testmaterial möglich sein, sich für eine Planung das Gutspektrum des Einsatzfalles aus dem getesteten Material zusammensetzen und damit die Bahnkurven der späteren Anwendung zu simulieren. Das gleiche gilt für die verwendeten Rutschenmaterialien.

Die Ergebnisse für die Auslegung von Endstellenrutschen sollen *allgemeingültig* sein, daher ist die genaue Kenntnis der kinematischen Eigenschaften des verwendeten Sortertyps außerordentlich wichtig für den korrekten Versuchsbetrieb. Für eine durchgängige Berechnung des Gutverhaltens vom einzelnen Sorterelement bis zum Ende der Endstellenrutsche müssen ebenfalls Erfahrungen über die *Lage des Gutes auf dem Sorterelement* gesammelt werden.

Um die Gründe für die Abhängigkeiten des Reibbeiwertes von Gutgeschwindigkeit und Gutmasse zu finden, muß zunächst genau bekannt sein, in welcher Form sich eine *Berührungsfläche des Gutes mit der Rutschenfläche* ausbildet. Durch das Gutgewicht ergibt sich eine belastungsabhängige Berührungsfläche am Gutboden, die Einfluß auf das Reibungsverhalten des Gutes hat. Da das Verhalten des Gutes ebenfalls von der Formstabilität des Gutes während der Bewegung abhängt, ist es von Bedeutung, die *Unterschiede im Verhalten von formstabilen und von biegeweichen Stückgütern* zu beobachten und daraus Schlußfolgerungen für die Auslegung der Endstelle zu treffen.

1.4 Vorgehensweise

Um die obengenannten Ziele zu erreichen, ist eine koordinierte Vorgehensweise erforderlich. Die gewählte Vorgehensweise und die dazu durchgeführten Versuchsreihen zeigen die Abbildungen 1-3. und 1-4. im Überblick.

Abb. 1-3. Vorgehensweise, Hauptversuche und Analysen

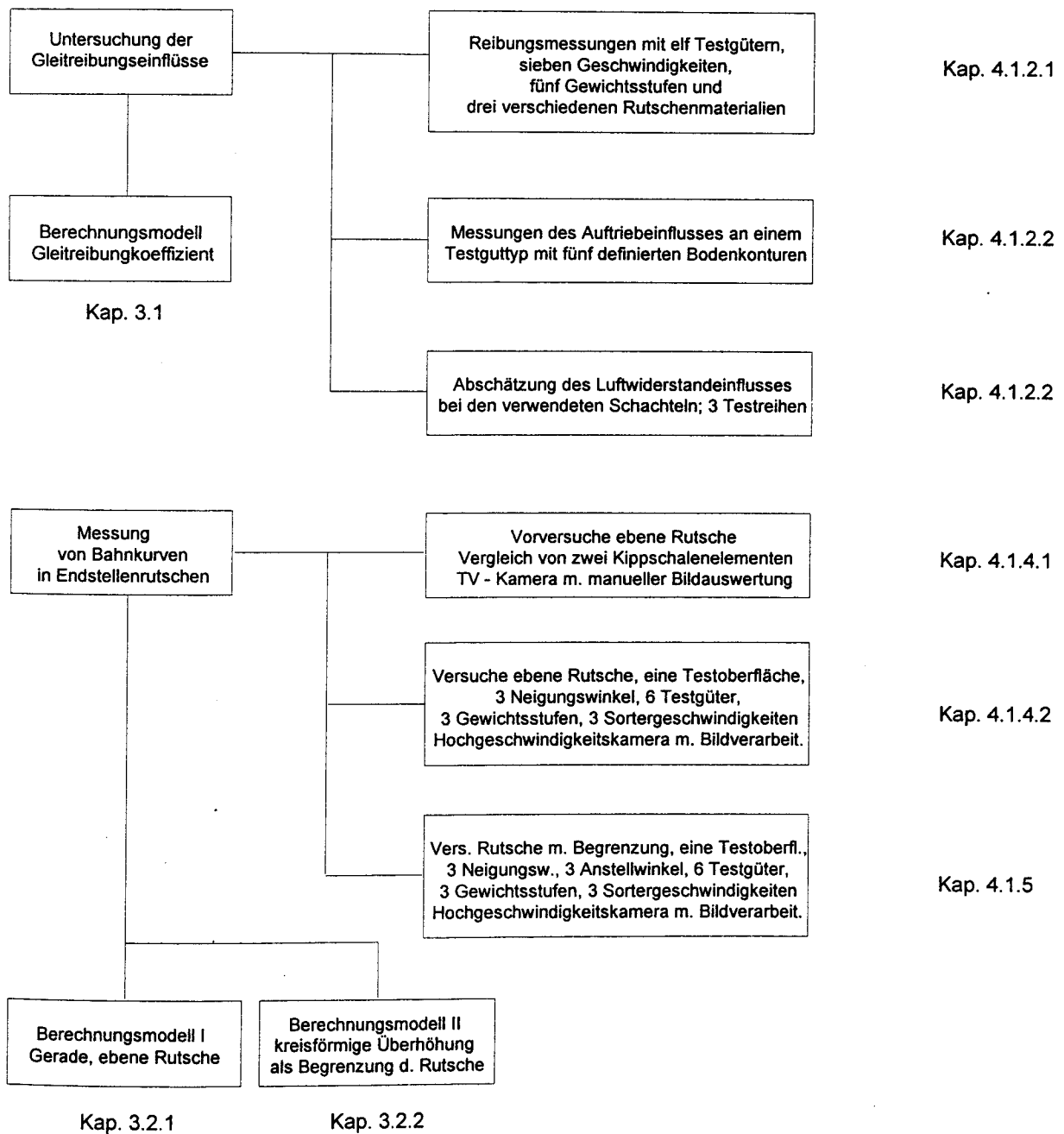
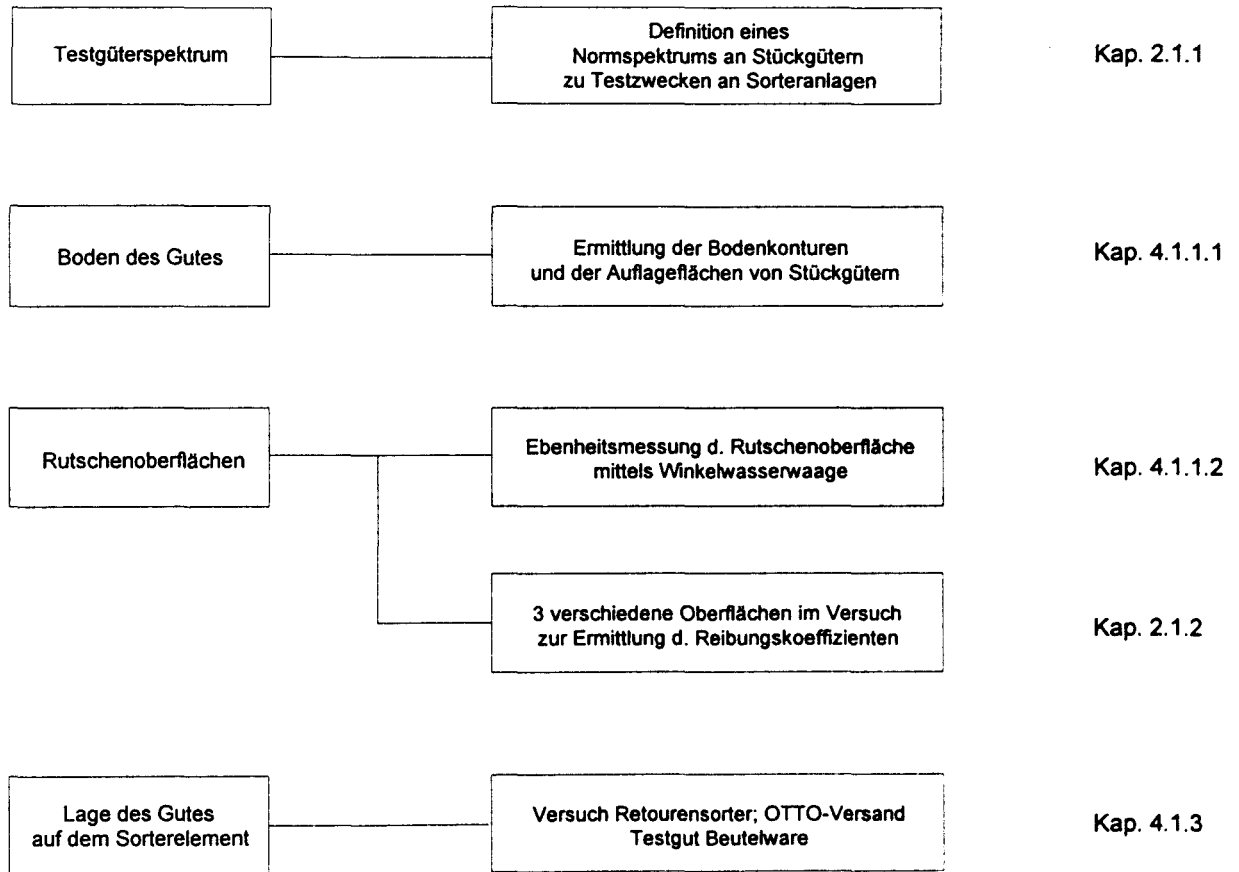


Abb. 1-4. Vorgehensweise, begleitende Versuche und Analysen



2. Versuche

Um die Bewegung von Stückgütern auf Rutschen berechnen zu können, ist es notwendig, alle Einflußgrößen des Gutverhaltens genau zu kennen. Zur Untersuchung der Einflußgrößen müssen daher verschiedene Versuche durchgeführt werden, die Aufschluß über das Gutverhalten beim Gleitvorgang geben. Im Rahmen der Erforschung der Gleitbewegung von Stückgütern auf Gleitebenen wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, die dazu dienen, Einzelaspekte der Bewegung zu untersuchen. Alle Versuchsreihen stehen miteinander im Zusammenhang und sollen ein möglichst geschlossenes Bild der Einflußparameter geben, wenn auch nicht alle auftretenden Phänomene im Detail untersucht werden konnten.

2.1 Definition der Testgüter und Testoberflächen

2.1.1 Testgüter

Für die Durchführung von Versuchen wird ein Testgutspektrum - im folgenden engl. "Testdeck" genannt - benötigt, welches möglichst repräsentativ in Bezug auf die heute in der Praxis verwendeten Stückgüter ist. Als erste Abgrenzung wurde festgelegt, daß es sich hierbei nur um *Schachteln aus Karton* - im folgenden kurz "Schachtelware" genannt - und um *Beutelware* handelt [6,8,9,10,11,12].

Im Versandhandel und in Distributionszentren, die die Hauptanwender für Hochleistungssortier- und Verteilanlagen sind, wird heute vorwiegend Schachtel- und Beutelware sortiert. Die Verwendung von Metalldosen, Kunststoffkästen oder ähnlichen formstabilen Behältern soll nicht Gegenstand dieser Untersuchung sein, da diese häufig unter völlig anderen Randbedingung eingesetzt werden, z.B. bei der Sortierung von Leergut in Mehrwegpoolsystemen. Diese Sortieranwendungen setzen meist völlig andere Sortiertechniken voraus und haben mit dem hier betrachteten Anwendungsfall nichts gemeinsam.

Wichtig für die Bildung eines repräsentativen Gutspektrums als Testdeck ist es, daß neben der Unterscheidung in Packmittelformen wie Schachtel- und Beutelware auch eine differenzierte Verwendung verschiedener Packstoffe (die den Grundstoff für die Fertigung der Schachtel- oder Beutelware bilden) gewährleistet ist. Daher wurden folgende Materialien für den Test ausgesucht:

Schachtelware:

- Chromokarton
- Schachtelkarton
- Maschinenpappe
- Wellpappe, einlagig oder mehrlagig

Nach Erhebungen wird als Packstoff in Deutschland zu 20 % Karton und zu 42 % Vollpappe bzw. Wellpappe benutzt. Dieses deckt sich teilweise mit den Ergebnissen aus einer Untersuchung im Postamt Hannover [3]. Von den Päckchen, die dort klassifiziert wurden, gehörten 51 % zu der Klasse Karton oder Vollpappe bzw. Wellpappe. Somit sollten diese Packstoffe im verwendeten Testdeck ebenfalls mit einem Anteil von 50 bis 60 % vertreten sein.

Aufgrund der verschiedenen Materialien ergeben sich verschiedene Gleit- und Haftreibungseigenschaften, die mit der Reibpaarung Stückgut - Gleitfläche zusammenhängen. Hier ist ein möglichst breit angelegtes Spektrum an Materialien wichtig, um repräsentative Aussagen treffen zu können.

Als *Packstoffe* für die Beutelwaren kommen Papier- und Kunststoffmaterialien in Frage. Im einzelnen wurden folgende Materialien verwendet:

Beutelware:

- Polyethylen (PE)
- Polypropylen (PP)
- Polyamid (PA)
- gestrichenes Papier

Bei den Beutelwaren ist die Verwendung von PE-Folien als Kunststoff-Packstoff mit 63 % am meisten verbreitet. Andere Folienmaterialien müssen ebenfalls berücksichtigt werden, da durch neue Verordnungen zur Wiederverwertung von Verpackungen auch neue Packstoffe verwendet werden.

Die Materialien unterscheiden sich nicht nur in ihren mechanischen Eigenschaften. Unter Berücksichtigung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Reibung ist besonders hervorzuheben, daß einige Kunststoffe zur Wasseraufnahme neigen (z.B. Polyamid [2]) und damit in ihren Reibeigenschaften stark variieren können. Die Tendenz zur elektrostatischen Aufladung ist bei den meisten Kunststoffen aufgrund des sehr niedrigen dielektrischen Verlustfaktors hoch, daher neigen Kunststoffe beim Gleiten zu unerwünschtem Haften auf der Oberfläche der Rutsche.

Papier ist ein weiterer, sehr verbreiteter Packstoff für Beutel, daher ist eine Papiertüte ebenfalls mit im Testgutspektrum. Sortieranlagen der Brief- und Päckchenverteilung arbeiten nahezu ausschließlich mit Papierbeuteln oder Papierumschlägen.

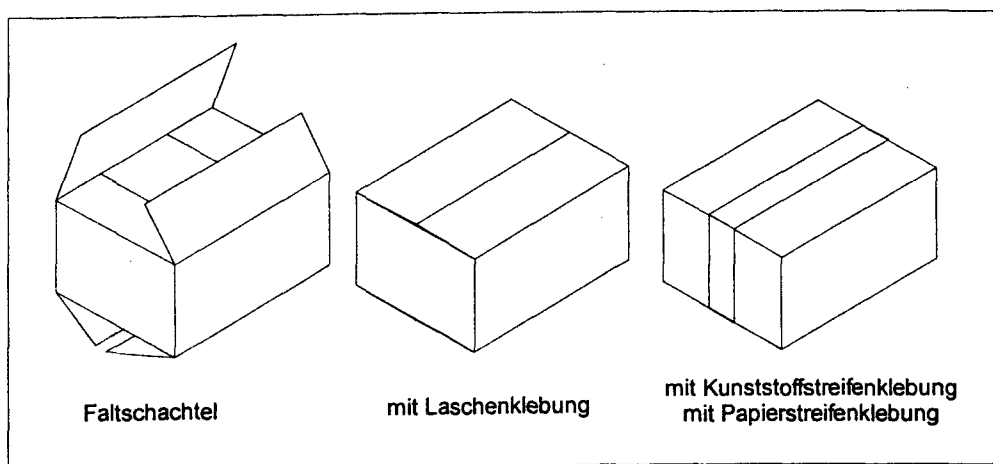
Nicht nur die Frage der verwendeten Packstoffe ist entscheidend für das Gutverhalten auf der Rutsche, sondern es kommt auch auf die Gestaltung und die Größe des Packmittels an. Bei Beuteln werden nur *Flachbeutel* betrachtet, da die anderen Beutelformen eine mehr oder weniger ähnliche Auflagefläche haben. Flachbeutel bieten bei der Verwendung auf Hochleistungsartem die wenigsten Probleme, da sie keine spezielle Vorzugsorientierung besitzen.

Anders ist die Situation bei der Verwendung von Schachtelwaren, hier spielen die Art des Packmittels und die Verwendung von Packhilfsmitteln eine große Rolle. Daher sollen zwei repräsentative Bauformen von Schachteln im Testdeck Verwendung finden, *Faltschachteln* und *Deckelschachteln*. Die Faltschachteln sind durch ihre Laschen in der Mitte des Bodens geteilt und daher in der Berührungsfläche zur Gleitebene verschieden von den Deckelschachteln. Diese kommen dem Ideal der ganzflächigen Berührung des Schachtelbodens mit der Gleitfläche am nächsten.

Die *Faltschachteln* sind als Zuschnitt flach stapelbar und in der Praxis weitverbreitet. Sie werden aufgerichtet und durch Verkleben fixiert. Um in den Versuchen den Einfluß der Verklebungsarten untersuchen zu können, wurden verschiedene Fixierungen der gleichen Faltschachtel eingesetzt. Folgende Fixierungsarten wurden gewählt:

- Laschen-Verklebung mit Flüssig-Klebstoff
- Streifenklebung mit Papierklebeband
- Streifenklebung mit Kunststoffklebeband

Abb. 2-1. Verwendete Faltschachteln

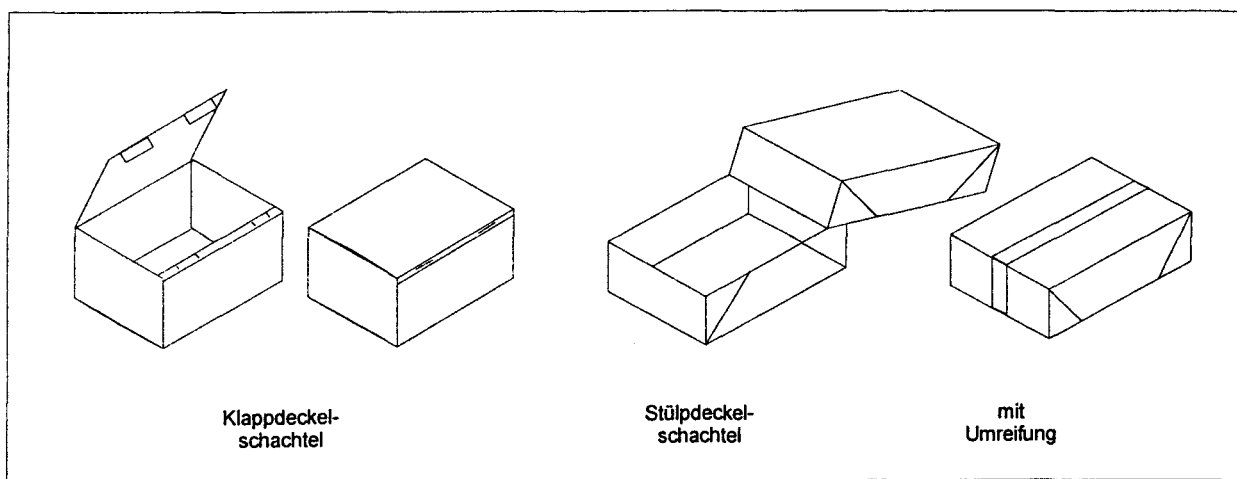


Die *Deckelschachteln* haben als Gemeinsamkeit einen glatten Boden bei verschiedenen Konstruktionsvarianten. Das Postpaket des Postdienstes ist z.B. als Deckelschachtel

konstruiert und kann ohne Packhilfsmittel aus einem Zuschnitt zusammengesteckt werden. Daneben gibt es Stülpdeckelschachteln, die aus zusammengeklebten Zuschnitten in Boden- und Deckelform bestehen. Diese werden besonders im Handels- und Pharmabereich beim Versand von Kleinteilen eingesetzt. Zum Teil werden die Schachteln auch umreift, um das Öffnen der Schachtel zu verhindern. Daher wurden aus der Vielfalt an Deckelschachteln folgende Varianten als Testgüter ausgewählt:

- Klappdeckelschachtel
- Stülpdeckelschachtel
- Stülpdeckelschachtel, umreift in Längsrichtung um die Querachse der Schachtel.

Abb. 2-2. Verwendete Deckelschachteln



Weiter ist die *Größe der Schachtel- und Beutelware* beeinflussend auf das Gutverhalten in der Sortierendstelle. Daher wurden insgesamt drei verschiedene Größenstufen für den Testbetrieb vorgesehen :

- Grundfläche 600 mm x 400 mm
- Grundfläche 400 mm x 300 mm
- Grundfläche 300 mm x 200 mm

Die Größenstufungen basieren auf den Modulabmessungen für Ladeeinheiten.

Wie Ergebnisse der Untersuchungen im Postamt Hannover [3] zeigten, kamen bei den dort vorgenommenen Messungen am häufigsten Güter mit der kleinsten Größe vor (Mittelwert der untersuchten Päckchen: 303 mm x 227 mm). Daher ist es anzunehmen, daß mit der Auswahl der mittleren Grundfläche für die Testgüter eine große Zahl der Anwendungen von Hochleistungssortier- und Verteilanlagen abgedeckt wird.

Tab. 2-1. Zusammenstellung des Testgutspektrums, Übersicht

Testgut	Schachtelware	Beutelware
Packstoffe	Chromokarton Schachtelkarton Maschinenpappe Wellpappe, einlagig oder mehrlagig	Polyethylen (PE) Polypropylen (PP) Polyamid (PA) gestrichenes Papier
Packmittel	Faltschachtel Klappdeckelschachtel Stülpedeckelschachtel	Flachbeutel
Packhilfsmittel	Klebstoff Papierklebeband Kunststoffklebeband Kunststoff-Umreifungsband	Kunststoffklebeband
Grundflächen	600 x 400 mm 400 x 300 mm 300 x 200 mm	600 x 400 mm 400 x 300 mm 300 x 200 mm

Im Test wurden ausschließlich neue Testgüter verwendet, da dies den tatsächlichen Bedingungen entspricht. In der Praxis werden die neuen Verpackungen meistens zweimal sortiert (bei der Distribution), bis sie den Kunden erreichen.

2.1.2 Testoberflächen

Die Auswahl der Testoberflächen ist ebenso wichtig wie die Auswahl der Testgüter, da sie als Reibpartner zu den Testoberflächen fungieren.

Das eingesetzte Spektrum an Testoberflächen soll es ermöglichen, die Testreihen zu vergleichen. Daher wurde als erste Testoberfläche ein *blankes Stahlblech*, kaltgewalzt, St 12.03 ausgewählt. Obwohl die Gefahr der Korrosion des Bleches gegeben ist, wird dieses Blech für die Testreihen eingesetzt, da es hierzu viele Erfahrungen in gelaufenen Untersuchungen gibt [5] und da Stahlblech unter anderem seit Jahren von der Fa. Sandvik für ihre Stahlbandförderanlagen verwendet wird. Auch hierzu liegen bereits vielfältige Erfahrungen aus der Praxis vor.

Weiterhin wurde ein *lackiertes Stahlblech* ausgewählt. Diese Art der Ausführung von Endstellenrutschen ist in der Praxis sehr häufig anzutreffen. Als Lackierung wurde eine Dickschichtenlackierung der Fa. Krautol, Nr. 5011/707 verwendet. Diese Lackierung auf PVC Basis wird auch für die Rutschenendstellen im Bereich des Postdienstes verwendet [7], daher

ist dieser Lack als ein Standard im Hochleistungssortier- und Verteilanlagenbereich anzusehen. Die Lackierung der Endstellenrutsche ist von der Reibpaarung her als Zwischenstufe zwischen unbehandeltem Stahlblech und Kunststoffoberflächen einzustufen, da sich die Lackierung nach einigen Betriebsstunden abnutzt. Um diesen Alterungsprozess im Test nachzuahmen, wurde das lackierte Blech mit einem Schwingschleifer mit feinsten Körnung vorsichtig angeschliffen. Dadurch werden mikrofeine Spitzen, die durch Staub oder andere Erhöhungen auf dem Blech entstehen, eingeebnet.

Die dritte Variante der Testoberflächen stellt eine *grau eingefärbte Weich-PVC Oberfläche* dar, die ein Beispiel für die Verwendung von Kunststoff als Rutschenmaterial sein soll. Der verwendete Kunststoff wird als Konstruktionswerkstoff im allgemeinen Maschinenbau verwendet und wird in verschiedenen Plattendicken hergestellt.

2.2 Bodenebenheitsmessungen

Für die Durchführung der Versuche zur Aufnahme des Bewegungsverhaltens von Stückgütern ist es sehr wichtig zu wissen, welche Oberflächenform die beteiligten Reibpartner haben. Die Flächen berühren sich während des Gleitvorgangs an gewissen Stellen, davon hängt somit die Bewegung der Güter ab.

2.2.1 Testgüter

Um Aussagen über die Bodenkontur der im Test verwendeten Stückgüter zu treffen, wurde für jeden Punkt des Gutbodens (während des Aufliegens des Gutes auf einer ebenen Fläche) der Abstand zwischen Bodenfläche und Gleitebene bestimmt. Da sich der Schachtel- oder Beutelboden mit zunehmender Last verformt, wurde der Beladungseinfluß auf die Gutkontur ebenfalls untersucht, indem die Veränderung der Auflagefläche analysiert wurde.

Versuchsstandbeschreibung

Um diese Effekte zu beobachten, ist ein Versuchsstand konzipiert worden, der mittels eines Laserentfernungsmessers durch eine Glasplatte hindurch den Abstand der Bodenfläche der Testgüter zur Glasplatte bestimmt. Um die Oberfläche der Glasplatte als Referenzpunkt zu nehmen, wurde der Entfernungsmesser mit seinem Nulldurchgang auf die Höhe der Glasoberfläche eingestellt. Der Laserentfernungsmesser arbeitet als absolut messendes System und gibt analog zur gemessenen Entfernung eine Spannung aus. Die Spannung wurde von einer Analog-Digital Wandlerkarte in eine Information für den PC verwandelt. Die Auflösung des Lasersystems liegt bei $\pm 0,01$ mm. Über die relative Genauigkeit des Analogausgangs des Lasersystems liegt keine Angabe vor.

Abb. 2-3. Versuchsaufbau

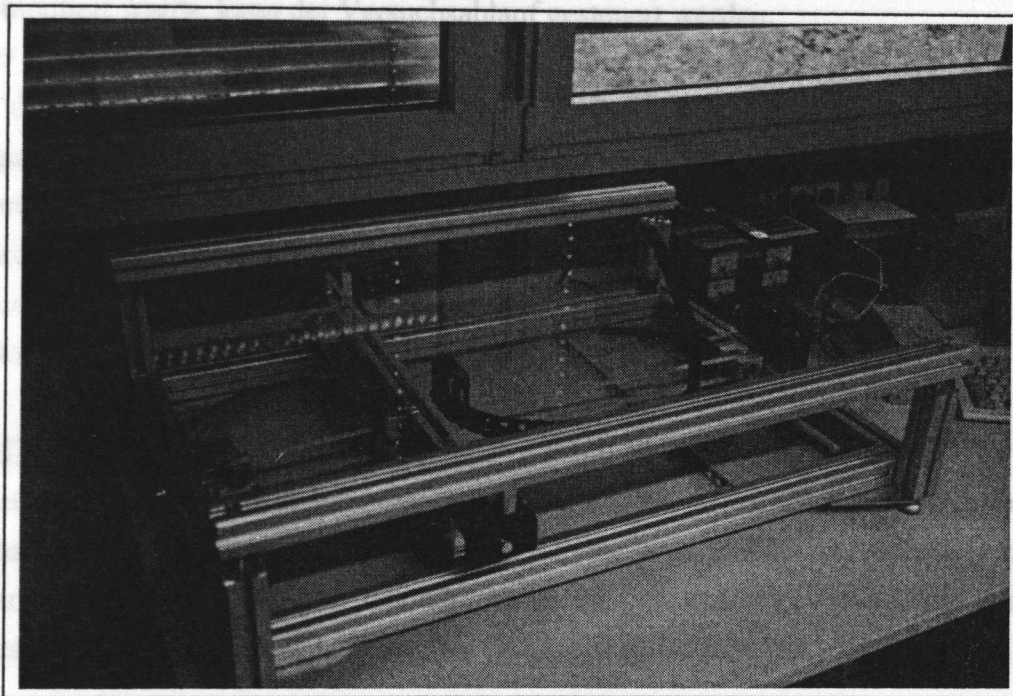
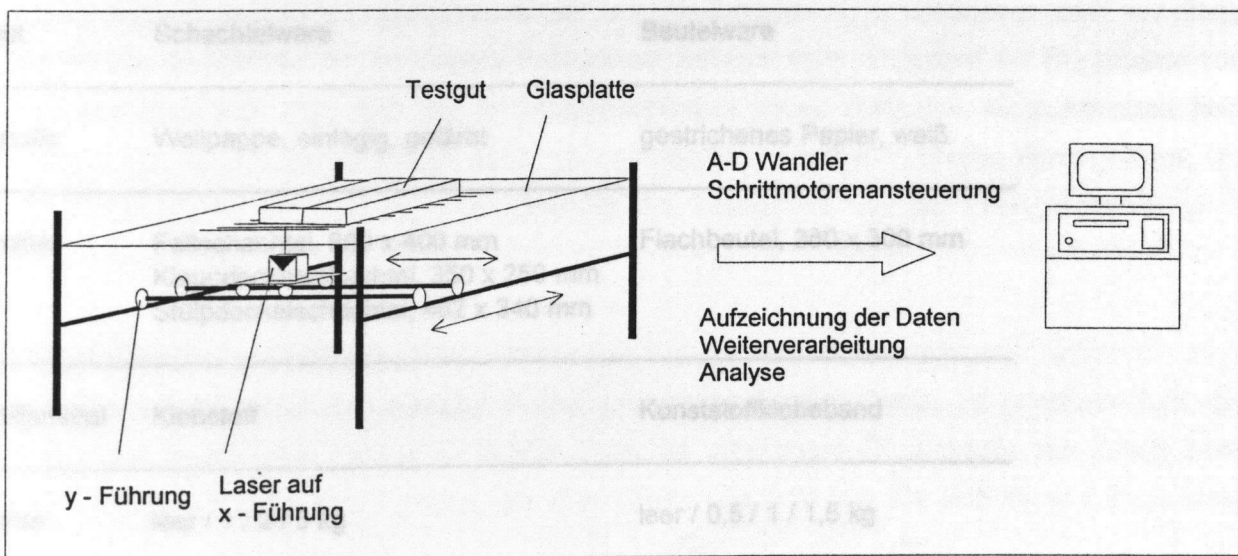


Abb. 2-4. Skizze des Versuchsaufbaus



Um jeden möglichen Punkt der Bodenfläche anfahren zu können, wurde der Laser mit einem Schlitten auf eine justierbare Führung gesetzt. Diese Führung war wiederum als Portal auf einem Rahmen gelagert, ebenfalls mit justierbaren Führungsbahnen. Dadurch ergibt sich eine Art X-Y Koordinatentisch, jede Position kann durch Ansteuerung von zwei Schrittmotoren erreicht werden. Die Schrittmotoren betätigen an den Führungen fixierte Zahnriemen, die die Bewegung der Motoren auf die zwei Achsrichtungen übertragen. Die Schrittweite der Achsen beträgt minimal 1 mm. Als Schrittmotoren fungieren Antriebe von Diskettenlaufwerken, die mittels Schrittmotorkarten angesteuert werden. Diese sind wiederum über die parallele

Schnittstelle mit dem PC gekoppelt. Über ein Steuerungsprogramm, welches auf dem PC in Pascal implementiert wurde, kann der Versuchsablauf gesteuert werden.

Der Rechner steuert in vorgegebenen Inkrementen die Achsen, so daß die gesamte Bodenfläche des Gutes in Rasterpunkten angefahren wird. An jedem Rasterpunkt wird nach dem Abklingen der Riemenschwingungen eine Messung des Abstandes von der Bodenfläche vorgenommen. Die von der AD-Wandlerkarte gelieferte Abstandsinformation wird zusammen mit den Koordinaten des Punktes in einer Datei abgespeichert. So erhält man eine Datei mit den Rasterpunkten und deren Abstandswerten. Diese Matrix liefert eine dreidimensionale Kontur der Bodenfläche des Stückgutes.

Testgüter und Versuchsreihen

Um einen Aufschluß über die Berührungsflächen der Stückgüter zu erhalten, wurden aus dem vorher beschriebenen Spektrum an Testgütern alle vier beschriebenen Packmittel zum Versuch herangezogen. Zur Ermittlung des Verhaltens der Stückgüter bei Beladung wurden neben der Messung im unbeladenen Zustand drei Beladungsstufen gewählt.

Tab. 2-2. Gewählte Testgüter u. -gewichte

Testgut	Schachtelware	Beutelware
Packstoffe	Wellpappe, einlagig, gefärbt	gestrichenes Papier, weiß
Packmittel	Faltschachtel, 500 x 400 mm Klappdeckelschachtel, 350 x 250 mm Stülpedeckelschachtel, 462 x 340 mm	Flachbeutel, 380 x 300 mm
Packhilfsmittel	Klebstoff	Kunststoffklebeband
Gewichte	leer / 1 / 2 / 3 kg	leer / 0,5 / 1 / 1,5 kg

Versuchsdurchführung und -auswertung

Aus der obenstehenden Tabelle geht hervor, daß insgesamt 16 Bodenkonturen aufgenommen wurden. Jede Bodenkontur wurde im Rasterabstand von 10 x 10 mm vermessen.

Die große Anzahl an Meßwerten, die dabei entstand, wurde mit Makroprogrammen in EXCEL weiterverarbeitet, analysiert und dargestellt.

2.2.2 Rutsche, Gleitebene

Die Ebenheit der Oberfläche der aufgebauten Rutsche spielt eine wesentliche Rolle für das Verhalten der Güter während der Bewegung, da eine "Welligkeit" der Gleitebene zu einer Abweichung des Neigungswinkels der Ebene führt. Dadurch wird die Gutbewegung beschleunigt oder verzögert, wodurch wiederum eine Abweichung der Bahnkurve des Gutes eintritt.

Um den Fehler abschätzen zu können, der durch Neigungsunterschiede eintritt, wurde die Neigung der Rutsche an 16 Rasterpunkten gemessen. Die Meßpunkte (der in Kap. 2.5 beschriebenen Rutsche) lagen im Raster von 1000 mm zueinander, gemessen wurde sowohl die Neigung in Rutschenrichtung als auch die Neigung der Rutsche parallel zur Förderrichtung des Kippschalensorters. Die Neigung der Rutsche wurde (bezogen die Kante am Rutschende) auf 20 Grad eingestellt.

Gemessen wurde mit einer Winkelwasserwaage. Die Auflösung der Wasserwaage liegt bei einer Winkelminute. Die Ergebnisse der Messung finden sich in Kapitel 4.1.1.2.

2.3 Reibungsmessungen

Zur Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Stückgut auf einer Gleitebene muß vor allem das Reibungsverhalten der beteiligten Reibpartner bekannt sein. Aufgrund der Ergebnisse von Vorversuchen war klar, daß der Reibungskoeffizient eines Testgutes nicht konstant sein konnte. Um die Zusammenhänge näher zu untersuchen, wurden Versuche durchgeführt, die die Abhängigkeit der Reibung vom Gewicht des Stückgutes und der Gleitgeschwindigkeit nachweisen sollten.

Versuchsstandsbeschreibung

Um eine geschwindigkeitsabhängige Reibungsmessung durchzuführen, ist es erforderlich, die Stückgüter kontrolliert gleiten zu lassen. Dazu ist eine ebene Gleitstrecke aus Blech bzw. Kunststofftafeln aufgebaut worden, die eine Länge von 9 m hat. Da sich diese Länge nicht ohne Teilung herstellen ließ, wurden die Stoßstellen der verwendeten Stahlblechtafeln gespachtelt und geschliffen.

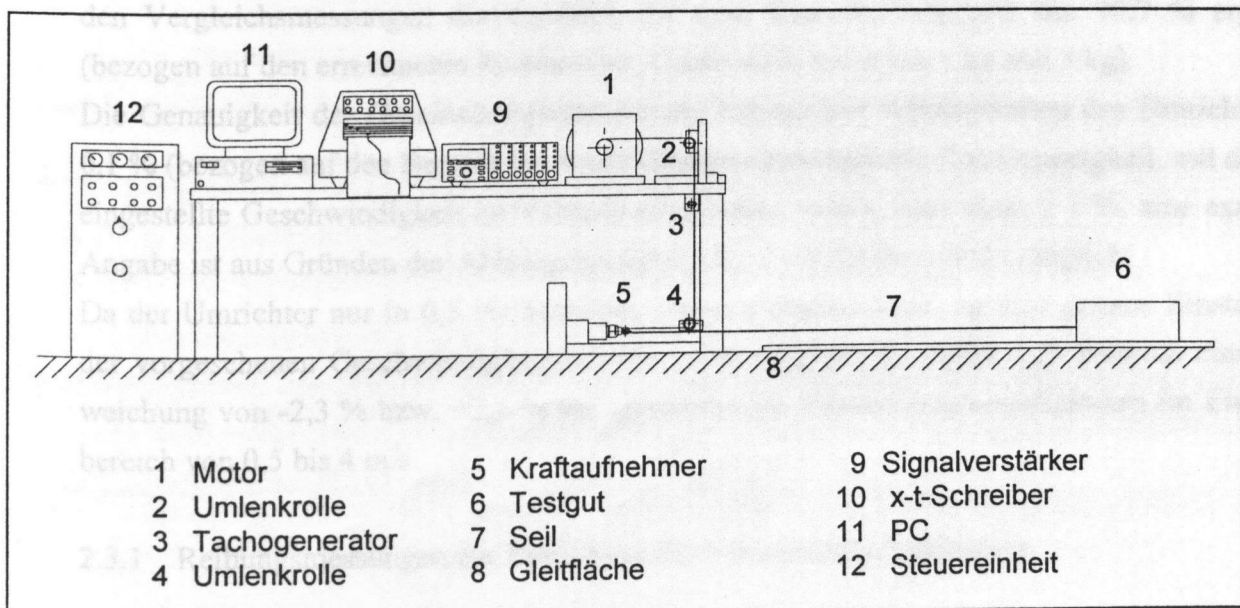
Für den Meßvorgang wird das Gut auf der Gleitstrecke gezogen, um den Rutschvorgang zu simulieren. Die notwendige Zugkraft wird mit einem Kevlarfaden aufgebracht, der über Umlenkrollen von einem Motor auf eine Seiltrommel aufgewickelt wird. Der Motor kann in

Abb. 2-5. Versuchsaufbau



seiner Drehzahl über einen Frequenzumrichter gesteuert werden. Zur Kontrolle der Gleitgeschwindigkeit der Güter ist in die Zugeinrichtung ein Tachogenerator eingebaut, dessen Ausgangsspannung proportional zu seiner Drehzahl ist. Die Drehzahl kann über den Wellendurchmesser des Tachos in die Gleitgeschwindigkeit des Gutes umgerechnet werden.

Abb. 2-6. Skizze des Versuchsaufbaus



Die Zugkraft, die notwendig ist, um das Gut zu ziehen, wird über eine Umlenkrolle von einem DMS-Kraftaufnehmer gemessen. Die Umlenkung des Fadens (s. Abb.) bewirkt, daß die

gemessene Zugkraft dem Doppelten der tatsächlichen Reibungskraft entspricht. Dieser Umstand kommt der Genauigkeit der Kraftmeßeinrichtung zugute; ansonsten hätten noch kleinere Kraftveränderungen gemessen werden müssen. Die Reibung in der Umlenkrolle ist durch eine Kugellagerung sehr klein und kann bei der Messung der Zugkraft unberücksichtigt bleiben.

Über einen Trägerfrequenzmeßverstärker in Vollbrückenschaltung wird die Widerstandsänderung des Kraftaufnehmers in eine proportionale Zugkraft umgerechnet. Dabei wird ein im Verstärker integriertes Bessel-Filter benutzt, um die Seilschwingungen, die sich bei der Beschleunigung des Gutes aus dem Stand (Haftreibungskraft bewirkt Losreißkraft) ergeben, auszufiltern. Den größten Einfluß haben longitudinale Seilschwingungen. Daher wurde nach einigen Versuchen ein Kevlarfaden verwendet, der auf der Länge von 9 m die geringsten Schwingungen ausführte. Da dieser Faden zudem sehr leicht ist und gut vorgespannt werden kann, treten Transversalwellen im Seil kaum auf.

Beide Meßspannungen, vom Tachogenerator als auch vom Meßverstärker, werden auf einem Mehrkanal x-t Schreiber zur Ausgabe gebracht.

Die Linearität der Meßkette für die *Kraftmessung* beträgt im Bereich von 0,2 bis 52,8 N +0,004 % vom Anzeigewert des Meßverstärkers. Da der Kraftaufnehmer von seinem Arbeitsbereich her für höhere Kräfte ausgelegt ist, wurden zur Überprüfung mittels einer geeichten Waage Vergleichsmessungen durchgeführt, die die oben genannte Genauigkeit ergaben. Der Meßverstärker wurde auf eine Absolutwertanzeige in N geeicht, die Anzeige wurde vor jeder Messung wieder auf Null gesetzt. Die Ablesegenauigkeit der Zugkraft am x-t Schreiber liegt je nach Einstellung im ungünstigsten Fall bei $\pm 0,7 \%$, was die Bestimmung des Reibbeiwertes auf mindestens 5/1000 des Ist-Wertes ermöglicht (im Bereich bis $\mu = 0,7$).

Um die Wiederholgenauigkeit der gesamten Meßkette incl. des x-t Schreibers zu testen, wurden Vergleichsmessungen durchgeführt, die eine Reproduzierbarkeit von 99,7 % ergaben (bezogen auf den errechneten Reibbeiwert, Gutgewicht zwischen 1 kg und 3 kg).

Die Genauigkeit der *Geschwindigkeitsmessung* beträgt laut Katalogwerten des Umrichters $\pm 0,1 \%$ (bezogen auf den Bereich bis 4 m/s Gleitgeschwindigkeit). Die Genauigkeit, mit der die eingestellte Geschwindigkeit im Versuch eingehalten wurde, liegt unter $\pm 1 \%$, eine exaktere Angabe ist aus Gründen der Ablesegenauigkeit des x-t Schreibers nicht möglich.

Da der Umrichter nur in 0,5 Hz Schritten verstellt werden kann, ist eine genaue Einstellung der vorgesehenen Geschwindigkeitsschritte nicht möglich. Es ergibt sich dadurch eine Abweichung von -2,3 % bzw. +2,4 % der vorgesehenen Versuchsgeschwindigkeiten im Einstellbereich von 0,5 bis 4 m/s.

2.3.1 Reibungsmessungen zur Ermittlung der Parameterabhängigkeiten

Testgüter und Versuchsreihen

Die verwendeten Stückgüter setzen sich aus den in Kap. 2.1 definierten Testgütern zusammen. Folgendes Gutspektrum wurde benutzt:

Tab. 2-3. Gewählte Testgüter

Testgut-Nr.	Packmittel	Packstoffe	Packhilfsmittel	Maße (mm)
1	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Laschenklebung mit Klebstoff	410 x 310
2	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Papierklebeband	410 x 310
3	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Kunststoffklebeband	410 x 310
4	Stülpedeckelschl.	Schachtelkarton	-	342 x 240
5	Stülpedeckelschl.	Schachtelkarton	Kunststoff-Umreifungs- b. längs	342 x 240
6	Klappdeckelschl.	Wellpappe, einlagig, gefärbt	-	350 x 250
7	Klappdeckelschl.	Chromokarton, bedruckt	-	325 x 290
8	Flachbeutel	Polyethylen (PE)	Kunststoffklebeband	400 x 300
9	Flachbeutel	Polypropylen (PP)	Kunststoffklebeband	280 x 430
10	Flachbeutel	Polyamid (PA)	Kunststoffklebeband	400 x 300
11	Flachbeutel	gestrichenes, weißes Pa- pier	Kunststoffklebeband	380 x 300

Tab. 2-4. Gewählte Testoberflächen

Testoberfl.-Nr.	Oberfläche	Nachbehandlung
1	Feinblech St 12.03	Entfetten, Anschleifen
2	Feinblech St 12.03, lackiert m. Dickschichtenlack KRAUTOL Nr. 5011/707	Anschleifen
3	Kunststoffplattenmaterial, PVC grau	keine

Um für das gewählte Testspektrum Aussagen über die Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten von der Gleitgeschwindigkeit und vom Gewicht der Güter machen zu können, werden die Parameter in Schritten variiert.

Die Gleitgeschwindigkeit der Stückgüter wurde von 0,5 m/s bis auf 3,5 m/s erhöht. Höhere Geschwindigkeiten konnten aus versuchstechnischen Gründen nicht untersucht werden. Die Gewichte wurden von 100 Gramm bis auf 5000 Gramm erhöht. Aufgrund des Leergewichtes der Schachteln wurden diese erst ab 500 Gramm getestet.

Tab. 2-5. Versuchsparmeter

Geschwindigkeit (m/s)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Gewicht (g)	100	500	1000	1500	2000	3000	5000
Variation Nr.	1	2	3	4	5	6	7

Die Gewichte orientieren sich an den in der Praxis der Post und bei Hochleistungssortier- und Verteilanlagen des Versandhandels häufig verwendeten Gewichten [3]. Die Stufung ist unregelmäßig und hat bei den niedrigen Gewichten eine höhere Auflösung, da dort der größte Einfluß auf den Reibungsbeiwert zu vermuten ist.

Versuchsdurchführung und -auswertung

Alle oben beschriebenen Stückgüter wurden den Versuchen unterworfen. Für jede Testreihe auf einer Oberfläche wurde ein neues, unbenutztes Gut verwendet. Gestartet wurde mit der Oberfläche 1, es folgten 2 und 3. Bei den Gewichten wurde mit dem leichtesten Gewicht der Reihe begonnen. Dann wurde mit diesem Gewicht jede Geschwindigkeitsstufe gefahren, beginnend mit der niedrigsten Geschwindigkeit. Danach wurde das Gewicht erhöht usw., bis alle Variationen getestet waren. Es folgte die nächste Oberfläche. Es wurden somit insgesamt 1617 Versuche durchgeführt.

Die Beladung der Schachtel- und Beutelware geschah durch Blechpakete auf einer einlagigen Wellpappenunterlage. Die Bleche nahmen etwa $\frac{2}{3}$ der Grundfläche des Gutbodens ein. Das Gewicht wurde mit seinem Schwerpunkt in den Flächenschwerpunkt des Gutbodens positioniert. Es wurden fixe Gewichte gewählt (unabhängig von der eingesetzten Schachtelgröße) weil es aufgrund der unkalkulierbaren Ausprägung von Berührungsflächen am Schachtelboden unmöglich ist, bei allen Gütern mit gleichen Flächenpressungsstufen zu arbeiten.

Die verwendete Gleitfläche war sehr eben, da sie auf einem präzisen Estrichboden lag. Dadurch war auch keine Durchbiegung der Oberfläche möglich. Um die Versuche für die Praxis relevant zu halten, wurde nur ein Teil der Grundfläche des Bodens belastet, da in der Realität die Waren in der Umverpackung durch Packmittelzugaben geschützt werden und somit nur einen Teil des Bodens belasten. Damit sich die Belastung besser auf den Boden verteilt, wurden die starren Bleche auf einer einlagigen Wellpappenunterlage fixiert. Diese Maßnahme sorgt ebenfalls für praxisnähere Versuchsbedingungen.

Vor jedem Start des Versuches wurde der abgewickelte Faden soweit es möglich war, gestrafft. Der Faden berührte zu keiner Zeit des Versuchslaufes den Boden.

Zwischen jeder Gewichtsstufe wurde die Gleitfläche mit einem trockenen, fettfreien und nicht fuselnden Tuch vom Abriebstaub gereinigt.

Während der Versuche lag die rel. Luftfeuchtigkeit zwischen 48 % und 65 %, die Temperatur lag zwischen 18 °C und 22 °C. Diese Werte beziehen sich auf die Schwankungen während mehrerer Tage, die Testgüter wurden im selben Klima gelagert.

Die Auswertung der Meßschiebe und deren Übernahme in den PC geschah manuell durch Eintragung in eine EXCEL-Umrechnungstabelle. Dort wurden die Schreibereinheiten und -einstellungen automatisch in die dazugehörigen Reibungskoeffizienten umgerechnet, damit manuelle Übertragungsfehler minimal blieben.

2.3.2 Reibungsmessungen zur Abschätzung des Luftströmungseinflusses auf die Reibung

Die verwendeten Stückgüter setzen sich aus den in Kap. 2.1 definierten Testgütern zusammen. Die Versuche sind in zwei Reihen mit unterschiedlichen Zielsetzungen zu unterteilen, die *erste Reihe* dient dazu, zu überprüfen, inwieweit die *Reibungskraft unabhängig ist von der Berührungsfläche* zwischen Gutboden und Gleitfläche.

Die *zweite Versuchsreihe* dient dazu, zu überprüfen, wie *Luftströmungsverhältnisse am Gut die gemessenen Reibkraftwerte beeinflussen* können.

Reihe 1, Testgüter und Versuchsreihen

Um zu überprüfen, wie die Berührungsfläche zwischen den Reibpartnern auf den Reibungskoeffizienten Einfluß nimmt, wurde eine Testreihe durchgeführt, die bei ansonsten konstant gehaltenen Parametern nur die Schachtelgröße variiert. Dabei wurde versucht, die Stirnfläche der Testgüter möglichst für alle Güter gleich groß zu halten.

Die Schachteln bestanden alle aus demselben Packstoff, das Gewicht der Schachteln lag bei allen Versuchen bei 1,5 kg. Die Testoberfläche war immer Oberfläche Nr. 3, Feinblech lackiert. Es wurden alle Geschwindigkeitsvarianten aus Tab. 2-5. gefahren.

Tab. 2-6. Gewählte Testgüter

Testgut-Nr.	Packmittel	Packstoffe	Packhilfsmittel	Schachtelmaße (mm)
1	Stülpdeckelschl.	Schachtelkarton	-	342 x 240 x 132
2	Stülpdeckelschl.	Schachtelkarton	-	462 x 340 x 172
3	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Laschenklebung mit Klebstoff	330 x 250 x 172
4	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Laschenklebung mit Klebstoff	410 x 310 x 132
5	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Laschenklebung mit Klebstoff	500 x 400 x 200

Reihe 1, Versuchsdurchführung und -auswertung

Es wurden alle Testgüter der Reihe nach mit allen in Tab. 2-5. genannten Geschwindigkeitsstufen getestet. Dabei gelten die gleichen Versuchsbedingungen, wie sie für den Abschnitt 2.3.1 geschildert wurden.

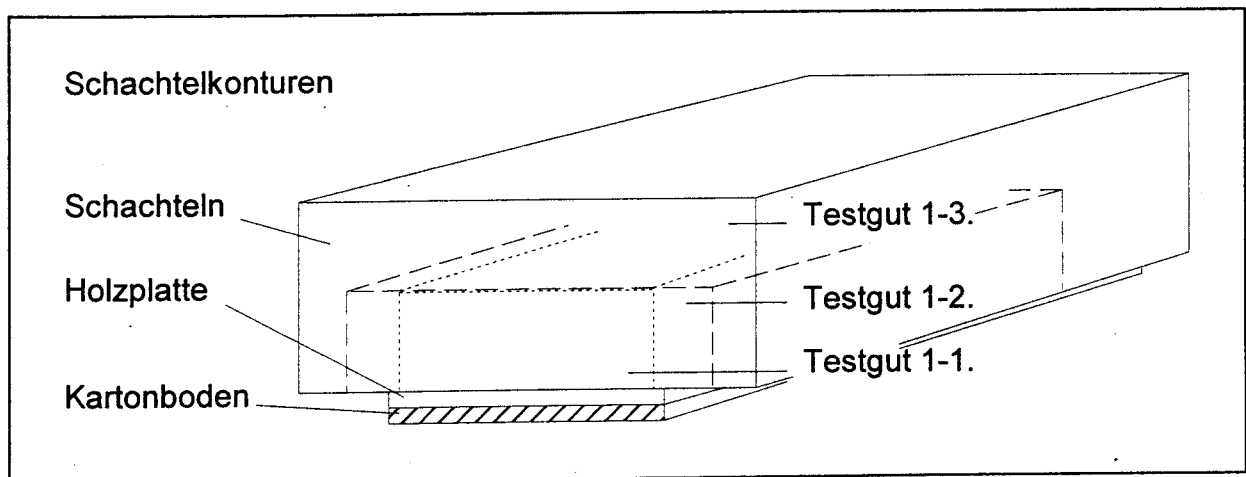
Während der Versuche lag die rel. Luftfeuchtigkeit bei 38 %, die Temperatur lag bei 20 °C.

Reihe 2, Testgüter und Versuchsreihen

Die Versuchsreihe zur Bestimmung des Luftströmungseinflusses auf den Reibungskoeffizienten läßt sich in zwei Teile gliedern. Der erste Teil untersucht den Einfluß der Größe der Stirnfläche auf die gemessene Zugkraft, der zweite Teil untersucht den Einfluß der Bodenfläche des Gutes auf die Zugkraft.

Für die Durchführung des *ersten Teils* wurden verschiedene Schachtelgrößen auf die gleiche Grundfläche aufgesetzt. Als Grundfläche diente eine mehrschichtige Sperrholzplatte, auf die ganzflächig eine ebene Schachtelkartonfläche (Dicke 2 mm) aufgeklebt wurde. Somit war die Gleitfläche für die getesteten Güter bei allen Versuchsläufen gleich.

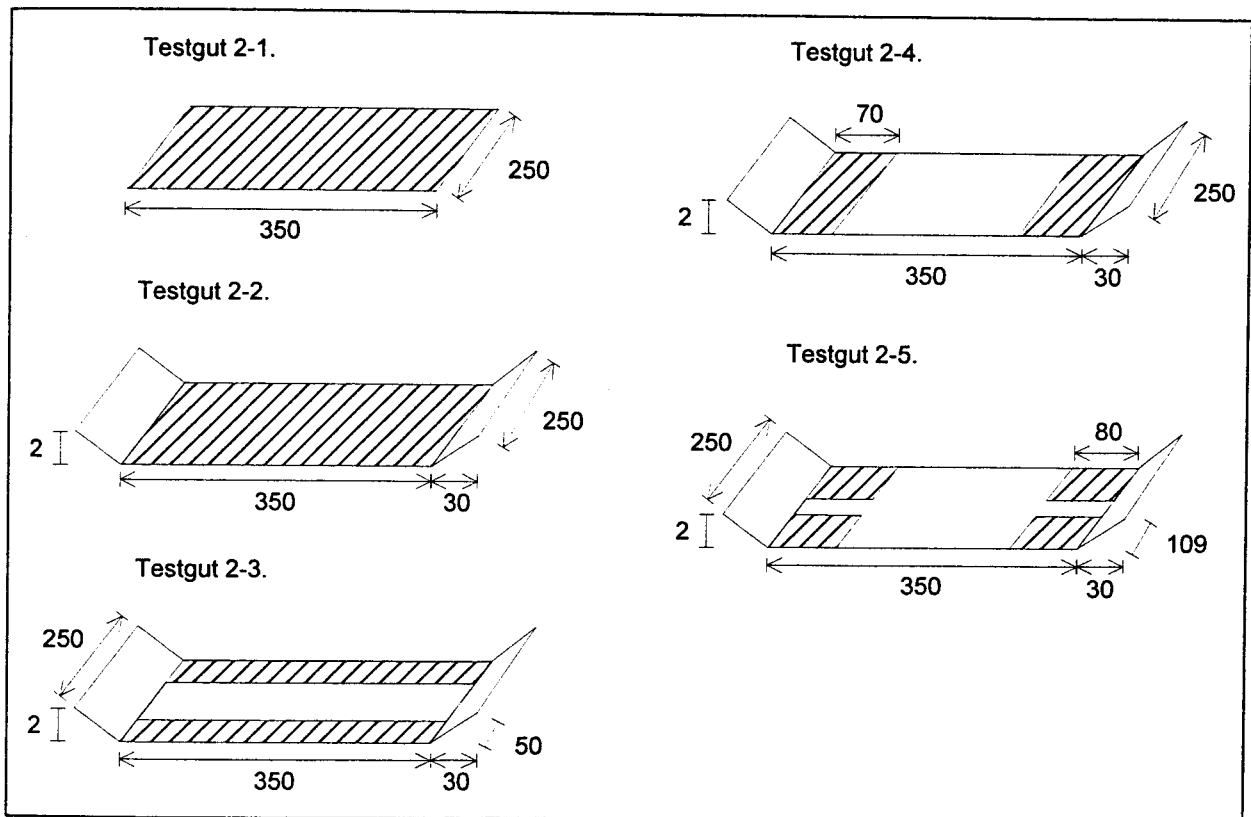
Abb. 2-7. Skizze der Testgüter 1, Maße und Aufbau siehe auch Tab. 2-7



Das Gewicht der Schachteln lag bei allen Versuchen bei 1,5 kg. Die Testoberfläche war immer Oberfläche Nr. 2, Feinblech lackiert. Es wurden alle Geschwindigkeitsvarianten aus Tab. 2-5. gefahren.

Für die Durchführung des *zweiten Teils* wurden fünf verschiedene Bodenkonturen auf fünf gleich große, mehrschichtige Sperrholzplatten aufgeklebt. Die Bodenkonturen wurden ebenfalls aus Schachtelkarton (Dicke 2 mm) gefertigt. Die Gleitflächen der Bodenkonturen hatten mit Ausnahme der ebenen, vollflächigen Böden alle die *gleiche Gesamtfläche*.

Abb. 2-8. Skizze der Testgüter 2, Berührflächen schraffiert, siehe auch Tab. 2-7



Es wurde immer die gleiche Schachtel verwendet, Größe 410 x 310 x 132 mm. Das Gewicht der Schachtel lag bei allen Versuchen bei 1,5 kg. Die Testoberfläche war immer Oberfläche Nr. 2, Feinblech lackiert. Es wurden alle Geschwindigkeitsvarianten aus Tab. 2-5. gefahren.

Tab. 2-7. Gewählte Testgüter

Testgut-Nr.	Schachtelmaße (mm)	Gleitfläche	Kontur	Berührfläche, Maße (mm)
1 - 1.	342 x 240 x 132	Schachtelkarton	eben	350 x 250
1 - 2.	410 x 310 x 132	Schachtelkarton	eben	350 x 250
1 - 3.	500 x 400 x 200	Schachtelkarton	eben	350 x 250
2 - 1.	410 x 310 x 132	Schachtelkarton	eben	350 x 250
2 - 2.	410 x 310 x 132	Schachtelkarton	eben, m. Einlauf	350 x 250
2 - 3.	410 x 310 x 132	Schachtelkarton	zwei Längsflächen	2 x 50 x 350
2 - 4.	410 x 310 x 132	Schachtelkarton	zwei Querflächen	2 x 70 x 250
2 - 5.	410 x 310 x 132	Schachtelkarton	vier Eckenflächen	4 x 80 x 109

Die Testgüter 2-2. bis 2-5. haben eine Ein- und Auslaufkante von 30 x 250 mm quer über die Bodenbreite. Die Höhe der Kante beträgt 2 mm. Mit dieser Maßnahme soll eine Unterstüzung des Strömungseffektes unterhalb des Gutbodens erreicht werden (siehe Erläuterung Kap. 3.1).

Reihe 2, Versuchsdurchführung und -auswertung

Es wurden alle Testgüter der Reihe nach mit allen in Tab. 2-5. genannten Geschwindigkeitsstufen getestet. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt, um eine Konstanz und Sicherheit der Meßwerte zu erreichen. Dabei gelten die gleichen Versuchsbedingungen, wie sie für den Abschnitt 2.3.1 geschildert werden.

Während der Versuche lag die rel. Luftfeuchtigkeit bei 38 %, die Temperatur lag bei 20 °C.

2.4 Lage der Güter auf dem Kippschalenelement

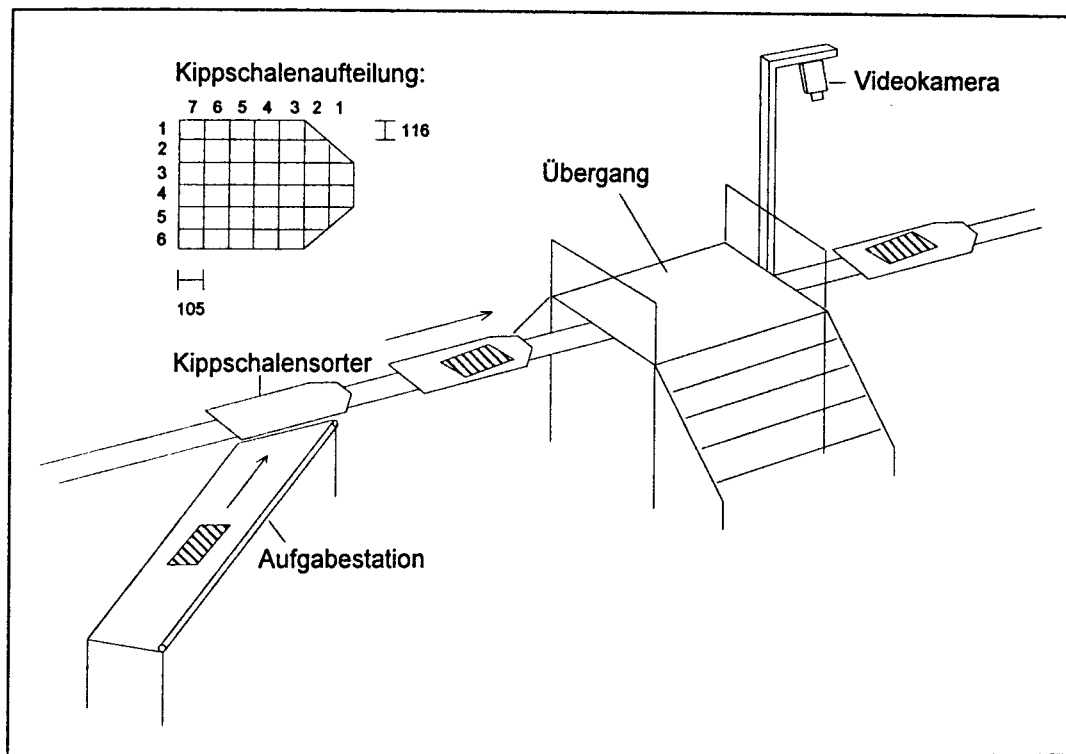
Bei Versuchen mit einem Kippschalensorter ist es wichtig zu wissen, wie die Güter nach dem Aufgeben auf das Schalenelement positioniert sind. Aufgrund der passiven, reibungsbehafteten Technik des Schalenelementes ist es nicht möglich, die Lage des Gutes genau in den Flächenschwerpunkt der Kippschale zu bringen. Nur bei aktiven Sorterelementen, wie beispielsweise beim Quergurtsorter kann genau positioniert werden.

Die ungenaue Lage des Gutes läßt jedoch keine genaue Berechnung der Abwurfkurve zu. Um die Wahrscheinlichkeit der Lage eines Gutes um den gewünschten Aufgabepunkt näherungsweise bestimmen zu können, wurde die folgende Untersuchung durchgeführt.

Versuchsstandsbeschreibung

Es wurde oberhalb eines Kippschalensorter-Kreislaufs (Fa. Kosan Crisplant, Retourensorter der Fa. Otto-Versand, Hamburg) eine Video-Kamera so angebracht, daß jeweils eine der umlaufenden Kippschalen ins Bild gebracht werden konnte. Alle Schalen liefen unter der Kamera durch. Somit konnten die auf den Schalenelementen liegenden Packstücke genau beobachtet werden. Der Beobachtungspunkt lag direkt hinter den vier automatischen Eingabestrecken, so daß die Lage der Güter auf dem Sorter durch Kurvenstücke nicht beeinflußt werden konnte. Der Sorter lief mit einer Geschwindigkeit von 1,4 m/s.

Abb. 2-9. Skizze des Versuchsaufbaus



Testgüter und Versuchsreihen

Der Retourensorter verteilt nur Kunststoff-Beutelware bis zu einer Größe von etwa 400 x 300 mm, in denen flache Textilien eingepackt sind.

Versuchsdurchführung und -auswertung

Es wurde aus den erstellten Aufnahmen ein Beobachtungszeitraum von 20'24'' min ausgewertet. Die Auswertung geschah in Einzelbildschaltung auf einem U-Matic Videorekorder. Die Kippschale wurde in ein Koordinatensystem mit 7 x 6 Feldern unterteilt, (siehe Abb. 2-9.) jedes Feld in Förderrichtung hatte die Größe von 105 mm, jedes Feld quer zur Förderrichtung die Größe von 116 mm. Aufgrund dieser Einteilung wurde dem Flächenschwerpunkt des Gutes der zugehörige Koordinatenabschnitt zugeteilt. Die Auswertung wurde durch die feste Einteilung der Kippschale mit Querleisten, die auf der Schale befestigt sind, erleichtert. Es wurden insgesamt 1354 belegte Kippschalen ausgewertet.

2.5 Ermittlung der Bahnkurven auf ebener Rutsche

2.5.1 Vorversuche Kippschalensorter

Um die Auslegung von Endstellenrutschen an Hochleistungssortier- und Verteilanlagen anhand von Kennwerten zu ermöglichen, wurden mit einem definierten Testgüterspektrum Versuche durchgeführt. Dabei sollten sowohl Erkenntnisse zur Endstellenbreite als auch

Erkenntnisse zum Neigungswinkel der Rutsche, Offset des Abwurfpunktes, Gutgeschwindigkeit und Gutverhalten gesammelt werden. Es wurden zwei verschiedene Kippschalenelemente auf ihr Abwurfverhalten untersucht und miteinander verglichen. Weiterhin sollte untersucht werden, inwieweit das eingesetzte Auswertungsverfahren für Bahnkurvenanalysen an Stückgütern tauglich ist.

Versuchsstandsbeschreibung

Der Versuchsstand besteht aus einem Elektrohängebahnfahrwerk, das für den Versuch als Trägerfahrzeug für die zwei verschiedenen Sorterelemente dient. Mittels einer geraden C-Profil Schiene, die an Stützen aufgeständert ist, wurde eine Strecke aufgebaut, die es ermöglicht, mit den Sorterelementen Geschwindigkeiten bis zu 2,5 m/s zu erreichen. Das Fahrzeug wird mit einem Frequenzumrichter gesteuert, der es erlaubt, neben der Höchstgeschwindigkeit auch das Beschleunigungs- und Bremsverhalten des Fahrzeuges vorzugeben.

Mit mechanischen Tastern und einer Schützschaltung kann das Fahrzeug automatisch einen Fahrzyklus fahren. Ein Fahrzyklus besteht in der Beschleunigung des Fahrzeuges bis auf die eingestellte Höchstgeschwindigkeit, Halten der Geschwindigkeit und anschließender Bremsung des Fahrzeugs bis zum Stillstand. Danach wird rückwärts gefahren und am Anfang der Strecke wieder angehalten, damit das Fahrzeug wieder für einen neuen Fahrzyklus bereitsteht.

Abb. 2-10. Bild des Versuchsaufbaus

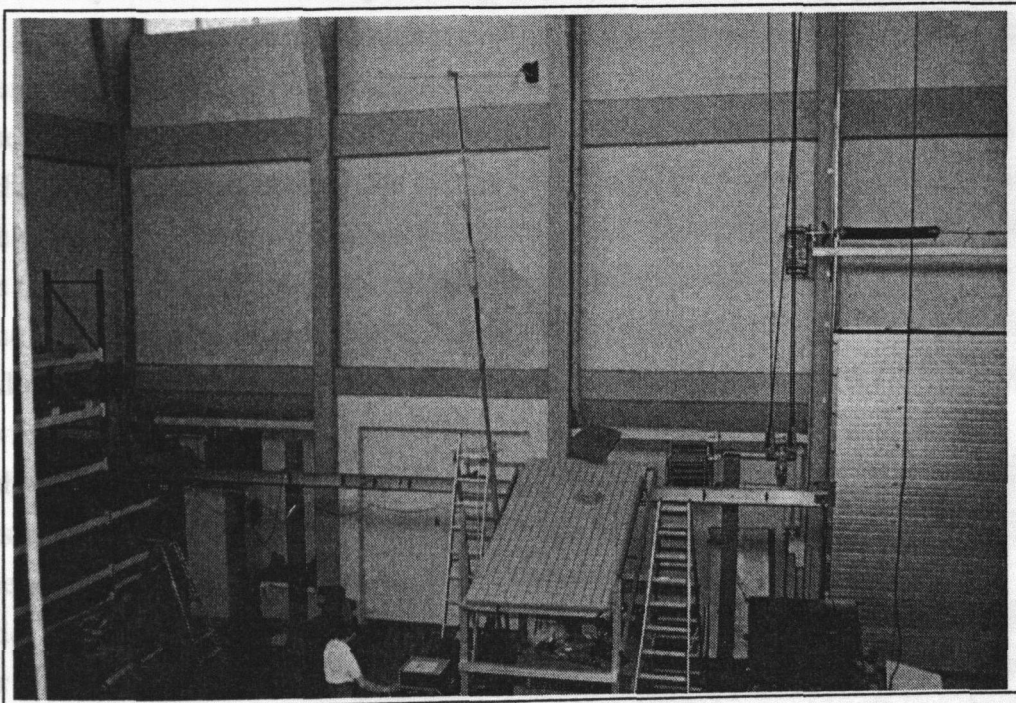
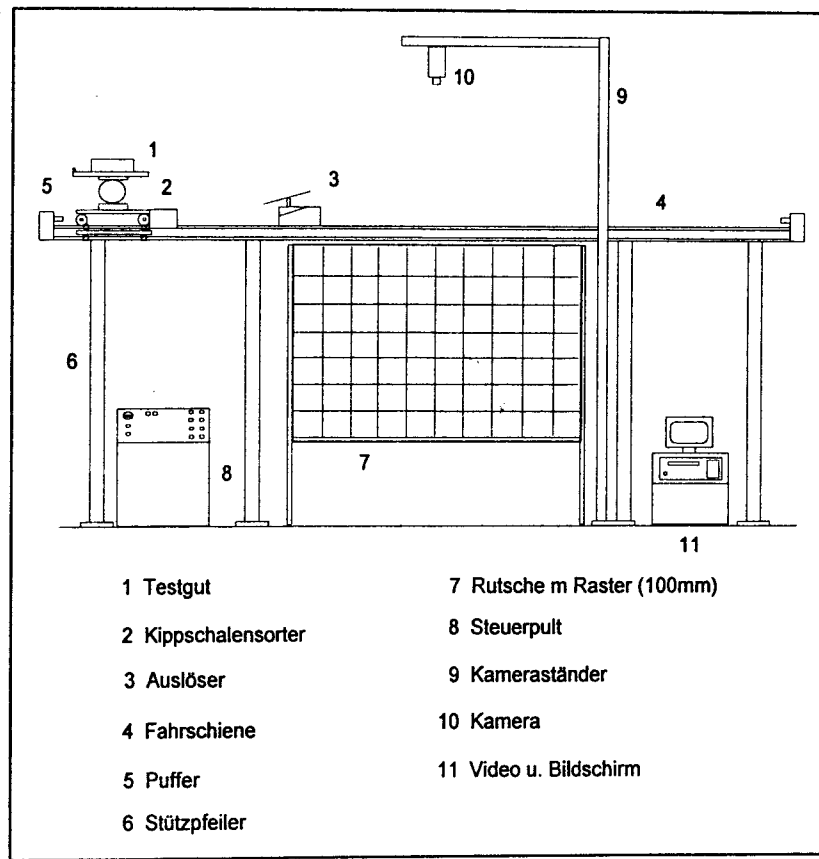


Abb. 2-11. Skizze des Versuchsaufbaus



Vor jedem Fahrzyklus wird das Testgut mittig auf dem Sorterelement plaziert. Der Abwurf des Gutes geschieht, nachdem das Fahrzeug seine Vollbeharrungsgeschwindigkeit erreicht hat. Mit einer mechanischen Auslösevorrichtung, die vom Sorterhersteller passend zum Sorterelement konstruiert wurde, wird das Gut in die Endstellenrutsche abgegeben. Auf der Rückwärtsfahrt des Fahrzeuges wird das Sorterelement wieder in seine Ausgangsposition gebracht. Die eingestellte Geschwindigkeit weicht aufgrund der technischen Möglichkeiten des Umrichters (0,5 Hz-Schritte) um bis zu 0,4 % von den Sollwerten ab.

Die Rutsche besteht aus einer einteiligen, 1,5 m x 3 m großen Blechtafel, die in einem Rahmen aus Alustrangpreßprofilen befestigt ist. Über eine Verstellung kann das Blech in seinem Neigungswinkel eingestellt werden.

Die Aufnahme der Versuche geschieht über einen Video-8-CamCorder, der an einem 7 m langen Ausleger über der Rutsche fixiert ist. Die optische Achse der Kamera ist orthogonal zur Rutschenebene ausgerichtet und geht durch den Flächenschwerpunkt der Rutsche.

Das Bild der Videokamera wird direkt an einen U-Matic Videorekorder weitergegeben, der (wegen der besseren Qualität des Standbildes) die Aufzeichnung vornimmt. Die Bildfrequenz liegt aufgrund der Videonorm bei 50 Hz. Da aufgrund der niedrigen Rate mit Ungenauigkeiten bei der Auswertung der Einzelbilder zu rechnen ist, wird die High-Speed Video-Shutter Einrichtung der Videokamera benutzt (Belichtungszeit 1/250 s).

Testgüter und Versuchsreihen

Als Testoberfläche wurde die Oberfläche Nr. 2 getestet, Feinblech lackiert mit Dickschichtenlack.

Die verwendeten Testgüter gehen aus der untenstehenden Aufstellung hervor.

Tab. 2-8. Testgüter Vorversuch Kippschalensorter

Testgut-Nr.	Packmittel	Packstoffe	Gewicht (g)	Maße (mm)
1	Klappdeckelschl.	Wellpappe, einlagig, gefärbt	490	250 x 175
2	Klappdeckelschl.	Wellpappe, einlagig, gefärbt	1075	350 x 250
3	Klappdeckelschl.	Wellpappe, einlagig, gefärbt	2025	500 x 300
4	Flachbeutel	Polyamid (PA)	100	300 x 200
5	Flachbeutel	Polyamid (PA)	145	420 x 220
6	Flachbeutel	Polyamid (PA)	430	400 x 300
7	Flachbeutel	Polyamid (PA)	1360	600 x 370

Alle Güter hatten feste Gewichte, im Fall der Flachbeutel wurden Textilien als Inhalt verwendet. Dadurch wurde eine besondere Praxisnähe erreicht. Die Schachteln bestanden ausschließlich aus Postpaketen verschiedener Größen.

Als Schalenmechanismus wurden *zwei verschiedene Bauarten von Kippschalen* verwendet, um einen Vergleich der Abwurfkinematiken anzustellen. Alle Testreihen wurden mit beiden Typen durchgeführt.

Der *erste Kippschalentyp* hat eine konventionelle Kinematik; die Abkippbewegung erfolgt um die Achse der Bewegungsrichtung, das Gut wird senkrecht zur Sorterbewegung ausgeworfen. Der Abkippwinkel der Schale liegt bei 30 Grad.

Der *zweite Kippschalentyp* kippt in der gleichen Weise wie der erste Typ (um 25 Grad), gleichzeitig wird dazu eine Drehbewegung (von 10 Grad) um die Hochachse der Schale durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine diagonal vorwärtsgerichtete Abkippbewegung in die Endstelle.

Tab. 2-9. Testreihen Vorversuch Kippschalensorter

Sortergeschwindigkeit (m/s)	1,3	1,5	1,7	1,9
Anstellwinkel Rutsche (Grad)	0	15	20	25
Sortertyp	1	2		
Variation Nr.	1	2	3	4

Jede Testvariation wurde dreimal wiederholt, um eine größere Sicherheit der Ergebnisse zu erzielen. Daraus ergaben sich insgesamt 672 Versuchsläufe.

Versuchsdurchführung und -auswertung

Um die Bahnkurve ermitteln zu können, wurde auf die gesamte Rutsche ein Koordinatennetz aufgezeichnet. Jeder Rasterpunkt lag in einem Abstand von 100 mm in vertikaler und in horizontaler Richtung. Das aufgezeichnete Raster beeinflusste die Rutschbewegung der Güter nicht.

Bei der Wiedergabe der Bilder im Einzelbildmodus wurde gezählt, welcher Rasterpunkt bei welcher Bildnummer verdeckt wird. Bezugspunkt dafür war die Vorderkante des Stückgutes. Dadurch wurde die Weg- und Zeitinformation der Bahnkurve bestimmt.

Der Offset der Weiche wurde innerhalb einer Variation nicht verstellt. Jede Verstellung des Abwurffoffsets zwischen den Variationen wird in der späteren Auswertung rückgerechnet, damit ein einheitlicher Bezugspunkt existiert.

Dieses Auswerteverfahren erlaubt allerdings nur eine begrenzte Auflösung der Bahnkurve, da der Rasterabstand groß ist. Mittels Interpolationsverfahren kann jedoch bei einer ausreichenden Anzahl von Versuchen eine Glattheit der Kurve erzielt werden. Der Aufwand, Bild für Bild manuell die Koordinaten des Stückgutes zu ermitteln und dem PC zu übergeben, ist sehr hoch und für umfangreichere Versuchsreihen nicht akzeptabel.

2.5.2 Hauptversuche Kippschalensorter

Für die Hauptversuche auf der ebenen Rutsche wurden die Erfahrungen des Vorversuchs in Verbesserungen des Versuchsstandes umgesetzt. In vielen Punkten blieb der Aufbau des Versuchsstandes jedoch gleich. Daher gelten die Aussagen zum Vorversuch auch für diesen Versuch, wenn keine anderslautende Beschreibung vorliegt.

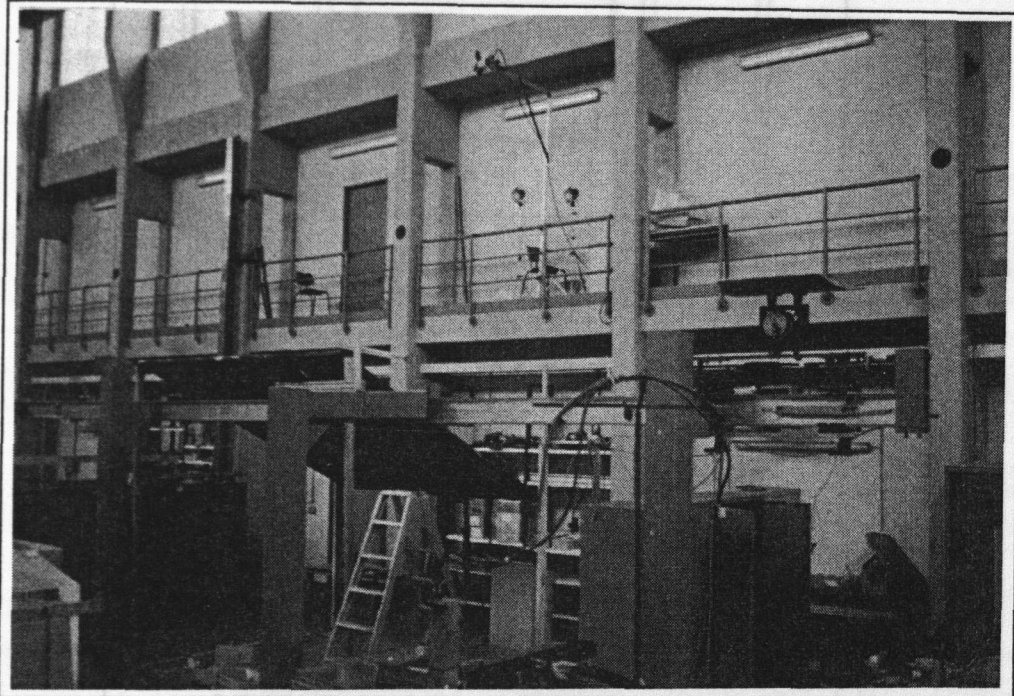
Ziel der Versuche ist es, möglichst genaue Aussagen über die Bahnkurven der Testgüter zu erhalten, um diese mit den Berechnungen auf Basis des Modells (vgl. Kap. 3) zu vergleichen. Um möglichst schnell viele Versuche durchführen zu können und anschließend mit hoher Genauigkeit zu analysieren, wurde ein PC-gestütztes Bildverarbeitungssystem auf Basis einer am IML vorhandenen Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt.

Versuchsstandsbeschreibung

Der Versuchsstand bestand wie in 2.5.1 aus einer Hängebahn, die mit einem konventionellen Kippschalenelement (Tab. 2.9, Typ 1) bestückt war. Abweichend zum vorhergehenden Versuch wurde eine Rutsche der Größe 3 m x 3 m verwendet. Sie wurde aus zwei 2 mm starken Blechtafeln der Größe 3 m x 1,5 m gebildet. Die Trennfuge verläuft quer zur Rutschrichtung und wurde mit Metallspachtel geschlossen und plangeschliffen. Um zu vermeiden, daß sich die Gleitebene durchbiegt (vgl. Messungen Kap. 4.1.1.2), wurden die Blechtafeln rückseitig

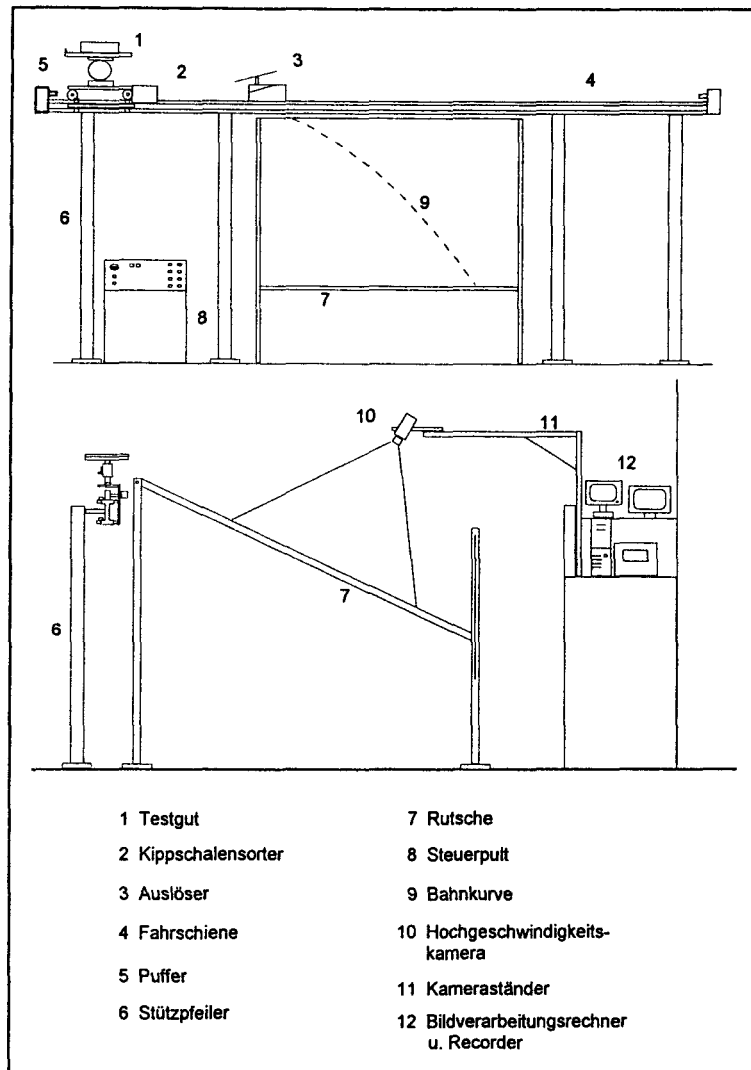
mit Verstrebungen aus Aluminiumstrangpreßprofilen gestützt. Diese waren wiederum in einem Rahmen aus Vierkantrohr-Profilen fixiert.

Abb. 2-12. Bild des Versuchsaufbaus



Die Erfassung der Stückgutbewegung geschah über eine Hochgeschwindigkeitskamera mit Bildauswertung, die von einem PC gesteuert wurde. Die Kamera ermöglicht Auswertungen bis zu 1000 Bilder pro Sekunde. In den Versuchen erwies sich eine Bildfrequenz von 125 Bildern pro Sekunde als ausreichend.

Abb. 2-13. Skizze des Versuchsaufbaus

Testgüter und Versuchsreihen

Für den Versuch wurden folgende Testgüter aus dem Testdeck benutzt:

Tab. 2-10. Testgüter Hauptversuch Kippschalensorter

Testgut-Nr.	Packmittel	Packstoffe	Packhilfsmittel	Maße (mm)
1	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Kunststoffklebeband	410 x 310
2	Stülpedeckelschl.	Schachtelkarton	-	342 x 240
3	Klappdeckelschl.	Wellpappe, einlagig, gefärbt	-	350 x 250
4	Flachbeutel	Polyethylen (PE)	Kunststoffklebeband	400 x 300
5	Flachbeutel	Polyamid (PA)	Kunststoffklebeband	400 x 300
6	Flachbeutel	gestrichenes, weißes Papier	Kunststoffklebeband	380 x 300

Die Testoberfläche war Feinblech lackiert, Oberflächen-Nr. 2.

Die getesteten Parameter der Versuche waren:

Tab. 2-11. Versuchsp Parameter Hauptversuch Kippschalensorter

Gewicht Kartonware (g)	1000	2000	3000
Gewicht Beutelware (g)	100	500	1000
Sortergeschwindigkeit (m/s)	1,5	1,7	1,9
Anstellwinkel Rutsche (Grad)	15	20	25
Variation Nr.	1	2	3

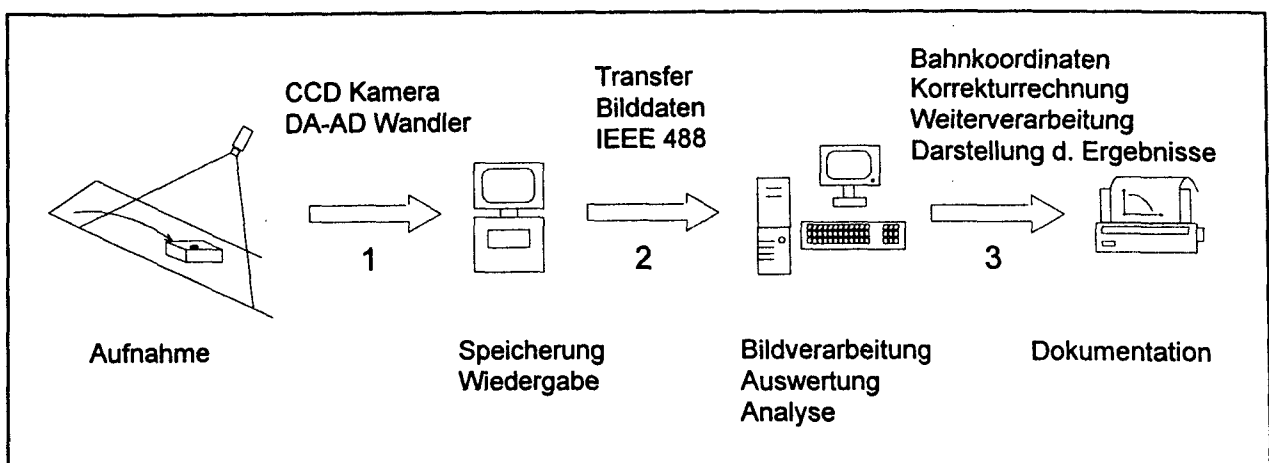
Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Parameter wurden entsprechend der Reihenfolge in der Tabelle 2-11. variiert. Erst wurden die Gewichte variiert, danach eine höhere Geschwindigkeit eingestellt, wieder alle Gewichtsstufen variiert usw., bis alle Varianten mit allen Testgütern einmal getestet waren. Daraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von 162 ermittelten Bahnkurven.

Alle Versuche wurden auf dem Videoband des Rekorders gespeichert. Die Auswertung jedes einzelnen Versuchs und die Umsetzung der gefilmten Bahnkurve in Bahnkoordinaten geschah durch ein Bildverarbeitungsprogramm, welches für diesen Einsatzfall entwickelt wurde.

Nach verschiedenen Überlegungen, die aus den Vorversuchen entwickelt wurden, fiel die Entscheidung auf eine Verfolgung des Stückgutes mit Hilfe einer *optischen Markierung*. Diese optische Markierung sollte leicht herzustellen sein und das Gutverhalten nicht beeinflussen. Daher wurde ein einfacher, 130 mm großer Punkt aus schwarzem Photokarton gewählt, der in der Mitte der Oberfläche jedes Testgutes fixiert wurde.

Abb. 2-14. Ablauf der Bildauswertung



Um für eine Bildverarbeitung des Versuchslaufes einen guten Kontrast zwischen der Rutsche und dem bewegten Stückgut zu erzielen, wurden alle im Bild befindlichen Teile der Rutsche mit Dickschichtenlack gestrichen. Die Stückgüter selbst wurden an ihrer Oberseite weiß lackiert. So war es für das Bildverarbeitungsprogramm möglich, den schwarzen, bewegten Punkt auf einem nahezu weißen Hintergrund zu verfolgen.

Der Rekorder der Hochgeschwindigkeitskamera gibt die Aufzeichnung des Versuchs mittels 16 Videospuren wieder. Die Spuren werden über 16 AD-Wandler in eine Pixelinformation rückgewandelt. Das Aufzeichnungsfeld hat 239 x 192 Pixel, jedes Pixel kann eine Graustufeninformation von 256 Graustufen darstellen.

Somit ergeben sich pro aufgezeichnetem Bild rund 46 kByte Daten, die mittels eines Transferprogramms über eine Kommunikationskarte mit IEEE 488 Schnittstelle an einen PC weitergegeben werden. Dort wird mittels des Transferprogramms die gesamte Bildinformation eines Versuches auf Festplatte gespeichert. Die Ansteuerung der gesamten Hochgeschwindigkeitskamera wird ebenfalls vom PC aus realisiert. Somit kann der PC den gesamten Transfervorgang Bild für Bild steuern, bis alle Bilder übertragen sind.

Anschließend geschieht der eigentliche Auswertungsvorgang. Das Unterverzeichnis, in dem alle Bilder gespeichert wurden, wird Bilddatei für Bilddatei nach der Lage des markanten schwarzen Punktes analysiert. Aufgrund der Graustufeninformation der einzelnen Pixel werden die Pixel gefunden, die unterhalb eines (einstellbaren) Schwellwertes für "Schwarz" liegen. Aus diesen können für den schwarzen Punkt der Flächenschwerpunkt und seine Koordinaten ermittelt werden. Mittels der Referenzmaße (die vorher in das Programm eingegeben wurden) kann der Rechner die Pixelkoordinaten sofort in Originalkoordinaten umrechnen. Dieser Wert wird zusammen mit der Aufnahmezeitdauer in eine Datei geschrieben. Auf diese Art und Weise wird der gesamte Versuch Bild für Bild abgearbeitet und analysiert. Daraus ergibt sich für jeden Versuch eine *Datei mit den Bahnkoordinaten der Stückgutbewegung*, bezogen auf den Schwerpunkt des Stückgutes.

Zu erwähnen ist noch, daß verschiedene Darstellungsmöglichkeiten direkt über das Programm zur Verfügung stehen. So können z.B. alle Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramme der Gutbewegung sofort nach der Auswertung dargestellt werden. Dabei werden die Meßwerte über eine Interpolation bei Bedarf auch als geglättete Kurven angezeigt.

2.6 Ermittlung der Bahnkurven bei ebener, gerader Rutsche mit Begrenzung durch seitliche Überhöhung

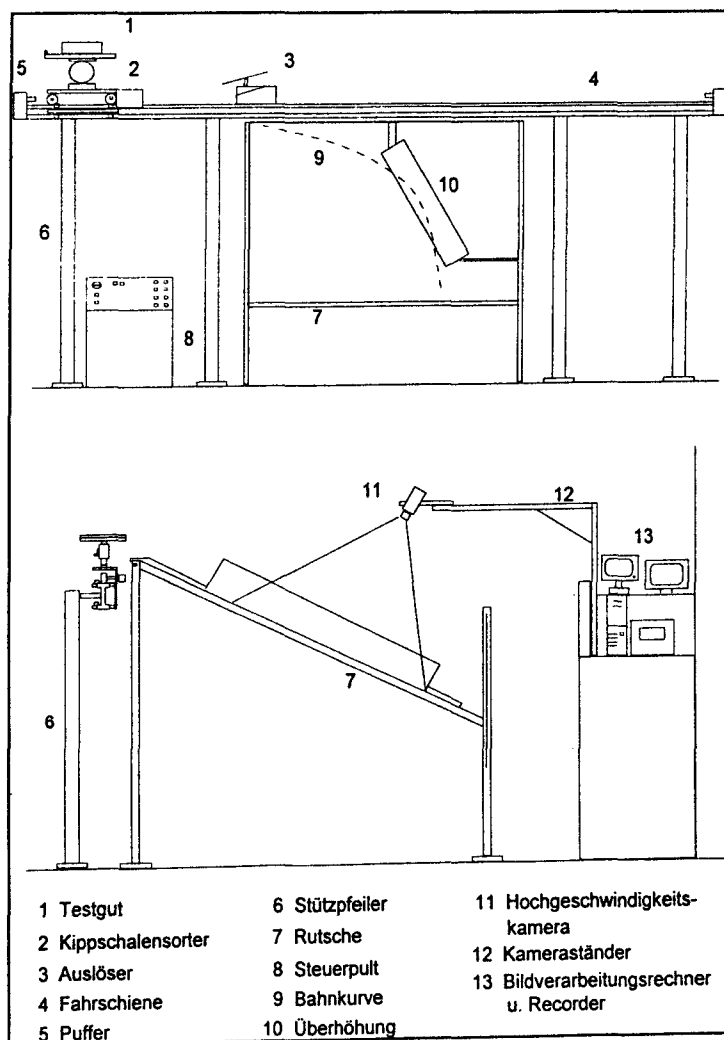
Die Versuche mit Begrenzung der Gleitebene durch eine seitliche Überhöhung wurden in der gleichen Art und Weise durchgeführt, wie die Versuche unter Punkt 2.5.2. Als Versuchsstand wurde der gleiche Aufbau wie dort beschrieben eingesetzt. Abweichungen dazu werden im folgenden beschrieben.

Versuchsstandbeschreibung

Der Versuchsstand und die Meßeinrichtung ist die gleiche, wie in 2.5.2 beschrieben wurde. Es wurde lediglich eine seitliche Überhöhung (mit konstantem Radius von 325 mm) montiert, so daß die abgeworfenen Güter durch die Überhöhung in Richtung der Endstelle umgelenkt werden. Diese Rinne ist in der Nähe des Sorters drehbar fixiert und kann zu beiden Seiten der Hauptgefällrichtung geschwenkt werden, um verschiedene Auslegungswinkel zu testen.

Die Rinne wurde ebenfalls aus Feiblech hergestellt und ist mit der Gleitebene identisch. Die Oberfläche entspricht der Oberfläche 2. Der Übergang von der Rinne zur Gleitebene wurde durch Kunststoffspachtel geglättet und anschließend mit dem Dickschichtenlack überstrichen. Somit war kein nennswertiger Übergang von der Gleitebene zur Überhöhung vorhanden. Die Überhöhung selbst wurde auf einer Dreirollen-Biegemaschine erzeugt. Es ist keine Kante längs des Rohres vorhanden.

Abb. 2-15. Skizze des Versuchsstandes



Testgüter und Versuchsreihen

Für den Versuch wurden folgende Testgüter aus dem Testdeck benutzt:

Tab. 2-12. Testgüter Versuch Kippschalensorter

Testgut-Nr.	Packmittel	Packstoffe	Packhilfsmittel	Maße (mm)
1	Faltschachtel	Wellpappe, einlagig	Kunststoffklebeband	410 x 310
2	Stülpdeckelschl.	Schachtelkarton	-	342 x 240
3	Klappdeckelschl.	Wellpappe, einlagig, gefärbt	-	350 x 250
4	Flachbeutel	Polyethylen (PE)	Kunststoffklebeband	400 x 300
5	Flachbeutel	Polyamid (PA)	Kunststoffklebeband	400 x 300
6	Flachbeutel	gestrichenes, weißes Papier	Kunststoffklebeband	380 x 300

Die Testoberfläche war Feinblech lackiert, Oberflächen-Nr. 2.

Folgende Parameter wurden getestet:

Tab. 2-11. Versuchsparameter Versuch Kippschalensorter

Gewicht Kartonware (g)	1000	2000	3000
Gewicht Beutelware (g)	100	500	1000
Sortergeschwindigkeit (m/s)	1,5	1,9	2,5
Anstellwinkel Rutsche (Grad)	15	20	25
Anstellwinkel Überhöhung (Grad)	0	15	30
Variation Nr.	1	2	3

Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuche wurden in gleicher Weise wie im Kap. 2.5.2 durchgeführt. Aus der Tabelle der Variationsmöglichkeiten ergibt sich, daß insgesamt 486 Versuchsläufe analysiert wurden. Der zusätzlich dazugekommene Parameter des Anstellwinkels für die Überhöhung wurde von 30 Grad über 15 Grad zu 0 Grad variiert, da mit seiner Änderung Lackier- und Spachtelarbeiten am Rutschenblech verbunden waren, die nur in dieser Reihenfolge durchgeführt werden konnten.

3. Berechnungsmodelle

3.1 Reibungseinflüsse

Wie aus den Versuchen zu den Reibungseinflüssen hervorgeht, verhält sich der Gleitreibungskoeffizient der Güter geschwindigkeits- und massenabhängig. Die Abhängigkeiten waren je nach Gleitfläche deutlich verschieden (s. Kap. 4.1.2). Speziell für die Testoberfläche 2 (lackiertes Stahlblech) ergab sich aufgrund der Analyse meist eine quadratische Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Gleitgeschwindigkeit.

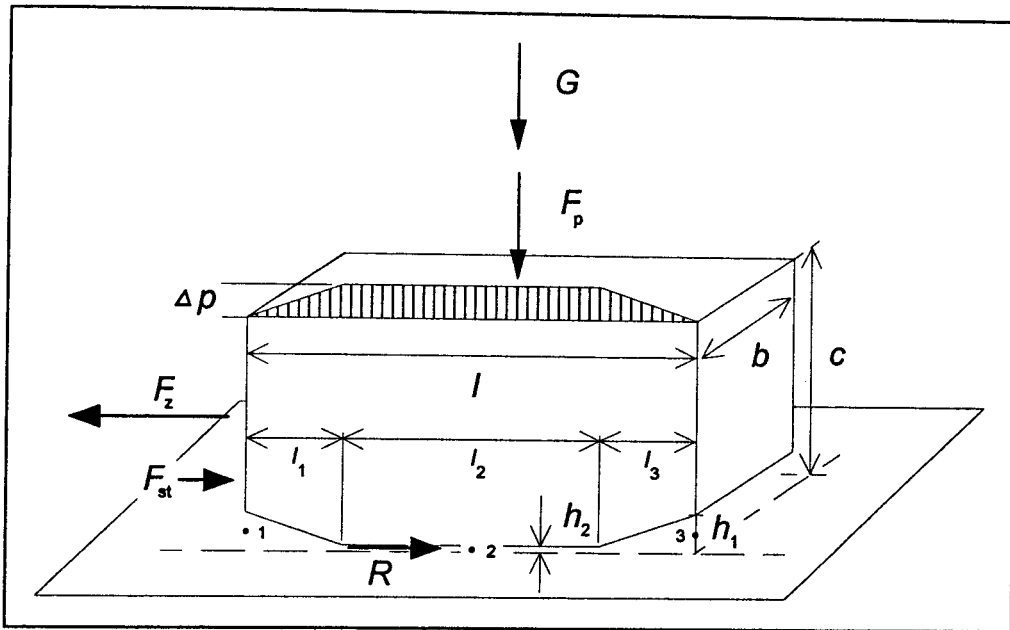
Aufgrund der Untersuchungen ist es wahrscheinlich, daß neben den Materialeigenschaften der beteiligten Reibpartner auch die Luftströmungseinflüsse einen Einfluß auf den Reibbeiwert haben (s. Kap. 4.1.2.2). Zwei Effekte des Luftströmungseinflusses haben einen Einfluß auf den Reibungskoeffizienten,

- der Strömungswiderstand des Körpers
- der Auf- bzw. Abtrieb des Körpers, besonders der Einfluß der Luftströmung zwischen Boden des Körpers und der Gleitfläche.

Um den Einfluß der beiden Effekte einschätzen zu können und ein Modell zur näherungsweise Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten zu erhalten, werden Annahmen getroffen, die eine analytische Formulierung des Problems ermöglichen.

So soll das Modell nur für die Gleitfläche lackiertes Stahlblech aufgestellt werden, da diese Oberfläche die größte Relevanz für die Praxis hat. Weiterhin soll nur die Geschwindigkeitsabhängigkeit berücksichtigt werden, da die Masse des Testgutes in der Praxis während der Gutbewegung nicht variieren kann. Die Kontur des Bodens (s. Abb. 3-1.) wird vorgegeben. Es gibt eine definierte Einlaufkante und eine definierte Auslaufkante. Es liegen Teile des Gutbodens auf (Berührflächen), andere Teile des Bodens bilden durch die fertigungsbedingte Verwölbung der Schachteln Möglichkeiten, Luft in Gleitrichtung unter dem Stückgut durchströmen zu lassen (s. Abb.4-1.). Die Berührfläche des Gutbodens soll plan sein, ebenso die Fläche des Reibpartners. Die Form der Schachtel ist quaderförmig.

Abb. 3-1. Reibkraftmodell für formstabiles Stückgut, speziell Schachtelware, Kontur 1



Das Stückgut hat eine Einlaufkante der Höhe h_1 , die die Aufbiegung des Schachtelbodens im Bereich der Anströmung simuliert. Diese Aufbiegung konnte im Versuch bestätigt werden (Kap. 4.1). Nach dieser idealisierten Einlaufkante strömt die Luft unter dem Schachtelboden mit einer mittleren Luftspalthöhe h_2 hindurch (Der fiktive Luftspalt h_2 ist in der Praxis durch die "Welligkeit" des Bodens gegeben und läßt sich nur experimentell ermitteln.). Dieser Luftspalt vergrößert sich am Ende der Schachtel wieder auf h_1 . Die Zugkraft, mit der im Reibungsversuch gezogen wurde, ist F_z . Sie kann der Hangabtriebskraft auf einer Rutsche gleichgesetzt werden. Ihr entgegen wirkt der Luftwiderstand der Stirnfläche F_{st} . Der Druckunterschied zwischen der Gutoberseite und der Gutunterseite liefert die Andruckkraft F_p , dazu kommt die Gewichtskraft G . Beide zusammen ergeben über den Gleitreibungskoeffizient μ die Reibungskraft R .

$$F_{st} = c_w \left(\rho_l \frac{v^2}{2} \right) (bc) \quad [14, S.172-173] \quad (3-1.)$$

$$G = m g \quad (3-2.)$$

Dadurch, daß der Einlauf wie eine Düse wirkt, entsteht vom Punkt 1 zum Punkt 2 eine Geschwindigkeitserhöhung. Diese Erhöhung bewirkt eine Druckerniedrigung (wenn man annimmt, daß der Volumenstrom konstant bleibt), die eine Druckdifferenz $\Delta p (= p_1 - p_2)$ zwischen dem Luftdruck der Umgebung und dem lokalen Druck zur Folge hat. Diese Druckdifferenz führt dazu, daß zur Schwerkraft eine weitere Anpreßkraft auf das Stückgut einwirkt. Da nur der Anteil der Bodenfläche, welcher nicht aufliegt, zur Anpreßkraft beiträgt, wird der

Faktor f eingeführt, der den tatsächlichen Anteil der Berührfläche des Gutes beschreibt. Dieser Faktor ist experimentell zu ermitteln. Der Anteil der übrigbleibenden, wirksamen Fläche, die die Anpreßkraft erzeugt, lautet demnach $(1-f)$. Insgesamt führt dieses Verhalten zu einer Steigerung der Reibkraft, die zudem über die Anströmgeschwindigkeit der Luft *geschwindigkeitsabhängig* ist. Die Anströmgeschwindigkeit der Luft hängt von der Gleitgeschwindigkeit des Gutes ab und ist mit dieser näherungsweise gleichzusetzen.

Diese Zusammenhänge lassen sich bei Annahme von stationären Strömungsverhältnissen nach der Bernoulli-Gleichung näherungsweise abbilden. In der Realität ist allerdings mit einer Grenzschichtreibung im Luftspalt unter dem Gut zu rechnen, so daß die errechneten Strömungsgeschwindigkeiten dort größer als die tatsächlichen Geschwindigkeiten sein werden. Damit dürfte auch die Erhöhung der Anpreßkraft kleiner als berechnet ausfallen.

Es ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeiten unter dem Schachtelboden durch Aufstellen der Kontinuitätsgleichung von Punkt 1 nach Punkt 2 (es wird davon ausgegangen, daß der Volumenstrom, der zu den Seitenkanten des Schachtelbodens entweicht, vernachlässigbar gering ist, somit bleibt der Volumenstrom konstant) folgender Zusammenhang:

$$V_2 = V_1 \frac{h_1}{h_2} \quad (3-3.)$$

Aus der Bernoulli-Gleichung von Punkt 1 nach Punkt 2 ergibt sich

$$p_1 + (\rho_1 / 2) v_1^2 = p_2 + (\rho_1 / 2) v_2^2 \quad (3-4.)$$

Daraus ergibt sich der Differenzdruck Δp

$$\Delta p = (\rho_1 / 2) (v_2^2 - v_1^2) \quad (3-5.)$$

Der Differenzdruck führt zur Andruckkraft F_p

$$F_p = (1-f) \int_1^3 \Delta p dA$$

$$F_p = (1-f) \Delta p b (l_2 + 1/2 l_1 + 1/2 l_3) \quad (3-6.)$$

Die Geschwindigkeitsabhängigkeit ergibt sich durch

$$F_p = (\rho_1 / 2) (v_2^2 - v_1^2) (1-f) b (l_2 + 1/2 l_1 + 1/2 l_3) \quad (3-7.)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß sich der Druckverlauf in der Einlaufkante und der Auslaufkante linear verhält. Bei anderen Bodenprofilen der Schachtel ergibt sich ein anderer Druckverlauf. In den Versuchen wurden verschiedene Profile getestet und deren Auswirkungen untersucht. Die Reibkraft ist somit geschwindigkeitsabhängig. Damit läßt sich der Kraftansatz wie folgt darstellen:

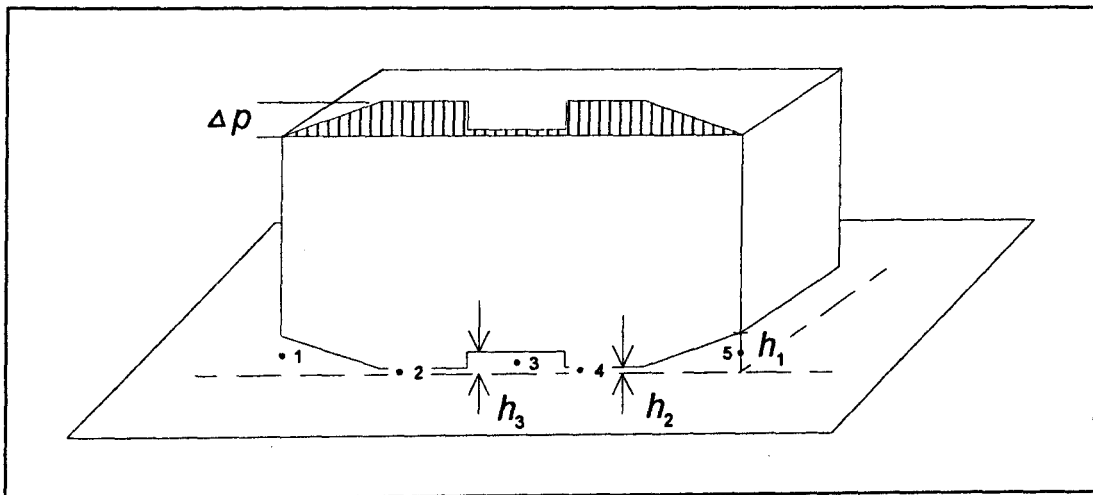
$$F_z = F_{st} + \mu (F_p + G) \quad (3-8.)$$

$$F_z = c_w (\rho_l v_1^2 / 2) (b c) + \mu \{ [(\rho_l / 2) (v_2^2 - v_1^2) (1-f) b (l_2 + 1/2 l_1 + 1/2 l_3)] + m g \}$$

Daraus ist zu folgern, daß es neben dem konstanten Anteil der Gleitreibungskraft ($\mu * G$) einen Anteil der Reibkraft gibt, der sowohl von der Kontur des Gutes (F_{st}) als auch von dessen Geschwindigkeit und Bodenkontur ($\mu * F_p$) abhängig ist. Nur der letztere Anteil hängt direkt von der Gleitgeschwindigkeit v ab.

Nach dieser Hypothese gibt es für Stückgüter eine quadratische Abhängigkeit des Gleitreibungswertes von der Gleitgeschwindigkeit.

Abb. 3-2. Reibkraftmodell für formstables Stückgut, speziell Schachtelware, Kontur 2



Im oben dargestellten Modell ist anstatt einer durchgehenden Bodenplatte der Boden in zwei Querauflagen unterteilt. In der Mitte des Bodens befindet sich eine Auswölbung. Zur Berechnung dieser Kontur läßt sich die Bernoulli-Gleichung in mehreren Abschnitten von 1 nach 2 und von 4 nach 5 bilden. Man erhält ebenso wie vorher einen Druckverlauf längs zur Bewegungsrichtung der Schachtel und kann daraus die Andruckkraft errechnen. Der Übergang von 2 nach 3 bzw. nach 4 kann näherungsweise über den Verlustfaktor für eine un stetige Erweiterung bzw. Verengung

$$\zeta = (A_2/A_1 - 1)^2 \quad [14, S.164] \quad (3-9.)$$

berechnet werden, wobei A_2 bzw. A_1 die unterschiedlichen Querschnitte sind. Daraus ergibt sich eine Druckabsenkung des Differenzdrucks im Spalt (s. Abb. 3-2.)

Wie man im Vergleich zwischen Abb. 3-1. und 3-2. erkennt, wird der Einfluß der Luftströmung unter dem Gutboden umso stärker sein, je größer die Kontaktfläche zum Boden ist. Es ist ebenfalls anzunehmen, daß ein offener Boden den Druckausgleich fördert und den Andruckeffekt verringert. Diese Erkenntnisse konnten im Versuch bestätigt werden (vgl. Abb. 4-19.).

3.2 Bahnkurven

Um die konstruktive Gestaltung von Endstellenrutschen ausführen zu können, müssen die Verläufe der Bahnkurven der Stückgüter in der Zielstelle berechnet werden können. In Abhängigkeit der zu variierenden Parameter des Sorters, der Rutsche und der Stückgüter ergeben sich so verschiedene Verläufe der Bahnkurven, die einen Aufschluß über die konstruktive Ausführung der Zielstelle erlauben.

In den nächsten Kapiteln werden daher Berechnungsmodelle für zwei verschiedene Rutschenbauformen vorgestellt, die in der Praxis Verwendung finden.

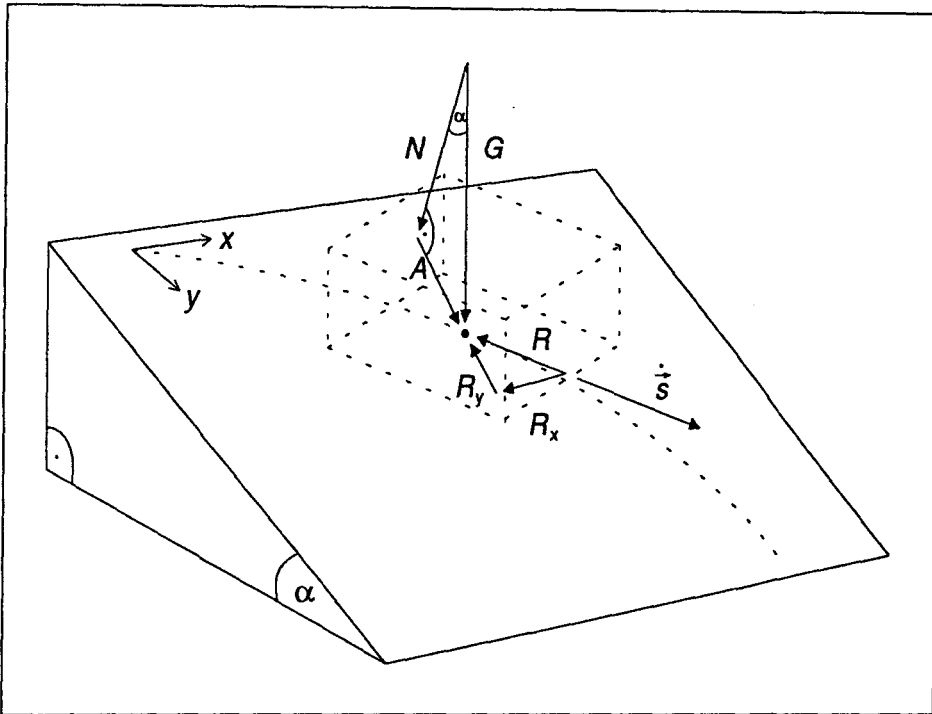
3.2.1 Ebene Rutsche

Die ebene Rutsche ist die Grundbauform der Endstelle. In den meisten Sortier- und Verteilanlagen zweigen die Rutschen rechtwinklig bzw. unter einem spitzen Winkel von der Sortierstrecke ab. Die Stückgüter auf dem Rutschenblech beschreiben eine gekrümmte Abwurfbahn. Durch die Reibung zwischen Gutboden und der Gleitfläche wird die Geschwindigkeitskomponente des Gutes in Richtung der Sortierstrecke (v_x) abgebaut. Die Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Neigung der Endstellenrutsche (v_y) nimmt dagegen zu, sofern der Neigungswinkel über dem Gleitreibungswinkel liegt.

Als Kräfte treten die Gleitreibungskraft R und die Gewichtskraft G auf. Der Geschwindigkeitsvektor $\vec{s}(x, y)$ liegt in der Rutschenebene parallel und entgegengesetzt zum Reibkraftvektor.

Der Angriffspunkt der Gewichtskraft und der Angriffspunkt der Reibkraft liegen in der Realität auseinander. Im Berechnungsmodell soll die Gewichtskraft zur Vereinfachung *am Boden des Gutes* angreifen. Diese Vereinfachung ist annehmbar, da die Höhe des Schwerpunktes des Stückgutes aufgrund der geringen Pakethöhe niedrig liegt. Weiterhin ist der Neigungswinkel der Gleitfläche gering, in der Regel zwischen 15 und 25 Grad [25]. Nur bei nahezu kubischen Schachteln treten größere Abweichungen des Modells zur Realität auf. Diese Güter neigen dann zum Rollen und können mit dem vorgestellten Kraftansatz nicht berechnet werden.

Abb. 3-3. Kräfte der Stückgutbewegung auf einer ebenen, geneigten Gleitfläche



Eine weitere Ungenauigkeit des Modells ist die genaue Lage des resultierenden Reibkraftvektors R , da sich in der Realität mehrere Berührungspunkte am Boden des Stückgutes herausbilden (s. Kap. 4.1.1.1). Ebenso existiert eine ungleiche (und unbekannte) Lastverteilung an den verschiedenen Berührungspunkten des Gutbodens, die neben der Elastizität der Schachtel von der Ebenheit der Gleitebene abhängt.

Rotationsbewegungen der Güter können daher mit diesem Modell nicht berechnet werden. Dazu müßte neben der Flächenlastverteilung die genaue Lage des Schwerpunktes berücksichtigt werden. Wie Auswertungen der Drehbewegung um die Hochachse der Güter ergaben (Vorversuche), konnte bei den Testgütern kein systematisches Verhalten erkannt werden. Da der Schwerpunkt der Testgüter nahezu im Flächenschwerpunkt des Bodens lag, drehten sich die Güter sowohl rechtsherum wie auch linksherum in verschiedene Winkellagen.

Aufgrund dieser Überlegungen ist daher im ersten Ansatz ein idealisiertes *Punktlastmodell* für die Berechnung der Bahnkurve hinreichend.

Aus den angreifenden Kräften läßt sich über den Schwerpunktsatz die Bewegungsgleichung des Gutes formulieren:

$$m \cdot \ddot{\vec{s}} = \vec{A} + \vec{R} \quad (3-10.)$$

$$m \cdot \ddot{\vec{s}} = \begin{bmatrix} 0 \\ m g \sin \alpha \end{bmatrix} - \mu m g \cos \alpha \cdot \frac{\dot{\vec{s}}}{|\dot{\vec{s}}|}$$

Daraus ergibt sich unmittelbar die *Bewegungsgleichung für Stückgüter auf ebenen Rutschen*:

$$\ddot{\vec{s}} = \begin{bmatrix} 0 \\ g \sin \alpha \end{bmatrix} - \mu g \cos \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{\dot{s}_x^2 + \dot{s}_y^2}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{s}_x \\ \dot{s}_y \end{bmatrix} \quad (3-11.)$$

Die Bewegungsgleichung des Gutes ist eine gewöhnliche, inhomogene Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung der Form $\ddot{s}_x = f(\dot{s}_x, \dot{s}_y)$ bzw. $\ddot{s}_y = f(\dot{s}_x, \dot{s}_y)$. Die Differentialgleichung hat eine Analogie zur Berechnung von ebenen Geschößbahnen in der Ballistik [22]. Sie wird dort durch die Hauptgleichung der äußeren Ballistik beschrieben, die die Geschößgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Bahn beschreibt.

Im Fall der Gutbewegung auf einer Gleitebene ist vor allem die Bahnkurve, die das Gut beschreibt, interessant. Da die Differentialgleichung nicht geschlossen analytisch lösbar ist, wird ein numerisches Verfahren zur Lösung der DGL eingesetzt (s. Kap. 3.2.4). Als Lösungsverfahren wurde das Runge-Kutta Verfahren mit einer von Nyström [zitiert nach 22] stammenden Abänderung benutzt. Mit dieser Variante des Verfahrens läßt sich die Bahnkurve des Gutes genauer bestimmen. Der Fehler in den Ortskoordinaten wächst mit Δt^6 , während der Fehler in den Geschwindigkeitskoordinaten weiterhin mit Δt^5 wächst.

Die Versuche haben ergeben, daß der Gleitreibbeiwert abhängig von der Geschwindigkeit und der Masse des Gutes ist. Aus den Ergebnissen der Versuche geht hervor, daß je nach Reibpaarung ein unterschiedlicher Ansatz für die Beschreibung des Gleitreibbeiwertes gemacht werden muß. Um die Ergebnisse der Berechnung der Bahnkurven mit den Versuchsergebnissen vergleichbar zu machen, wird die Ausgangsgleichung (3-11.) mit Hilfe des Ansatzes für die Reibpaarung zwischen Testgut und gestrichenem Rutschenblech (Testoberfläche 2) umgeformt. Die Testoberfläche 2 wurde zu Vergleichszwecken ausgewählt, da sie in der Praxis häufig verwendet wird, besonders im postalischen Bereich [7].

Als Ansatz für den Gleitreibungskoeffizient wurde in Kapitel 4.1.2 die Näherungsfunktion $y = A + B \cdot x^2$ gefunden. Die Koeffizienten A und B ergeben sich durch die Auswahl des Testgutes und der Masse des Testgutes. Die Näherungsfunktion liefert also folgenden Ansatz:

$$\mu = A + B \cdot \dot{s}^2 \quad (3-12.)$$

Daraus ergibt sich für die *Bewegungsgleichung für Güter auf einer ebenen Rutsche*:

$$\ddot{\vec{s}} = \begin{bmatrix} 0 \\ g \sin \alpha \end{bmatrix} - (A + B \cdot (\dot{s}_x^2 + \dot{s}_y^2)) \cdot g \cos \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{\dot{s}_x^2 + \dot{s}_y^2}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{s}_x \\ \dot{s}_y \end{bmatrix} \quad (3-13.)$$

Die obige Gleichung läßt sich in die Komponenten der x- und y-Richtung der Bewegung zerlegen. Damit ist die Bewegung des Gutes vollständig darstellbar.

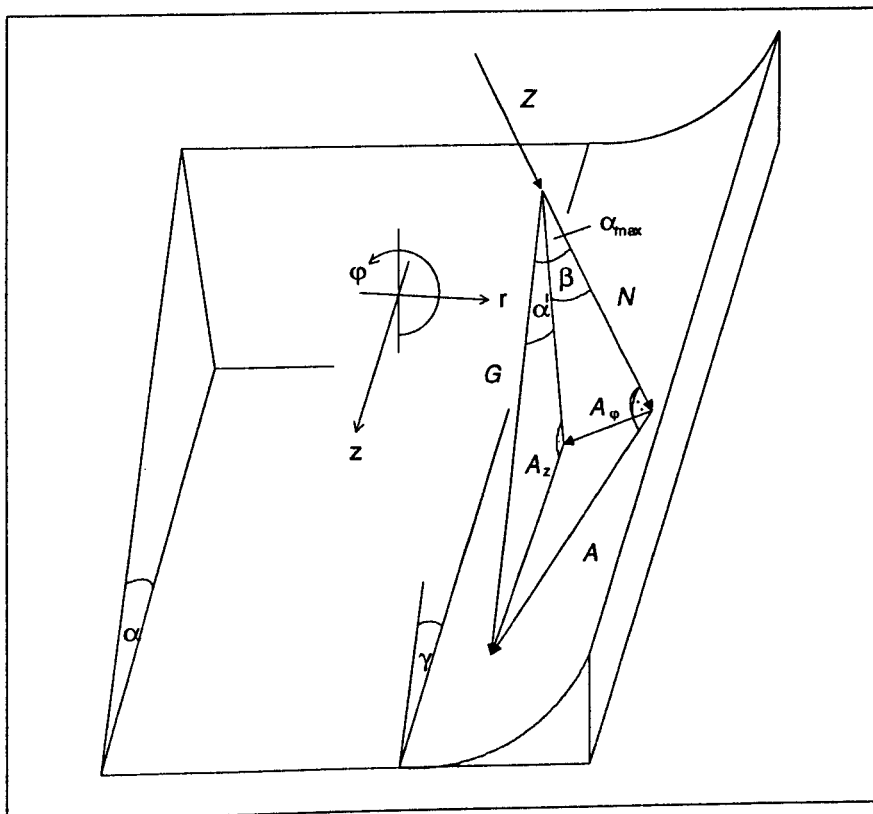
3.2.2 Ebene, gerade Rutsche mit Begrenzung durch seitliche Überhöhung

Da die Breite einer Sortierendstelle in Sortier- und Verteilsystemen möglichst schmal gehalten werden soll, um den Platzbedarf in einem Gebäude zu minimieren, muß die Bewegung des Gutes begrenzt werden können. Dabei darf das Gut selbstverständlich nicht beschädigt werden. Die Geschwindigkeit des Gutes soll kontrolliert werden und darf nicht über ein gewisses Maß (ca. 4 m/s) anwachsen, da ansonsten beim Aufprall auf die bereits in der Endstelle befindlichen Güter Schäden zu befürchten sind.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Seitenwangen mit einer kontinuierlich ansteigenden Überhöhung konstruiert werden. Dadurch entsteht (ähnlich wie bei Wendelrutschenkonstruktionen) durch die Wirkung der Zentrifugalkraft eine Erhöhung des Anpreßdrucks des Gutes und damit eine geschwindigkeitsregulierende Wirkung. Zur Auslegung dieser Rutschenkonstruktion muß der Bahnkurvenverlauf des Gutes in Abhängigkeit der Einflußgrößen bekannt sein.

Zu den in der Ebene wirkenden Kräften kommt die Fliehkraft Z hinzu, die das Gut an die Überhöhung anpreßt. Der Reibkraftvektor R setzt sich somit aus den Kräften N und Z zusammen. Der Überhöhungswinkel, den das Gut in der Seitenwange hat, wird mit β bezeichnet. Der Anstellwinkel der Seitenwange gegenüber der Falllinie auf der Ebene ist γ .

Abb. 3-4. Kräfte der Stückgutbewegung in einer kreisförmigen Rinne als seitliche Begrenzung der Endstelle.



Zur Aufstellung der Bewegungsgleichung wird in Richtung des Gefälles ein Zylinderkoordinatensystem (r, φ, z) eingeführt.

Der Ursprung des Zylinderkoordinatensystems liegt am Anfang des Rinnenrohres (in Gefälgerichtung) im Mittelpunkt des Kreisbogens der Rinne.

Der Kraftansatz mit dem Schwerpunktsatz des Gutes ergibt sich wie folgt:

$$m \ddot{\vec{s}} = \vec{A} + \mu \frac{\dot{\vec{s}}}{|\dot{\vec{s}}|} (N + Z) \quad (3-14.)$$

Im einzelnen wirken folgende Kräfte :

$$G = m \cdot g$$

$$N = G \cdot \cos \alpha_{\max} \quad (3-15.)$$

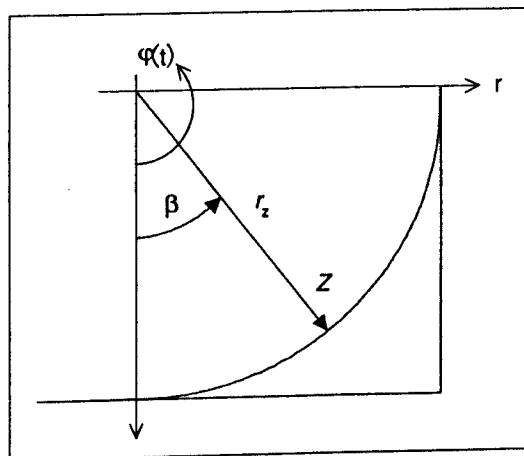
$$A_{\varphi} = -N \cdot \tan \beta = -N \cdot \tan \varphi(t)$$

$$A_z = G \cdot \sin \alpha'$$

Bei der Berechnung der Bahnbewegung muß berücksichtigt werden, ob sich das Gut in der Endstelle an der rechten oder der linken Begrenzung befindet. Die vorgestellte Berechnung bezieht sich ausschließlich auf die rechte Begrenzung. Die Kraft A_{φ} hat bei der Berechnung der Gutbewegung in der linken Rinne ein *positives Vorzeichen*.

Das größte Gefälle α_{\max} liegt in Richtung des Vektors \vec{A} und ist von der momentanen Position des Gutes in der Überhöhung abhängig. Der Winkel α' ist der Neigungswinkel der Ebene längs der Schnittlinie des Rinnenrohres mit der Rutschenebene. Der Winkel α' ist kleiner als α , der Neigungswinkel der Rutschenebene, und hängt vom Anstellwinkel γ der Rinne ab.

Abb. 3-5. Zentrifugalkraft Z in einer kreisförmigen Rinne (Schnitt $r - \varphi$)



Der Überhöhungswinkel β ist dem momentanen Winkel φ (t) gleichzusetzen. Der Radius r_z des Rinnenrohres ist konstant.

Die allgemeine Beschreibung des Beschleunigungsvektors der Punktbewegung in Zylinderkoordinaten lautet [14]

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 \\ r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (3-16.)$$

Im Fall der Bewegung des Gutes in der kreisförmigen Rinne ist r konstant, daher kann ein Geschwindigkeitsanteil oder Beschleunigungsanteil in diese Koordinatenrichtung nicht auftreten. Dadurch vereinfacht sich der Beschleunigungsvektor zu

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} -r\dot{\varphi}^2 \\ r\ddot{\varphi} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (3-17.)$$

Die Vektoren in \vec{e}_φ - und \vec{e}_z - Richtung charakterisieren das Bewegungsverhalten des Gutes in der Rohrebene (Freiheitsgrade des Gutes). Aus der Kontur der Rinne ergibt sich kein Einfluß auf die Bewegung des Gutes in \vec{e}_z - Richtung. Der Zentripetalbeschleunigungsvektor in negativer \vec{e}_r - Richtung ist für die auftretende Zentrifugalkraft Z verantwortlich. Die Zentrifugalkraft steigert den Anpreßdruck des Gutes an die Rinnenwand und führt damit ihrerseits zu einer Erhöhung der Reibkraft am Gutboden.

Die in Abb. 3-5. gezeigte Zentrifugalkraft Z läßt sich durch

$$\vec{Z} = m r_z \dot{\varphi}^2 \vec{e}_r \quad (3-18.)$$

ausdrücken. Da sie in Normalenrichtung zum Gutboden wirkt, trägt sie zur Erzeugung der Reibkraft R bei.

Einsetzen von Gl. 3-15. und Gl. 3-18. in Gleichung 3-14. ergibt die *Bewegungsgleichung für ein Gut als Punktmasse in einer kreisförmigen Überhöhung:*

$$\ddot{\vec{s}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \cos \alpha_{\max} \tan \varphi \\ g \sin \alpha \end{bmatrix} - \mu \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\varphi} r_z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{\dot{\varphi}^2 r_z^2 + \dot{z}^2}} (g \cos \alpha_{\max} + \dot{\varphi}^2 r_z) \quad (3-19.)$$

Der Winkel α_{\max} lässt sich über die untenstehende Graphik herleiten [nach 25]. Es bestehen die Zusammenhänge

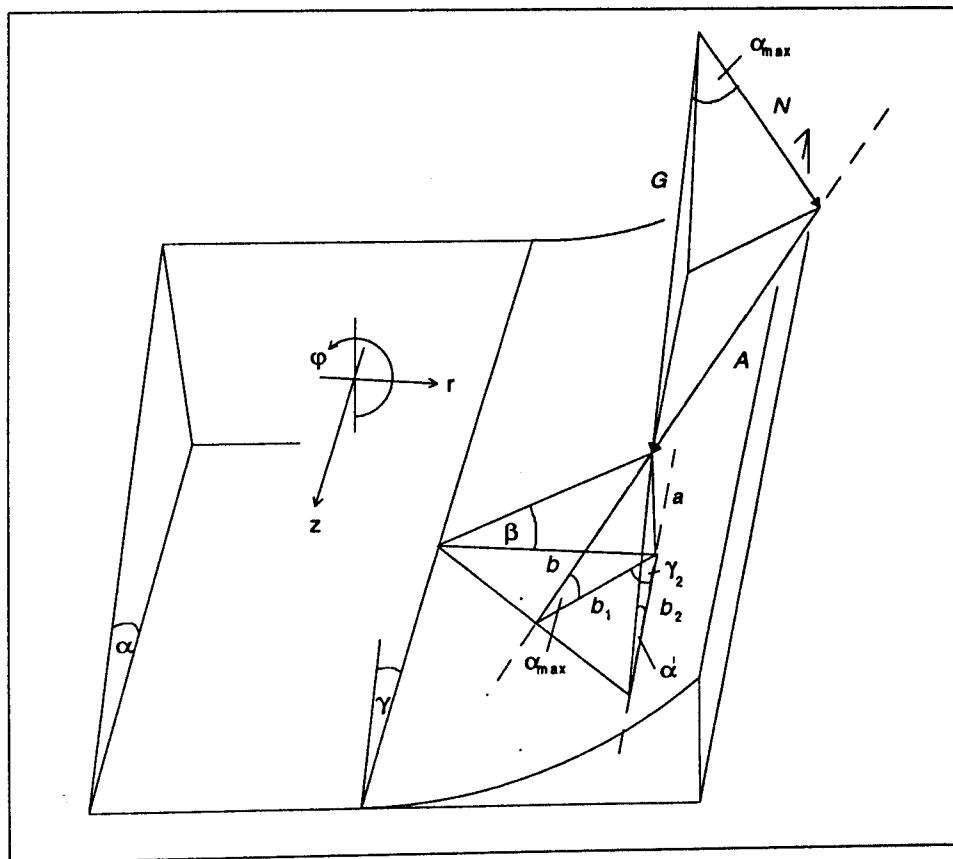
$$b_1 = \frac{a}{\tan \alpha_{\max}} \quad (3-20.)$$

$$b_2 = \frac{a}{\tan \alpha'}$$

$$\tan \beta = \frac{a}{b}$$

$$\cos \gamma_2 = \frac{b_1}{b_2}$$

Abb. 3-6. Bestimmung des größten Gefälle α_{\max} in der Überhöhung



Aus diesen Abhängigkeiten erhält man nach verschiedenen Umformungen

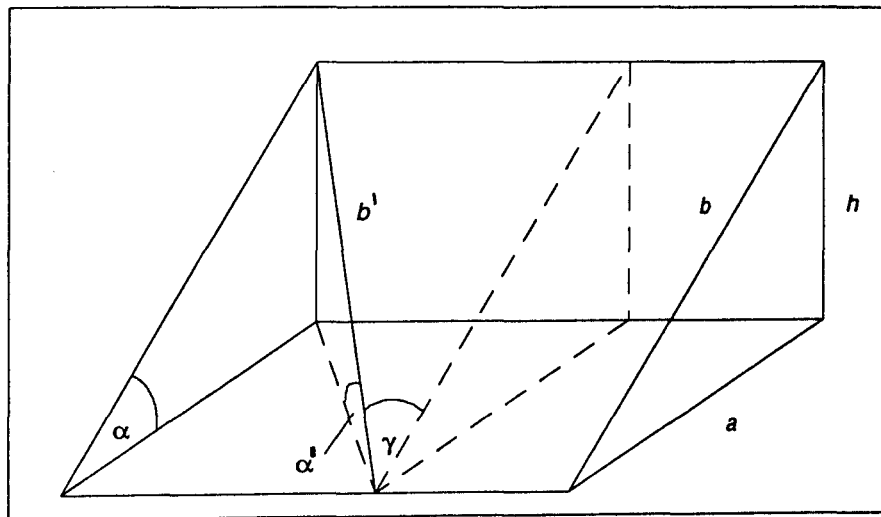
$$\tan \beta = \sqrt{\tan^2 \alpha_{\max} - \tan^2 \alpha'} \quad (3-21.)$$

Daraus ergibt sich folgende zyklometrische Beziehung für den Winkel α_{\max}

$$\alpha_{\max} = \arctan \sqrt{\tan^2 \alpha' + \tan^2 \beta} \quad (3-22.)$$

Die Bestimmung des Winkels α' (Neigungswinkel der Ebene längs der Schnittlinie des Rinne-
rohres mit der Rutschenebene) erfolgt ebenfalls unter Anwendung einer geometrischen
Hilfskonstruktion.

Abb. 3-7. Bestimmung des Winkels α'



Der Winkel α' lässt sich über die obenstehende Skizze herleiten. Es bestehen die
Zusammenhänge

$$\cos \alpha = \frac{a}{b} \quad (3-23.)$$

$$\tan \alpha = \frac{h}{a}$$

$$\cos \gamma = \frac{b}{b'}$$

$$\sin \alpha' = \frac{h}{b'}$$

Aus diesen Abhängigkeiten erhält man nach verschiedenen Umformungen

$$\sin \alpha' = \sin \alpha \cos \gamma \quad (3-24.)$$

Daraus ergibt sich folgende Beziehung für den Winkel α'

$$\alpha' = \arcsin(\sin \alpha \cos \gamma) \quad (3-25.)$$

Aus diesen Winkelbeziehungen läßt sich die komplette Bewegungsgleichung für das Gut in der Seitenwange aufstellen. Zusätzlich muß die Massen- und Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes in die Gleichung mit eingebracht werden. Dazu wird der gleiche Ansatz wie im vorherigen Kapitel verwendet, um eine einheitliche Berechnung der Bahnkurve des Gutes von der ebenen Rutsche in die Überhöhung zu ermöglichen. Die Näherungsfunktion aus Gl. (3-10.) muß für die Benutzung in Zylinderkoordinaten ausgedrückt werden

$$\mu = A + B(\dot{\varphi}^2 r_z^2 + \dot{z}^2) \quad (3-26.)$$

Die Bewegungsgleichung lautet damit vollständig

$$\ddot{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \cos \left(\arctan \sqrt{\tan^2(\arcsin(\sin \alpha \cos \gamma)) + \tan^2 \varphi} \right) \tan \varphi \\ g \sin(\arcsin(\sin \alpha \cos \gamma)) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\varphi} r_z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \frac{A + B(\dot{\varphi}^2 r_z^2 + \dot{z}^2)}{\sqrt{\dot{\varphi}^2 r_z^2 + \dot{z}^2}} \left(g \cos \left(\arctan \sqrt{\tan^2(\arcsin(\sin \alpha \cos \gamma)) + \tan^2 \varphi} \right) + \dot{\varphi}^2 r_z \right) \quad (3-27.)$$

Die Bewegungsgleichung des Gutes ist ebenfalls eine gewöhnliche, inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung, jedoch der Form $\ddot{\varphi} = f(\varphi, \dot{\varphi}, \dot{z})$ bzw. $\ddot{z} = f(z, \dot{\varphi})$.

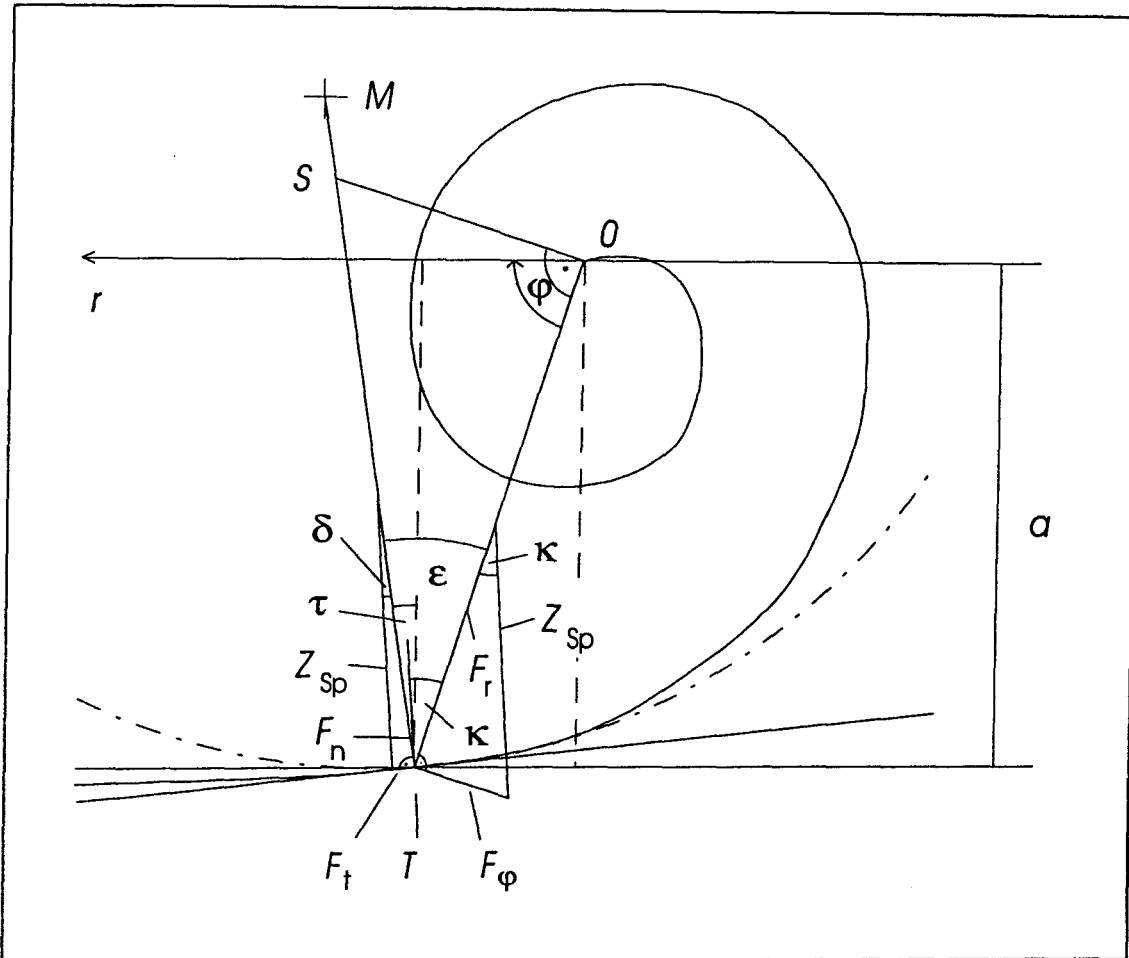
3.2.3 Ideale Kontur der Überhöhung, hyperbolische Spirale

Die kreisförmige Kontur für die Rinnenüberhöhung ist leicht zu fertigen, hat jedoch den Nachteil, daß am Übergang zwischen der ebenen Rutsche und der Überhöhung sofort die Zentrifugalkraft wirkt und den Anpreßdruck erhöht. Diese Tatsache begründet sich auf der sofort wirkenden Krümmung der Bahn. In der Praxis kann sich dieser sprunghafte Übergang nicht vollständig auswirken, da das Gut nachgiebig ist und eine Lastverteilung des entstehenden Anpreßdruckes bewirkt. Trotzdem ist es sinnvoll, die Konstruktion des Übergangs zwischen Rutsche und Überhöhung sanft erfolgen zu lassen. Ideal ist in dieser Beziehung die Form einer *hyperbolischen Spirale*, da diese asymptotisch in eine Gerade ausläuft [27]. Die Gleichung lautet

$$r = \frac{a}{\varphi} \quad [5, S.94] \quad (3-28.)$$

wobei a die Spiralkonstante ist.

Abb. 3-8. Hyperbolische Spirale



Da bei dieser Konstruktion der Radius der Spirale nicht konstant ist, geht aus Gl. (3-16.) ein anderer Beschleunigungsvektor als im Fall der kreisförmigen Überhöhung hervor.

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 \\ r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (3-16.)$$

Der Radius r ist von φ abhängig. Daher lässt sich der Beschleunigungsvektor als Funktion von φ darstellen. Die Differentiation von r ergibt folgende Abhängigkeiten:

$$\dot{r} = -\frac{a}{\varphi^2} \dot{\varphi} \quad (3-29.)$$

$$\ddot{r} = -\frac{a}{\varphi^2} \left(\frac{2\dot{\varphi}^2}{\varphi} + \ddot{\varphi} \right) \quad (3-30.)$$

Der Krümmungsradius ρ der Spirale vom Punkt T ausgehend entspricht der Strecke \overline{MT} . Diese steht wiederum senkrecht auf der Tangente im Punkt T .

$$\rho = \frac{a}{\varphi} \left(\frac{1}{\varphi} \sqrt{1+\varphi^2} \right)^3 \quad [5, S.94] \quad (3-31.)$$

Der Radius r der hyperbolischen Spirale erstreckt sich von O nach T . Die Strecke \overline{OS} entspricht der Polar-Subnormalen mit der Länge

$$\overline{OS} = \frac{r^2}{a} \quad [1, S.94] \quad (3-32.)$$

Für die Zerlegung der Kräfte, die auf ein Gut in der spiralförmigen Überhöhung wirken, müssen noch die Winkelbeziehungen aufgestellt werden.

$$\tan \varepsilon = \frac{\overline{OT}}{\overline{OS}} = \frac{1}{\varphi} \quad (3-33.)$$

$$\tan \kappa = \frac{F_\varphi}{F_r}$$

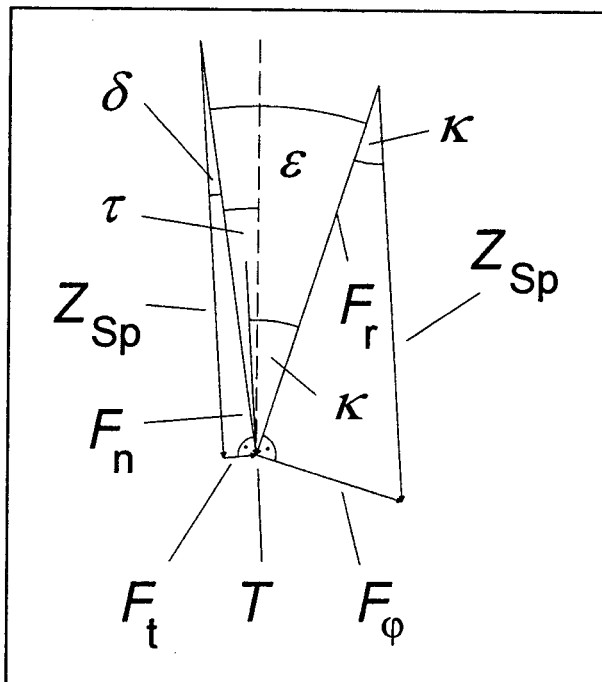
$$\delta = \varepsilon - \kappa$$

$$\tau = \varphi + \varepsilon - \frac{\pi}{2}$$

Der Vektor \vec{Z}_{Sp} ist die resultierende Kraft auf das Gut und setzt sich zusammen aus

$$\vec{Z}_{Sp} = m\vec{a} = \begin{bmatrix} F_r \\ F_\varphi \\ F_z \end{bmatrix} \quad (3-34.)$$

Abb. 3-9. Hyperbolische Spirale, Kräfte am Stückgut, Winkelbeziehungen



Die Komponente in \vec{e}_z -Richtung ist in der Ansicht im Bild 3-8. nicht dargestellt. Sie liegt in Abwärtsrichtung des Rinnenrohres (äquivalent zur kreisförmigen Rinne (s. Abb. 3-4.)) und ist ein Freiheitsgrad der Gutbewegung.

Einsetzen von Gleichungen 3-14. und 3-26. bis 3-28. ergibt für die Komponenten

$$F_r = m \frac{a}{\varphi} \left[\dot{\varphi}^2 - \frac{2\dot{\varphi}^2}{\varphi} + \frac{\ddot{\varphi}}{\varphi} \right] \quad (3-35.)$$

$$F_\varphi = m \frac{a}{\varphi} \left[\ddot{\varphi} - \frac{2\dot{\varphi}^2}{\varphi} \right]$$

Um die Kraft \vec{Z}_{Sp} zu den wirkenden Gewichtskräften des Gutes hinzuzurechnen, müssen die Komponenten in eine Hangabtriebskraft F_t und eine Normalkraft F_n (in der Rinnenebene wirkend) umgewandelt werden, die zusätzlich zu den Gewichtskraftkomponenten N und A_φ auf das Gut einwirken.

$$F_n = \cos \delta \left(\sqrt{F_r^2 + F_\varphi^2} \right) \quad (3-36.)$$

$$F_t = \sin \delta \left(\sqrt{F_r^2 + F_\varphi^2} \right)$$

Um mit diesen Kräften die vollständige Bewegungsgleichung aufzustellen, die für die Berechnung der Bewegung in der Überhöhung mit der Form einer hyperbolischen Spirale gilt, können die vorher aufgestellten Gleichungen (3-13.) benutzt werden, jedoch wird der Überhöhungswinkel β (Abb. 3-9.) ersetzt durch den Überhöhungswinkel τ der Spirale.

Während der Normalkraftanteil F_n direkt in die Berechnung der Reibungskraft eingeht, muß der Tangentialkraftanteil noch F_t in die Komponenten \bar{e}_r und \bar{e}_φ aufgespalten werden.

Die Gleichung (3-12.) wird durch die Kräfte, die in der spiralförmigen Rinne wirken, ergänzt.

Daraus ergibt sich die *Bewegungsgleichung für ein Gut in einer Rinne mit der Kontur der hyperbolischen Spirale*.

$$m \ddot{\vec{s}} = \begin{bmatrix} F_t \sin \kappa \\ A_\varphi + F_t \cos \kappa \\ A_z \end{bmatrix} + \mu \frac{\dot{\vec{s}}}{|\dot{\vec{s}}|} (N + F_n) \quad (3-37.)$$

Auf die Berechnung des Bewegungsverhaltens von Gütern in einer derartigen Rinnenform soll im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden. Es wurden die Berechnungsansätze gezeigt, die diese ideale Form der Seitenwange einer Auslegung und Dimensionierung zugänglich machen.

3.2.4 Umsetzung der Berechnungsmodelle in das Berechnungsprogramm

Die Berechnungsmodelle wurden im Programmpaket EXCEL zusammengestellt, um die Bahnkurven von Stückgütern in Endstellen zu berechnen und die Ergebnisse mit den Versuchen zu vergleichen. Weiterhin sollen die Berechnungen dazu dienen, Auslegungsdiagramme für Endstellenrutschen zu erarbeiten.

Als Berechnungsmodell wurde eine Endstelle konfiguriert, die aus einem ebenen Blech besteht und seitliche Begrenzungen hat. Die seitlichen Begrenzungen bestehen aus kreisförmigen Überhöhungen rechts und links vom ebenen Rutschenblech.

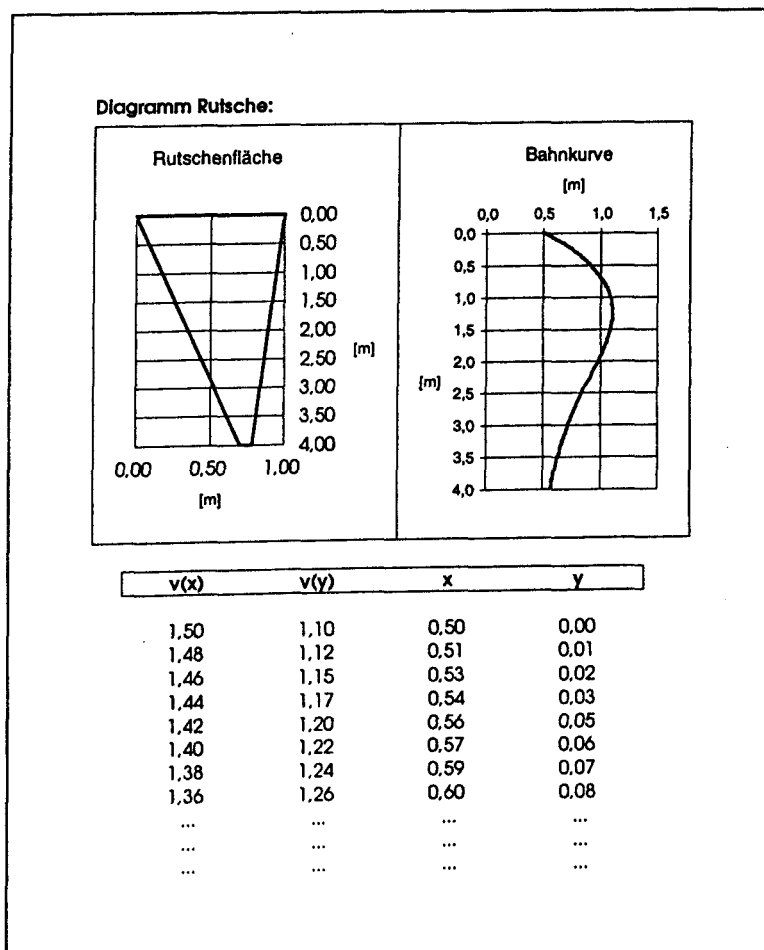
Durch Veränderung der Auslegungsparameter können alle Endstellen dieser Bauart berechnet werden. Die Testgüter, die zur Auslegung zur Verfügung stehen, sind die Güter, deren Verhalten in den Reibungsversuchen (Kap. 3.1.2) auf lackiertem Stahlblech erforscht wurden. Somit stehen hierfür praxisnahe Werte für das Reibungsverhalten zur Verfügung. Beim Berechnungsvorgang werden die Koeffizienten des Näherungspolynoms aus einer Datenbank ausgelesen und zur Kalkulation des aktuellen Reibbeiwertes eingesetzt. Das Berechnungsmodell ist ebenfalls in einer anderen Version erstellt worden, bei dem die Koeffizienten des Reibungspolynoms direkt eingegeben werden können, um alle Güter (auch die nicht getesteten) flexibel simulieren zu können.

Abb. 3-10. Eingabemaske für das Berechnungsmodell

Parameter :	Rinnenrohr rechts (1)	Rinnenrohr links (2)	Ebene Rutsche
Testgut-Nr.			6
Gewicht (500-5000 gr.)			1000
Neigung Rutsche (Grad)			24,00 (alpha)
g (m/s ²)			9,81
delta t (s)	0,010	0,010	0,010
Radius Rinne (m)	0,50	0,50	
Winkel Rinne (Grad)	3,00 (gamma)	10,00 (gamma)	
Anfangsgeschwindigkeiten (m/s)			1,50 v(x)
Offset, Startwert (m)			1,10 v(y)
			0,50 x
			0,00 y
Blechgröße (m)			1,00 x (max)
			4,00 y (max)

Die Programmausgabe erfolgt in graphischer Form kombiniert mit einer Tabelle der Bahnkoordinaten (in orthogonaler Draufsicht der Endstellenrutsche) und der dabei erreichten Geschwindigkeiten.

Abb. 3-11. Beispiel für die Ausgabe der Berechnungsergebnisse

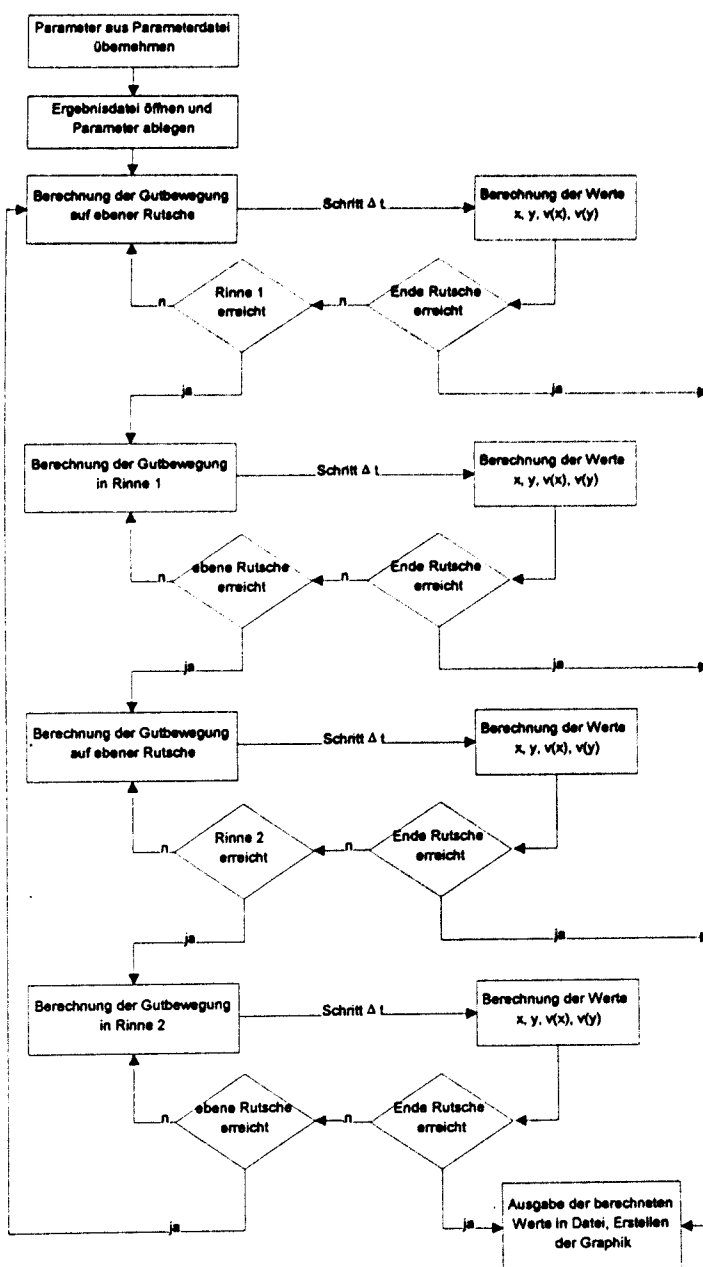


Der Programmablauf erfolgte nach dem in Abb. 3-12. gezeigten Schema.

Beim Ablauf des Programmes werden Nebenfunktionen ausgeführt, die im Ablaufdiagramm nicht dokumentiert sind. So werden alle Berechnungen der Gutbewegung in der Rinne in Zylinderkoordinaten durchgeführt (s. Kap. 3.2.2), die anschließend mit einer Koordinatentransformation in kartesische Koordinaten überführt werden. Anschließend wird eine weitere Koordinatentransformation durchgeführt, um die Orientierungsänderung der Rinne gegenüber der ebenen Rutsche auszugleichen (Winkel γ).

Es wird außerdem überprüft, welche Rutschenlänge bei der gegebenen Winkelstellung beider Rinnenrohre zueinander möglich ist. Falls diese Länge kürzer ist als die angestrebte Berechnungslänge der Rutsche, wird die Berechnung nur bis dort durchgeführt.

Abb. 3-12. Ablauf des Berechnungsprogramms



4. Ergebnisse

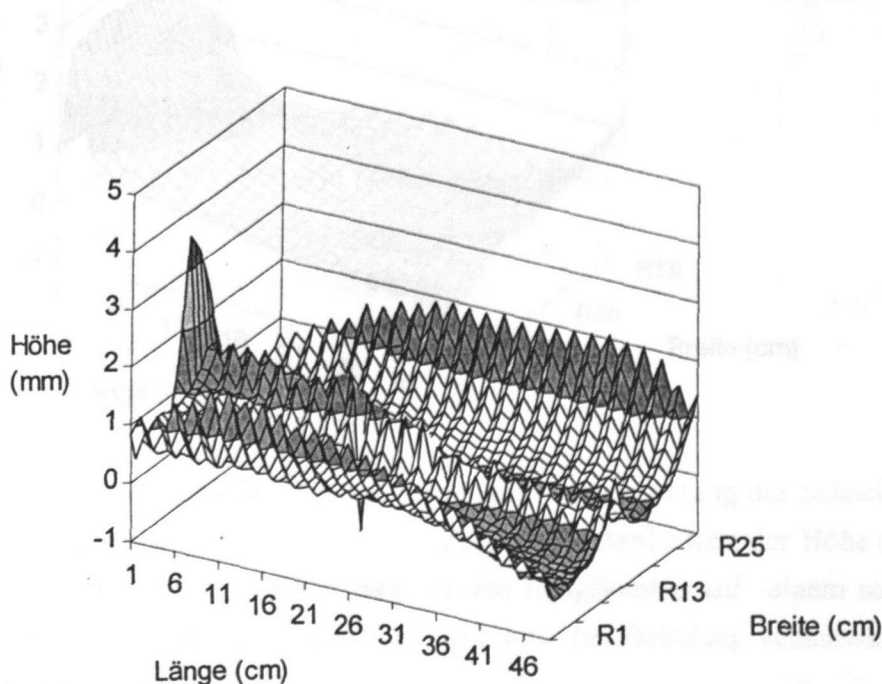
4.1 Versuche

4.1.1 Bodenebenheitsmessungen an Testgütern und Rutsche

4.1.1.1 Bodenebenheitsmessungen Testgüter

Die Ergebnisse der Bodenebenheitsmessungen, die an 4 verschiedenen Testgütern (s. Tab. 2-2) durchgeführt wurden, sind in den folgenden Abbildungen dreidimensional dargestellt. Es ist erkennbar, daß sich die drei Schachteltypen anhand ihrer Verformungsbilder unterscheiden lassen. Jeder Typ hat seine charakteristische Bodenkontur, die sich aufgrund der konstruktiven Merkmale der Schachtelbauart wiedererkennen läßt.

Abb. 4-1. Bodenkontur Faltschachtel, 1kg Beladung

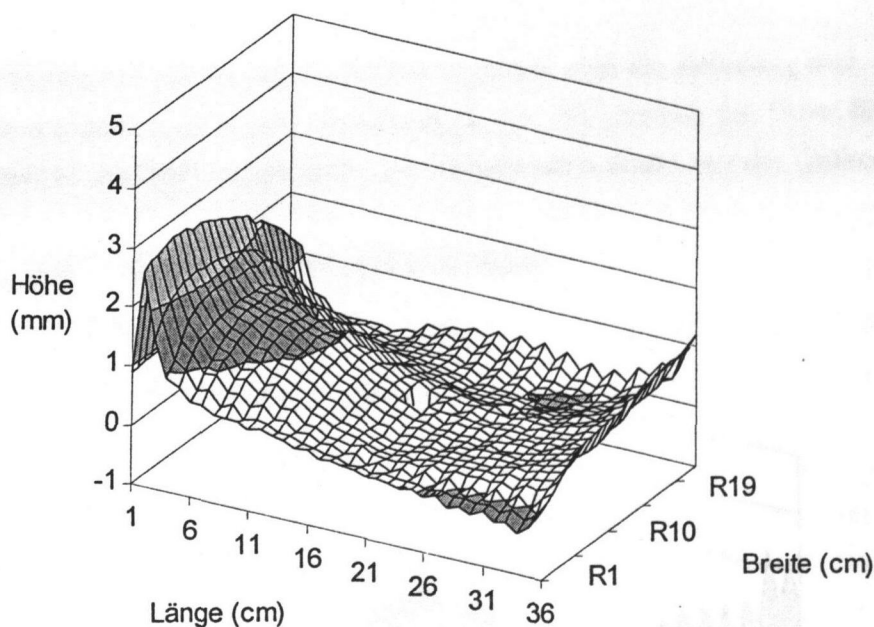


Die Faltschachtel ist sehr charakteristisch. Man erkennt die zwei Bodenlaschen in Längsrichtung des Kartons. Jede Bodenlasche ist gebogen und liegt somit in Längsrichtung wie mit zwei Längskufen auf. Diese Form erhält sich auch bei Beladung. Obwohl nun mehr Anteile des Schachtelbodens die Auflagefläche bilden, bleibt der Absolutwert der Kantenhöhe von

etwa 2 mm erhalten. In der Mitte des Bodens stoßen die Laschen zusammen. Die Höhe dieses durch die Laschen gebildeten Kanals wechselt mit der Beladung. Im leeren Zustand liegt die Höhe zwischen 1 mm und 3 mm, bei der maximalen Beladung von 3 kg bleibt eine Höhe von 0,5 mm erhalten.

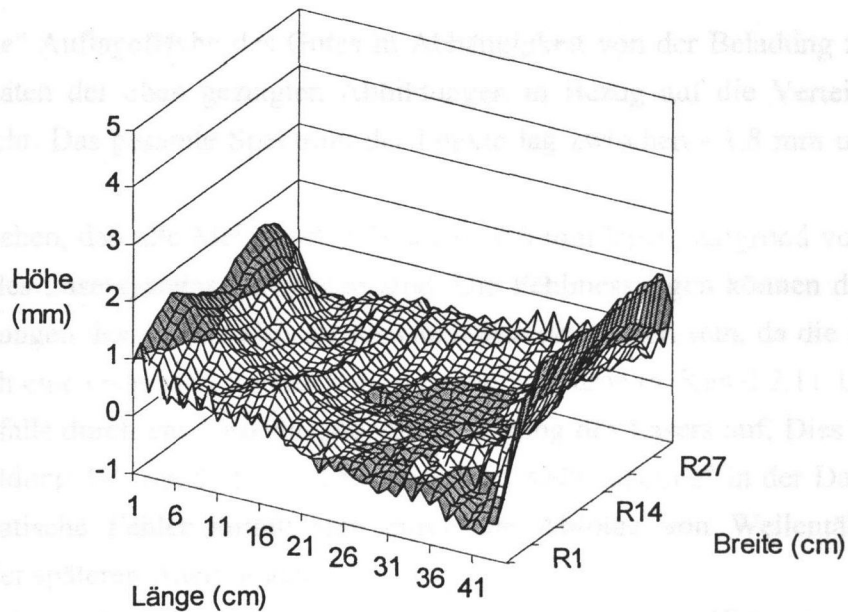
Die Klappdeckelschachtel, die benutzt wurde, ist das Postpaket Nr. 2 des Postdienstes. Dieser Schachteltyp weist das gleichmäßigste Bodenprofil aller drei Schachtelbauarten auf. Es existiert eine Einlaufkante an den Stirnseiten der Schachtel, während die Hinterkante eine mäßige Überhöhung von ca. 1 mm Kantenhöhe aufweist, hat die andere Seite im unbeladenen Zustand eine Kantenhöhe von bis zu 3 mm. Dadurch bildet sich am Boden der Schachtel wie bei der getesteten Faltschachtel ein Kanal aus, der jedoch zur der Mitte des Bodens hin eine Einschnürung hat. Diese Form bleibt bis zu einer Beladung von 2 kg erkennbar, bei 3 kg sind nur noch die Einlaufkanten vorhanden. Sie haben eine Höhe von 1,0 - 1,5 mm.

Abb. 4-2. Bodenkontur Klappdeckelschachtel (Postpaket Nr.2)



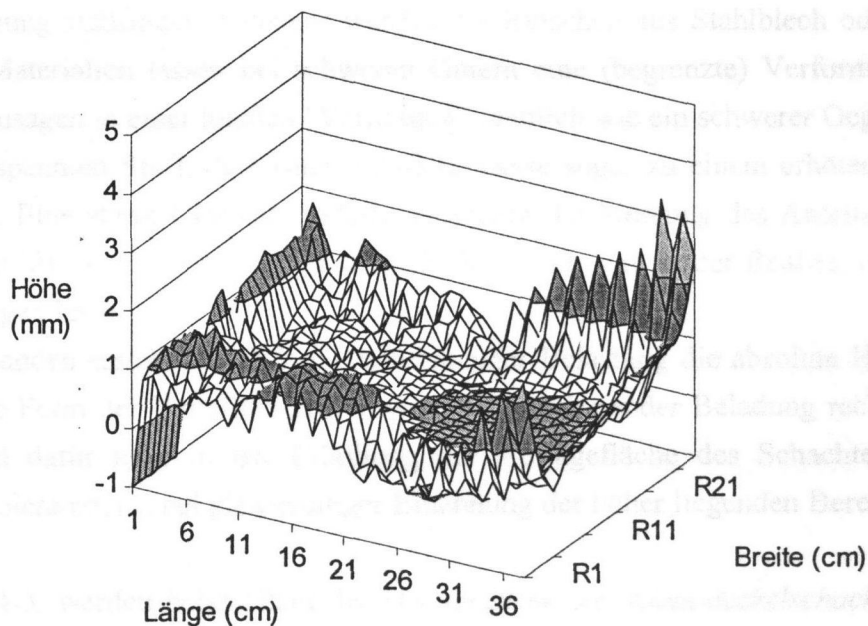
Die Stülpedeckelschachtel hat ebenfalls eine Einlaufkante in Längsrichtung der Schachtel, die auf beiden Seiten ca. 2 mm hoch ist. Bei Beladung nimmt der Absolutwert der Höhe nur wenig ab, er bleibt bei 1,5 mm. Die Schachtel liegt an den Längskanten auf einem schmalen Streifen auf, die Mitte des Bodens hat eine Höhe von 1 mm; bei Beladung verschwindet die Hochwölbung des Boden nahezu.

Abb. 4-3. Bodenkantur Stülpdeckelschachtel



Der Flachbeutel aus Papier liefert das Ergebnis, daß die Beladung sich direkt auf die Bodenkantur auswirkt. Die Zonen der Beladung, d.h. die Umrisse des Gutes bilden sich klar heraus. Insofern ist die Berührungsfläche des Papierbeutels direkt von der Gutkontur abhängig.

Abb. 4-4. Bodenkantur Flachbeutel, Papier



Alle Schachteln lassen ebenfalls die Zonen der Beladung erkennen, d.h. es wird aus der Darstellung ersichtlich, wo Berührungsbereiche zwischen Boden und Unterlage liegen (rot ge-

kennzeichneter Bereich). Allerdings wirkt die Federsteife des Kartonboden vergleichmäßigend auf punktuelle Lasten, die Gestalt des Gutes wird abgeschwächt an den Boden weitergegeben.

Um die "tatsächliche" Auflagefläche des Gutes in Abhängigkeit von der Beladung zu ermitteln, wurden die Daten der oben gezeigten Abbildungen in Bezug auf die Verteilung der Meßpunkte untersucht. Das gesamte Spektrum der Punkte lag zwischen - 1,8 mm und + 5,0 mm.

Es ist davon auszugehen, daß alle Meßpunkte, die unter -0,6 mm lagen, aufgrund von fehlerhaften Messungen des Lasersystems entstanden sind. Die Fehlmessungen können durch Reflexionen und Streuungen des Laserstrahls an der Glasplatte entstanden sein, da die Messung des Gutbodens durch eine Glasplatte hindurch vorgenommen wurde (s. Kap 2.2.1). Ungenauigkeiten traten ebenfalls durch das Umkehrspiel der y-Führung des Lasers auf. Dies wird besonders in der Abbildung 4-1. deutlich, es treten dadurch "Wellenkämme" in der Darstellung auf. Dieser systematische Fehler mittelt sich durch die Abfolge von Wellentälern und Wellenkämmen in der späteren Analyse aus.

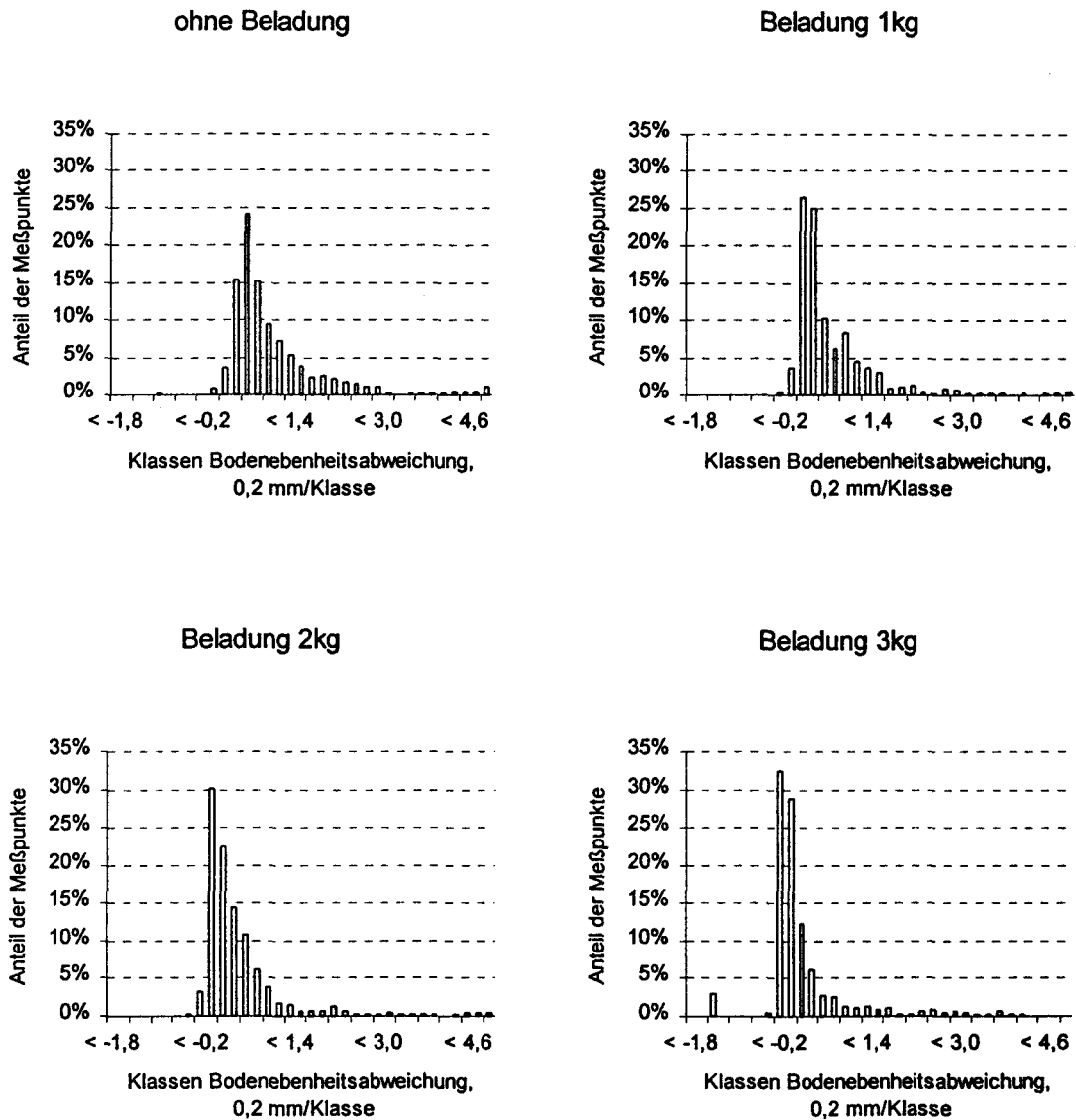
Die Meßpunkte wurden in Klassen von 0,2 mm eingeteilt und in einem Histogramm dargestellt. Allgemein ist festzustellen, daß sich eine rechtsschiefe Verteilung ergibt. Diese beruht auf der Tatsache, daß die Glasplatte die Begrenzung in den negativen Wertebereich darstellt. Daß trotzdem negative Werte auftreten können, liegt an der Durchbiegung der Platte bei zunehmender Belastung. Es ist erkennbar, daß der Median der Histogramme mit zunehmender Belastung pro Kilogramm sich etwa um - 0,2 mm, d.h. eine Klasse verschiebt. dabei bleibt die Form der Verteilung in etwa konstant.

Diese Anpassung der Gleitebene an das darauf befindliche Gut ist praxisnah, da in der Realität ebenfalls eine Biegung stattfindet. Meistens werden die Rutschen aus Stahlblech oder GFK hergestellt, diese Materialien lassen bei schweren Gütern eine (begrenzte) Verformung zu. Das Gut gleitet sozusagen in einer lokalen "Vertiefung" (ähnlich wie ein schwerer Gegenstand in einem Stück gespannten Stoff, dies kann möglicherweise sogar zu einem erhöhtem Gleitwiderstand führen). Eine starre Glasplatte würde außerdem die Messung des Anteils an Berührungsflächen verfälschen, da sich der Schachtelboden nicht -wie in der Realität möglich- an die Rutsche anlegen kann.

Es ist für alle Probanden ersichtlich, daß mit zunehmender Belastung die absolute Höhe des Medians steigt. Die Form der Verteilungskurve wird bei zunehmender Beladung rechtsseitig spitzer. Der Grund dafür liegt in der Erhöhung der Auflagefläche des Schachtelbodens (Medianwert mit Toleranzfeld) bei gleichzeitiger Einebnung der höher liegenden Bereiche des Bodens.

In der Abbildung 4-5. werden beispielhaft die *Histogramme der Klappdeckelschachtel* präsentiert. Alle weiteren Histogramme der übrigen Testgüter werden im *Anhang* dargestellt.

Abb. 4-5. Histogramme Klappdeckelschachtel



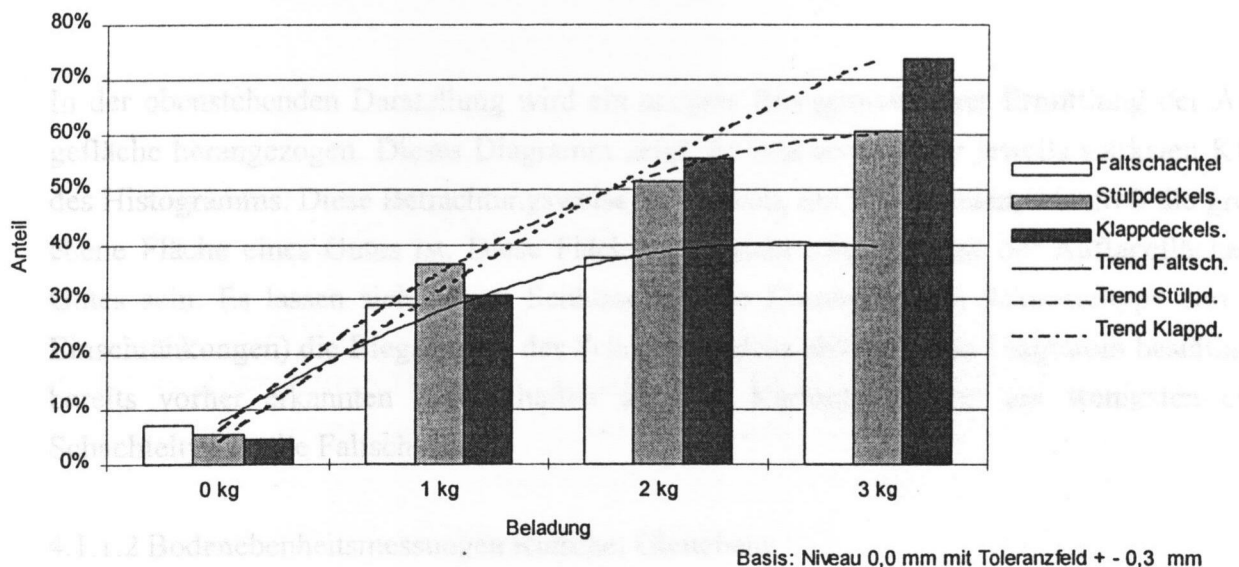
Die *Faltschachtel* (s. Anhang) zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Klappdeckelschachtel. Die Ausprägung der rechtsschiefen Verteilung und die Erhöhung der Auflagefläche mit zunehmender Belastung ist ebenfalls zu erkennen. Trotzdem bleibt eine Anzahl von Meßpunkten im Bereich über + 2 mm erhalten. Der Grund liegt in der Konstruktion des Schachteltyps. Die Laschen bleiben an den Seitenkanten trotz der Beladung gekrümmt, da sie beim dem Auffalten der Schachtel dort abgeknickt wurden.

Die Diagramme der *Stülpedeckelschachteln* (s. Anhang) zeigen, daß dieser Kartontyp sich von den Eigenschaften her ähnlich wie die Klappdeckelschachtel verhält. Die Steigerung des Anteils an Berührungspunkten bei zunehmender Beladung der Schachtel ist jedoch nicht so ausgeprägt.

Um festzustellen, welche Anteile der Bodenfläche des Testgutes die Gleitfläche berühren, müßte gemessen werden, welche Punkte des Bodens belastet werden. Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln war es jedoch nicht möglich, solche Versuche durchzuführen. Daher wurde versucht, aus den Messungen der Bodenkontur eine Auflagefläche des Gutes abzuleiten.

Da davon auszugehen ist, daß die Glasplatte des Versuchsaufbaus sich durchbiegt, wurde vom Niveau 0,0 mm ausgehend ein Toleranzfeld von - 0,3 mm zugelassen. Es ist außerdem davon auszugehen, daß die Führungen des Versuchsaufbaus ein Spiel aufweisen. Daher ist neben einer Abweichung in den negativen Bereich auch eine Abweichung in den positiven Bereich von + 0,3 mm zugelassen worden. Die genaue Größe des Meßfehlers aufgrund dieser Störgröße ließ sich nicht feststellen, aufgrund der Diagramme der Bodenkontur konnte jedoch ein Umkehrspiel in dieser Größenordnung erkannt werden. Es ist ebenfalls zu berücksichtigen, daß die ermittelte Auflagefläche noch keinen direkten Schluß auf die Lastverteilung am Gutboden zuläßt.

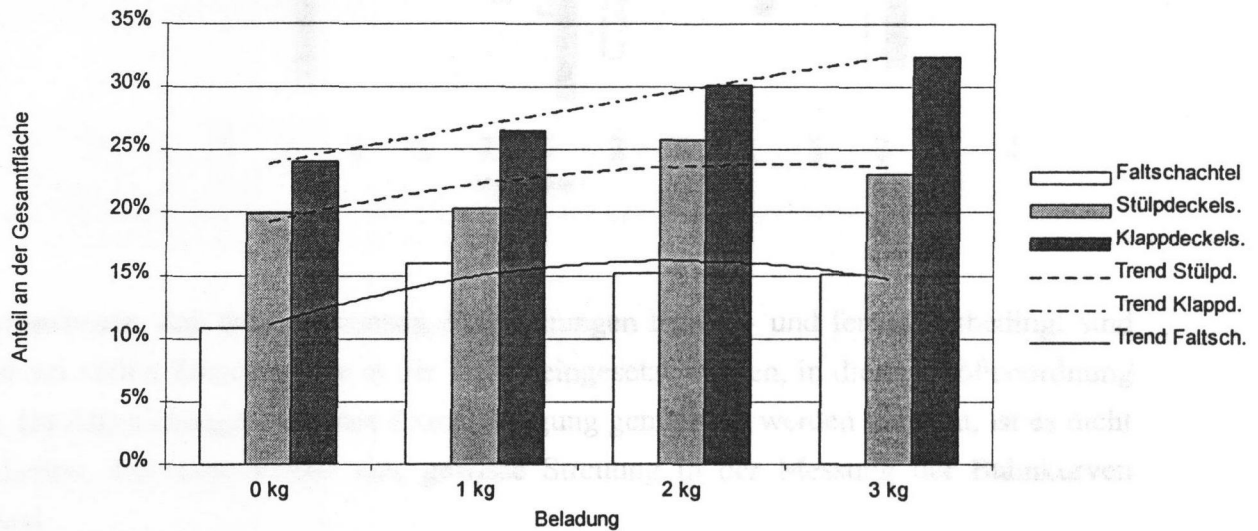
Abb. 4-6. Anteil der Auflagefläche an der Gesamtbodenfläche des Gutes



Das obenstehende Diagramm zeigt die Auswertung des beschriebenen Toleranzfeldes in Bezug auf die Meßpunkte, die in dieses Feld fallen. Es läßt sich mit diesen Diagrammen nachweisen, daß die Berührungsfläche eines Gutes mit zunehmender Beladung steigt. Durch den Trend der Ergebnisse wird bestätigt, daß die Klappdeckelschachtel aufgrund ihrer Konstruktion eine ebene sich gut anpassende Bodenform hat. Die Stülpdeckelschachtel ist aufgrund der verklebten, relativ steifen Ecken nicht so gut aufliegend. Die Faltschachtel liegt schlecht auf, selbst bei hoher Beladung erreicht die Auflagefläche nicht mehr als 40 %. Aus der Tendenz der Kurven ist abzuleiten, daß sich die Schachtel auch bei höherer Belastung nicht wesentlich besser aufliegt.

Aus den Absolutwerten ist erkennbar, daß bei Gewichten, die in der Praxis auftreten, *die Berührungsfläche des Gutes mit der Rutsche zwischen 40 und 70 % der Gutgröße beträgt.*

Abb. 4-7. Anteil der stärksten Verteilungsklasse an der Gesamtbodenfläche des Gutes



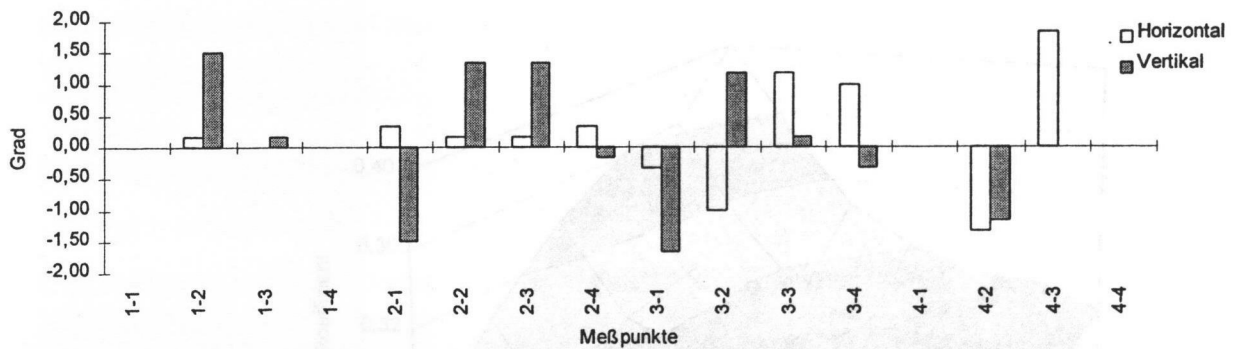
In der obenstehenden Darstellung wird ein anderes Bezugsniveau zur Ermittlung der Auflagefläche herangezogen. Dieses Diagramm zeigt die Auswertung der jeweils stärksten Klasse des Histogramms. Diese Betrachtungsweise ist sinnvoll, um festzustellen, wie groß die größte, ebene Fläche eines Gutes ist. Diese Fläche muß nicht identisch mit der Auflagefläche des Gutes sein. Es lassen sich daraus Schlüsse auf die Ebenheit eines Schachteltyps und (mit Einschränkungen) die Biegsamkeit des Schachtelbodens ableiten. Das Diagramm bestätigt die bereits vorher erkannten Eigenschaften der drei Kartontypen, der am wenigsten ebene Schachteltyp ist die Faltschachtel.

4.1.1.2 Bodenebenheitsmessungen Rutsche, Gleitebene

Im folgenden Diagramm werden die Meßergebnisse bei der in den Versuchen 4.1.4 und 4.1.5 eingesetzten Rutschenoberfläche dargestellt. Die Meßpunkte liegen in einem Rasterabstand von 1000 mm; die Bezeichnung der Meßpunkte erfolgt nach Zeilen und Spalten (Bsp.: 2-4 = zweite Zeile, vierte Spalte), numeriert nach der Festlegung des Rutschenkoordinatensystems (Abb 4-25.).

Wie aus der Darstellung hervorgeht, variiert die eingestellte Neigung von 20 Grad im Bereich von + 1,8 und - 1,7 Grad. Die Abweichungen der einzelnen Meßpunkte werden nach der Meßrichtung unterschieden, entweder in die horizontale (x-) oder in die vertikale (y-) Ausrichtung.

Abb. 4-8. Gemessene Abweichungen von der Rutschenneigung (20 Grad)



Es ist anzunehmen, daß die gemessenen Abweichungen herstell- und fertigungsbedingt sind und somit bei vielen Rutschen, die in der Praxis eingesetzt werden, in dieser Größenordnung auftreten. Da Abweichungen von fast 2 Grad Neigung gemessen werden konnten, ist es nicht auszuschließen, daß diese Fehler eine gewisse Streuung in der Messung der Bahnkurven verursachen.

4.1.2 Reibungsmessungen

Abb. 4-10 Kennfeld Gleitreibbeiwert, Mittelwerte Poly-Flachbeutel, Oberfläche 2

4.1.2.1 Messung des Reibungsverhaltens von Stückgütern bei verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten und verschiedenen Gewichtskräften

Die Reibungsmessungen an elf verschiedenen Stückgütern auf drei verschiedenen Oberflächen erbrachten interessante Ergebnisse bezüglich der Abhängigkeiten zwischen Gleitgeschwindigkeit, Masse des Stückgutes und dem Gleitreibungskoeffizienten.

Alle Versuche wurden nach den Testgütern und den verwendeten Oberflächen zusammengefaßt und der Reibungsbeiwert als abhängige Größe dargestellt. Dadurch ergeben sich 33 Kennfelder, die zwischen 0,5 und 3,5 m/s und zwischen 500 und 5000 g alle Parametervariationen der Parameter Geschwindigkeit und Gutgewicht darstellen. Mit der Kenntnis dieses Reibungsverhaltens ist es möglich, die genaue Berechnung der Gutbewegung in einer Endstellenrutsche durchzuführen. Die Meßwerte der Kennfelder finden sich im Tabellenanhang. Zwei Beispiele zu den erarbeiteten Kennfeldern stellen die Mittelwerte der Messungen zu den Faltschachteln und zu den Polybeuteln dar.

Abb. 4-9. Kennfeld Gleitreibbeiwert, Mittelwerte Faltschachteln, Oberfläche 2

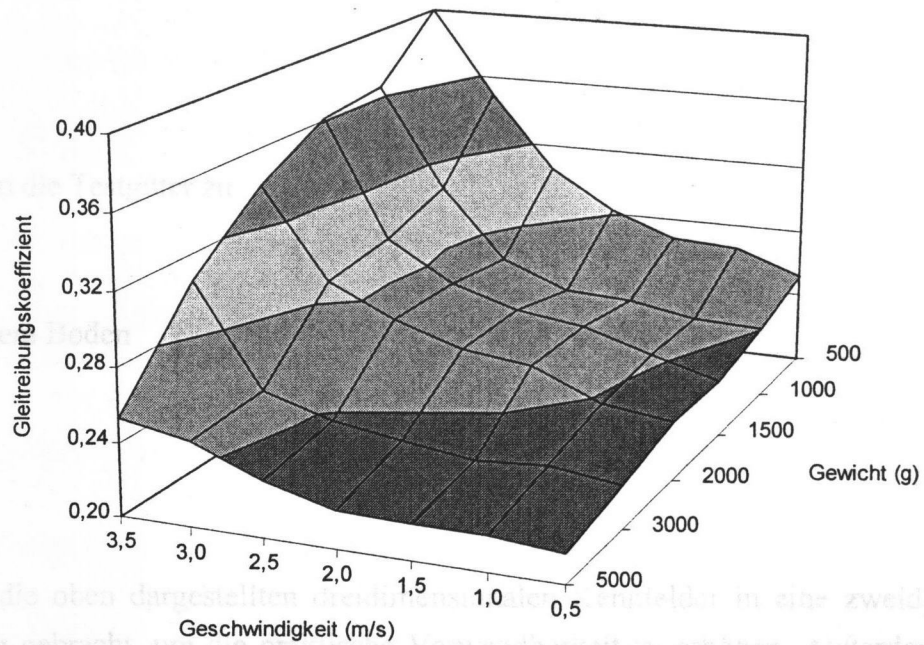
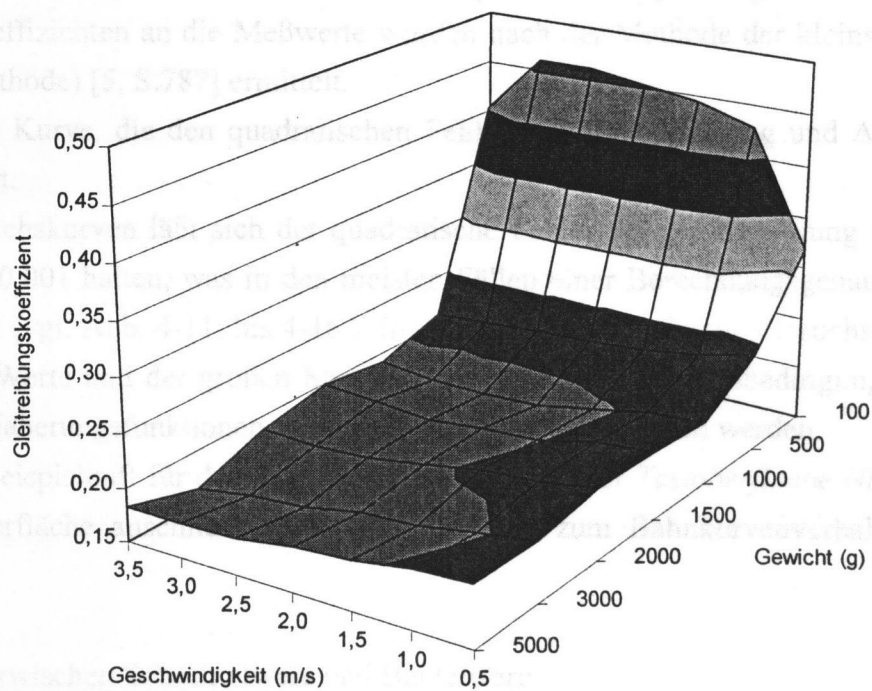


Abb. 4-10. Kennfeld Gleitreibbeiwert, Mittelwerte Poly-Flachbeutel, Oberfläche 2



Um die Daten zu verdichten und allgemeingültige Aussagen zu den Messungen zu erarbeiten, wurden einige Testgüter zu Gruppen zusammengefaßt.

Als Obergruppe wurden zwei Testgutgruppen gebildet,

- Schachtelware
- Beutelware

als Untergruppe wurden die Testgüter zu

- Faltschachteln
- Schachteln m. glattem Boden bzw.
- Poly-Flachbeuteln
- Papierbeuteln

zusammengestellt.

Des weiteren wurden die oben dargestellten dreidimensionalen Kennfelder in eine zweidimensionale Darstellung gebracht, um die praktische Verwendbarkeit zu erhöhen. Außerdem wurden alle Meßwerte mit Punkten dargestellt. Diese Punkte wurden durch eine Ausgleichskurve zwischen den Meßpunkten angenähert.

Es wurde für jede Oberfläche eine passende Ausgleichsfunktion angenommen. Die Koeffizienten der Funktion wurden mit einem Interpolationsverfahren bestimmt. Dazu wurde das Programmpaket EXCEL eingesetzt. Die Interpolation wurde nach dem Newton'schen Näherungsverfahren unter Verwendung von Vorwärtsdifferenzen [5, S.755-758] durchgeführt.

Die Annäherung der Koeffizienten an die Meßwerte wurden nach der Methode der kleinsten Quadrate (Gauß'sche Methode) [5, S.787] ermittelt.

Dadurch ergibt sich eine Kurve, die den quadratischen Fehler zwischen Messung und Ausgleichsfunktion minimiert.

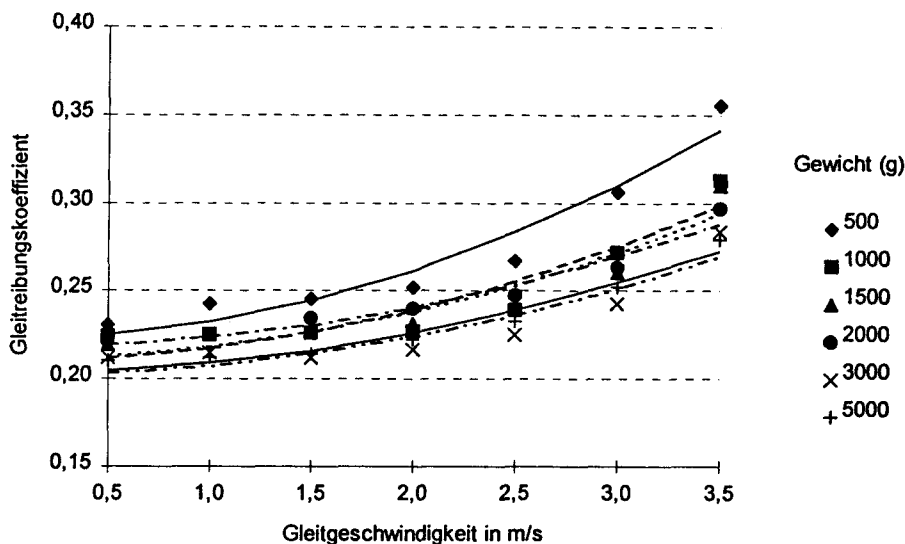
Mit den meisten Ausgleichskurven läßt sich der quadratische Fehler bei der Ermittlung des Gleitreibbeiwertes unter 0,001 halten, was in den meisten Fällen einer Berechnungsgenauigkeit von $\pm 5\%$ entspricht (vgl. Abb. 4-11. bis 4-16.). In Anbetracht der geringen Versuchszahl zur Ermittlung der Werte und der großen Streuung der Werte unter Praxisbedingungen können die angesetzten Näherungsfunktionen als ausreichend genau angesehen werden.

Die Ergebnisse werden beispielhaft für das Verhalten der Güter auf der *Testoberfläche Nr. 2* analysiert, da diese Oberfläche anschließend für die Versuche zum Bahnkurvenverhalten eingesetzt werden soll.

Vergleich der Meßwerte zwischen Schachtelware und Beutelware

Die Darstellung des Reibbeiwertes über der Gleitgeschwindigkeit weist bei *Schachtelware* für jede Gewichtsklasse einen progressiv steigenden Kurvenzug auf.

Abb. 4-11. Kennfeld des Gleitreibbeiwertes, Mittelwerte Schachtelware, Oberfläche 2



Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit steigt der Reibungskoeffizient; im Mittel über alle Gewichtsklassen um etwa 40 %, bezogen auf den Vergleich zwischen 0,5 m/s und 3,5 m/s. Das Gewicht des Testgutes hat einen Einfluß auf die Krümmung der Kurve; je leichter das Testgut ist, desto stärker ist der Geschwindigkeitseinfluß auf den Gleitreibbeiwert. Um dieses besser interpretieren zu können, wurden die *Koeffizienten für die Ausgleichskurven* näher untersucht. Folgende Ausgleichsfunktionen wurden angesetzt:

Tab.4-1. Verwendete Ausgleichsfunktionen zur Berechnung des Gleitreibbeiwertes (Gutmasse konstant)

Testgut	Testoberfl.-Nr.	Oberfläche	Näherungsfunktion
Schachtelware	1	Feinblech St 12.03	$Y = A + B \cdot X$
Schachtelware	2	Feinblech St 12.03, lackiert	$Y = A + B \cdot X^2$
Schachtelware	3	Kunststoffplattenmaterial, PVC grau	$Y = A + B \cdot \sqrt{X}$
Beutelware	1, 2, 3		$Y = A + B \cdot X$

Die Variable x steht für die Gleitgeschwindigkeit des Gutes, y ist die Variable für den Gleitreibbeiwert.

Anhand des Vergleiches der Koeffizienten B wird deutlich, daß die These, daß der Gleitreibbeiwert nicht nur mit steigender Gleitgeschwindigkeit, sondern auch mit geringerer Gutmasse zunimmt, richtig ist. Dieses Verhalten läßt sich bei Schachtelware für alle drei Testoberflächen verallgemeinern (siehe Anhang).

Tab. 4-2. Tabelle der Koeffizienten und Tabelle der prozentualen Steigerung des Gleitreibbeiwertes, Oberfläche 2, Schachtelware

Gewicht (g)	A	B	Gewicht (g)	0,5 m/s => 3,5 m/s	min => max
500	0,223	0,010	500	53,8%	53,8%
1000	0,211	0,007	1000	39,5%	39,5%
1500	0,212	0,007	1500	41,0%	41,0%
2000	0,218	0,006	2000	33,8%	33,8%
3000	0,202	0,005	3000	33,7%	33,7%
5000	0,204	0,006	5000	32,5%	32,5%

Man kann anhand der zweiten Tabelle erkennen, daß der Absolutwert des Reibbeiwertes (aus den Messungen ermittelt) die gleiche Tendenz hat, sowohl im Vergleich der Geschwindigkeiten 0,5 m/s und 3,5 m/s als auch bezogen auf das Verhältnis zwischen dem kleinsten und dem größten Absolutwert des Gleitreibungskoeffizienten.

Wie aus der Darstellung (Abb. 4-11.) erkennbar ist, liefert der Funktionsansatz zweiter Ordnung

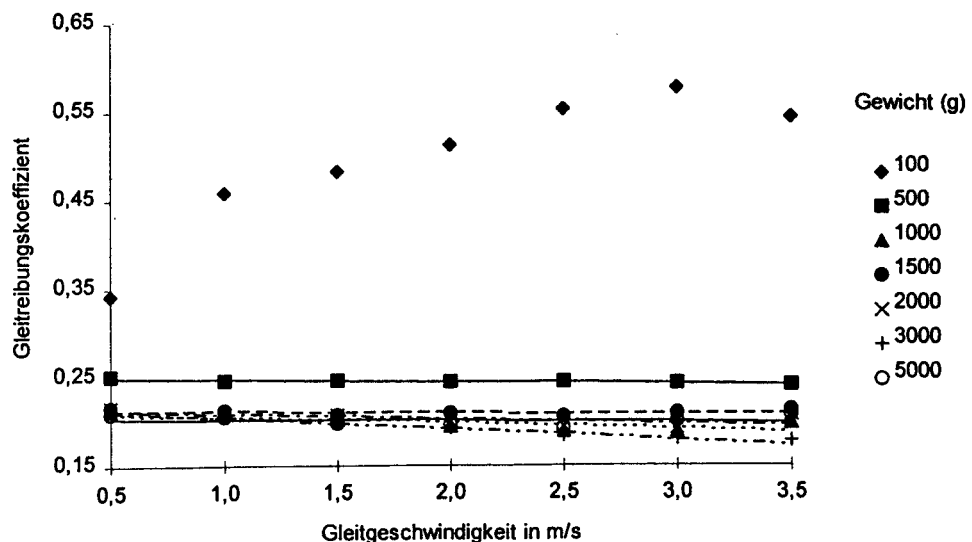
$$y = A + B * x^2$$

eine gute Anpassung an die Meßwerte, lediglich die Kurve 500 g ist stärker fehlerbehaftet.

Die Betrachtung der Näherungsfunktion bei festem Gutgewicht ist für die Praxis sinnvoll, da die Berechnungen von Bewegungsbahnen von Gütern nur mit konstanter Gutmasse durchgeführt werden. Daher finden sich im Anhang die Koeffizienten für alle elf Testgüter auf allen drei Testoberflächen bei allen getesteten Gewichtsstufen.

Der Vergleich der *Beutelware* mit den Ergebnissen von Schachtelware zeigt ein völlig anderes Verhalten des Gleitreibbeiwertes

Abb. 4-12. Kennfeld des Gleitreibbeiwertes, Mittelwerte Beutelware, Oberfläche 2



Es ist zu erkennen, daß der Reibbeiwert der Beutelware mit der Gleitgeschwindigkeit linear fällt. Eine Ausnahme bildet die Beutelware bei 100 g. Sie zeigt ein steigendes Verhalten bei erheblich höheren Reibbeiwerten.

Die Approximation des Reibbeiwertverlaufes durch eine Gerade ist sehr gut (Ausnahme 100g). Sie gilt verallgemeinert für alle Testoberflächen (siehe Anhang). Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Gutgewicht und Gleitreibungskoeffizient läßt sich für diese Testoberfläche nicht nachweisen.

Tab. 4-3. Tabelle der Koeffizienten und Tabelle der prozentualen Steigerung des Gleitreibbeiwertes, Oberfläche 2, Beutelware

Gewicht	A	B	Gewicht	0,5 m/s => 3,5 m/s	min => max
500	0,251	-0,003	100	58,8%	68,3%
1000	0,213	-0,007	500	-4,0%	4,2%
1500	0,213	-0,001	1000	-6,5%	12,8%
2000	0,215	-0,005	1500	-2,0%	5,2%
3000	0,217	-0,012	2000	-4,4%	12,4%
5000	0,204	-0,001	3000	-16,0%	19,0%
			5000	-0,9%	8,2%

Wie sich aus der obenstehenden Tabelle ablesen läßt, gibt es jedoch Anzeichen dafür, daß der Reibbeiwert bei zunehmender Gleitgeschwindigkeit umso stärker abfällt, je höher das Gutgewicht ist.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, daß sowohl Schachtelware als auch Beutelware eine eindeutige, typische Abhängigkeit des Gleitreibungskoeffizienten von der Gleitgeschwindigkeit und vom Gutgewicht hat. Dabei treten die vorher geschilderten Zusammenhänge auf.

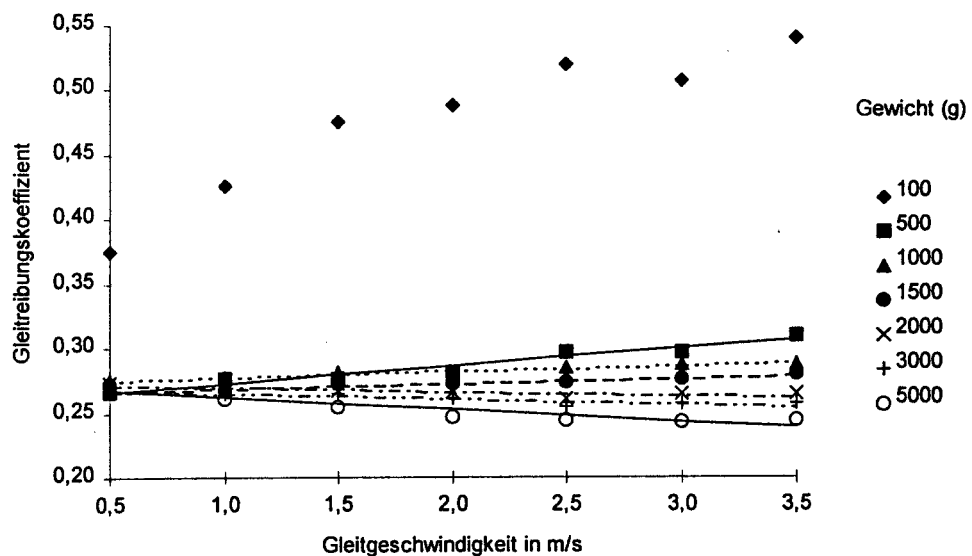
Vergleich der Messungen auf verschiedenen Oberflächen

Auch hier zeigt sich für *Beutelware* eine lineare Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Gutgeschwindigkeit, ebenso bildet das Gewicht 100 g eine Ausnahme im Kurvenverlauf. Wie man weiterhin sieht, ist der Reibbeiwert (Absolutwert) bei allen Geschwindigkeitsstufen eindeutig abhängig vom Gutgewicht. Näheren Aufschluß über dieses Verhalten bringt die untenstehende Tabelle.

Tab. 4-4. Tabelle der Koeffizienten und Tabelle der prozentualen Steigerung des Gleitreibbeiwertes (Basis Messungen), Oberfläche 1, Beutelware

Gewicht	A	B	Gewicht	0,5 m/s => 3,5 m/s	min => max
500	0,259	0,014	100	43,7%	43,7%
1000	0,273	0,004	500	16,2%	16,2%
1500	0,264	0,004	1000	4,6%	4,6%
2000	0,273	-0,003	1500	4,8%	4,8%
3000	0,270	-0,004	2000	-3,5%	4,9%
5000	0,271	-0,009	3000	-4,3%	5,4%
			5000	-10,3%	12,1%

Abb. 4-13. Kennfeld des Gleitreibbeiwertes, Mittelwerte Beutelware, Oberfläche 1



Jede Gewichtsstufe bringt eine Verminderung in der Steilheit der Kurve (Koeffizient B). Im Vergleich zu Oberfläche 2 ist festzustellen, daß der Reibbeiwert bei niedrigen Gewichten mit zunehmender Geschwindigkeit steigt, bei hohen Gewichten jedoch fällt.

Dieses Verhalten ist bei der Oberfläche 3 ebenfalls zu erkennen (s. Anhang), jedoch nicht so ausgeprägt und eindeutig wie bei Oberfläche 1.

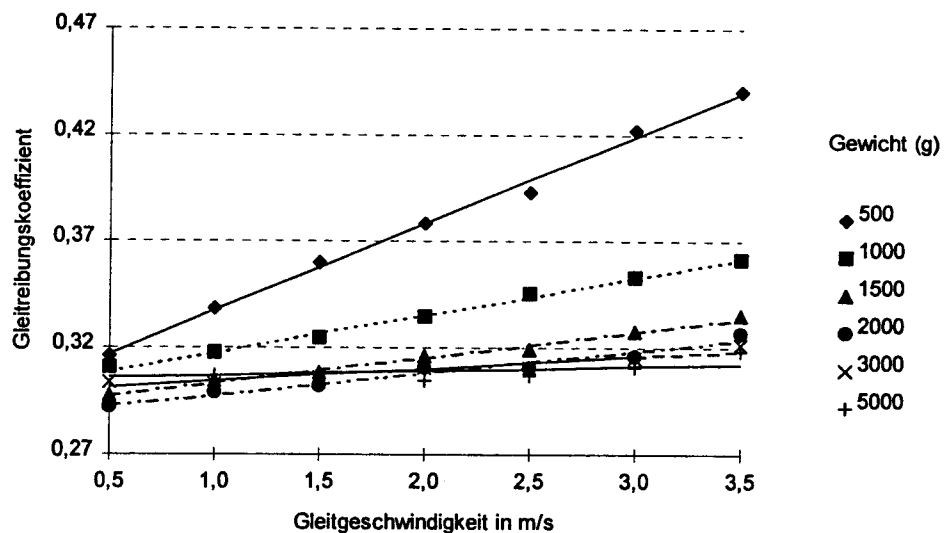
Die Mittelwerte des Reibbeiwertes, untereinander verglichen, bezogen auf die niedrigste Gleitgeschwindigkeit, ergeben für Beutelware folgende Ergebnisse:

- Oberfläche 1, unbehandeltes Stahlblech, geschliffen $\mu = 0,268$
- Oberfläche 2, Stahlblech lackiert, angeschliffen $\mu = 0,219$
- Oberfläche 3, Kunststoff, PVC grau $\mu = 0,360$

Der Vergleich der *Schachtelware* auf verschiedenen Oberflächen liefert je nach eingesetzter Oberfläche verschiedene Näherungsfunktionen für den Gleitreibbeiwert (s. Tab. 4.1), die

dennoch alle sehr typisch sind. Während auf Oberfläche 2 die Werte nach einer quadratischen Funktion verlaufen, gehorchen die Werte von Oberfläche 1 einem linearen Gesetz.

Abb. 4-14. Kennfeld des Gleitreibbeiwertes, Mittelwerte Schachtelware, Oberfläche 1



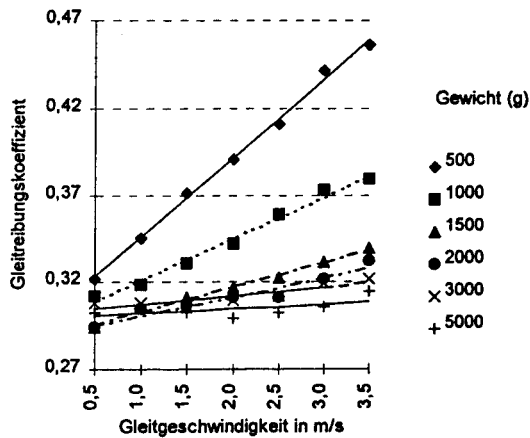
Bei Oberfläche 3 ist festzustellen, daß die Gleitreibwerte mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit immer weniger ansteigen. Bei einigen Meßreihen scheint sich sogar ein Grenzwert herauszubilden (vgl. Anhang). Daher approximiert in diesen Fällen ein Funktionsansatz, der auf dem Gesetz $y = A + B \cdot \ln(x)$ basiert, den Gleitreibbeiwert besser als der Ansatz $y = A + B \cdot \sqrt{x}$. Der Ansatz, der gewählt wurde, ist jedoch trotz der geringen Anzahl von Meßreihen mit Rücksicht auf die niedrigen Abweichungen unter dem Gesichtspunkt der praktischen Verwendbarkeit als ausreichend genau anzusehen. Da der physikalische Zusammenhang für das unterschiedliche Verhalten des Reibbeiwertes auf verschiedenen Oberflächen noch nicht geklärt ist, kann ein darauf basierender funktionaler Zusammenhang zur Zeit nicht hergestellt werden.

Vergleich der Messungen innerhalb des Testgutspektrums Schachtelware und Beutelware

Die Schachtelware kann zusammengefaßt werden in die Gruppen Faltschachteln (Testgut-Nr. 1, 2, 3) und Schachteln mit glattem Boden (Testgut-Nr. 4, 6). Diese Güter haben grundsätzlich verschiedene Bodenkonturen (s. Kap. 3.1.1.). Aufgrund der unterschiedlichen Auflagepunkte der Güter ist daher auch ein unterschiedliches Reibbeiwertverhalten zu erwarten.

Abb. 4-15. Kennfeld des Gleitreibwertes, Mittelwerte Faltschachteln (a) u. Schachteln m. glattem Boden (b), Oberfl. 1

a)



b)

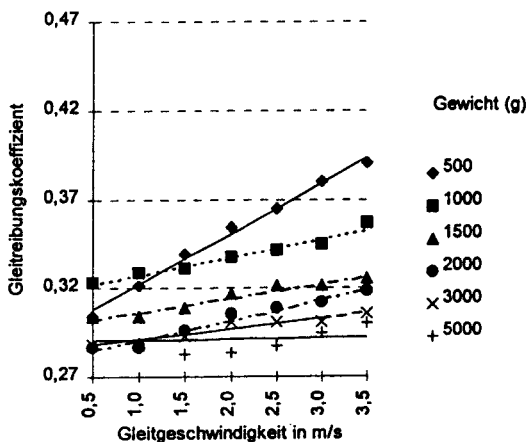
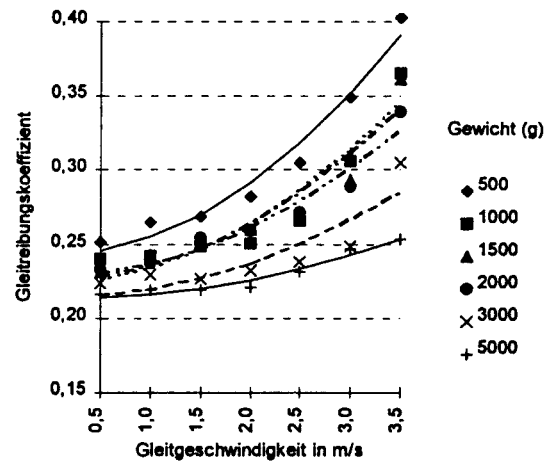
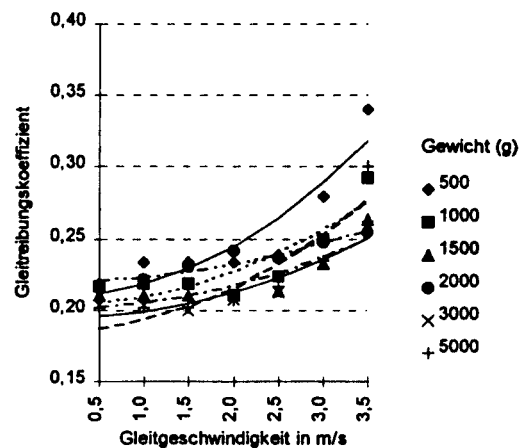


Abb. 4-16. Kennfeld des Gleitreibwertes, Mittelwerte Faltschachteln (a) u. Schachteln m. glattem Boden (b), Oberfl. 2

a)



b)



Wie aus den obenstehenden Grafiken deutlich wird, ist zwischen Faltschachteln, die zwei Laschen in Längsrichtung am Boden aufweisen und den Schachteln mit glattem Boden ein eindeutiger Unterschied festzustellen. Wie auch aus dem Vergleich des Koeffizienten B hervorgeht (s. Anhang), ist der Einfluß des Gutgewichtes auf den Reibbeiwert bei Schachteln mit glattem Boden deutlich geringer als bei Faltschachteln. Dieses Verhalten läßt sich sowohl auf der Oberfläche 1 als auch auf der Oberfläche 2 nachweisen. Die Ursachen für diese Ergebnisse sollen durch die Versuchsreihen im Kapitel 4.1.2.2 erforscht werden.

Die Beutelware läßt sich zusammenfassen in die Gruppen Polybeutel (Testgut-Nr. 8, 9, 10) und Papierbeutel (Testgut-Nr. 11). Der Gleitreibungskoeffizient der Gruppe Polybeutel liegt immer über dem der Gruppe Papierbeutel (bezogen auf 0,5 m/s). Zwischen diesen beiden Gruppen lassen sich keine weiteren signifikanten Unterschiede feststellen.

Aus den bisher angestellten Betrachtungen läßt sich folgende Übersicht des Gutverhaltens darstellen:

Tab. 4-5. Verhalten des Gleitreibungskoeffizienten, Übersicht

Testgut	Oberfläche	Parameter	
		Geschwindigkeit	Gutgewicht
Schachtelware	1	↑	↓
	2	↑	↓
	3	↑	↓
Beutelware	1	↔	↓
	2	↓	↔
	3	↔	↔

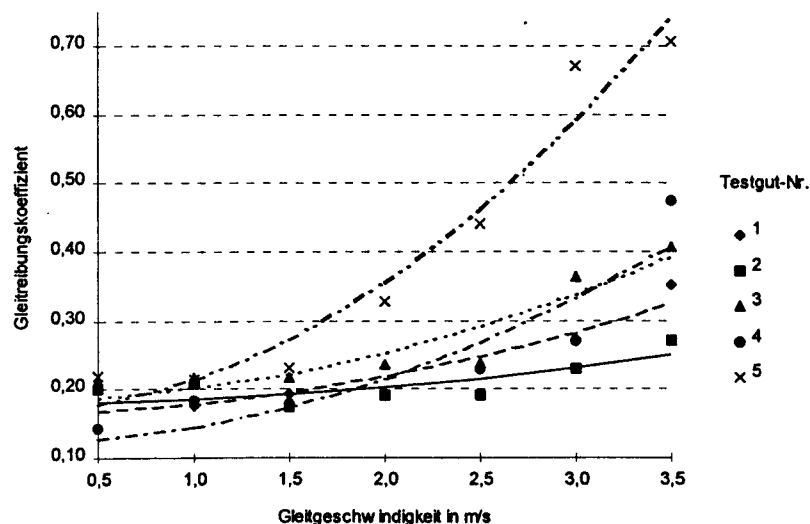
Tendenzen: ↔ indifferent ↑ steigend ↓ fallend

4.1.2.2 Messung des Reibungsverhaltens von Testgütern mit definierten Bodenkonturen bei verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten und verschiedenen Gewichtskräften

Reihe 1

Die Testgüter der ersten Meßreihe (s. Kap. 2.3.2) lassen sich unterteilen in die Testgüter 1 und 2 sowie die Testgüter 3, 4, und 5. Die ersten Testgüter sind Stülpdeckelschachteln, die zweiten Testgüter sind Faltschachteln. Alle Testgüter sind innerhalb ihrer Gruppe aus *einheitlichem Material*, haben aber verschiedene Größen.

Abb. 4-17. Darstellung des Gleitreibbeiwertverlaufs, Reihe 1, Oberfläche 2



Tab. 4-6. Tabelle der Koeffizienten, Reihe 1, Oberfläche 2

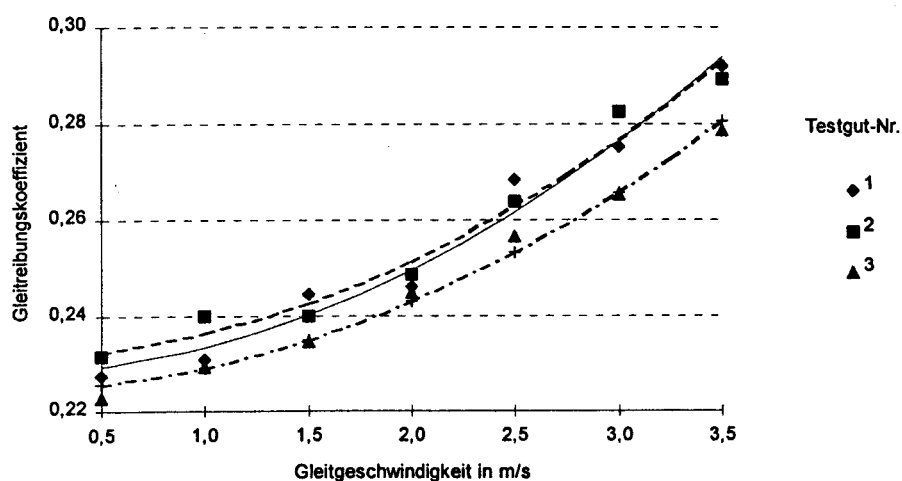
Testgut-Nr.	Schachtel Maße	A	B
1	342x240x132	0,167	0,013
2	462x340x172	0,181	0,006
3	330x250x132	0,185	0,017
4	410x310x132	0,123	0,023
5	500x400x200	0,168	0,047

Das Gesetz von Coloumb [zitiert nach 13], welches besagt, daß der Gleitreibbeiwert unabhängig von der tatsächlichen Berührungsfläche ist, läßt sich durch diese Versuche nicht nachweisen. Nach der Analyse der Versuche ist es wahrscheinlich, daß andere Effekte, wie z.B. der Luftwiderstand der Stirnfläche der Schachtel oder die Bodenkontur der Schachtel einen größeren Einfluß auf die gemessenen Gleitreibbeiwerte haben und die Vergleichbarkeit der Versuchsgüter und -läufe einschränken.

Reihe 2, Teil 1

In dieser Testreihe wurde untersucht, wie sich *drei verschiedene Schachtelgrößen* (bei ansonsten identischen Versuchsbedingungen) auf den Gleitreibbeiwert auswirken. In Kap. 3.1 wird der (theoretische) Einfluß erläutert, den Stirnfläche und Kartongestalt auf den Reibbeiwert haben. Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsreihen konnte festgestellt werden, daß der Reibbeiwert bei Schachtelware mit zunehmender Gutgeschwindigkeit steigt. Daher lag der Schluß nahe, daß neben der Reibpaarung auch die Gestalt des Gutes selbst einen Einfluß auf den Gleitreibbeiwert hat.

Abb. 4-18. Darstellung des Gleitreibbeiwertverlaufs, Reihe 2, Teil 1, Oberfläche 2



Wie aus der Abbildung hervorgeht, haben alle drei Güter in etwa den gleichen Anstieg der Näherungsfunktion. Dies geht auch aus der untenstehenden Tabelle hervor. Offensichtlich ist der Einfluß der Luftströmung auf die Stirnfläche und die Kartongestalt gering, da keine wesentliche Veränderung des Kurvenverlaufes zu erkennen ist.

Tab. 4-7. Tabelle der Koeffizienten und Tabelle der prozentualen Steigerung des Gleitreibbeiwertes, Reihe 2, Teil 1, Oberfläche 2

Schachtel Maße	Testgut-Nr.	A	B
342 x 240 x 132	1	0,228	0,005
410 x 310 x 132	2	0,231	0,005
500 x 400 x 200	3	0,225	0,005

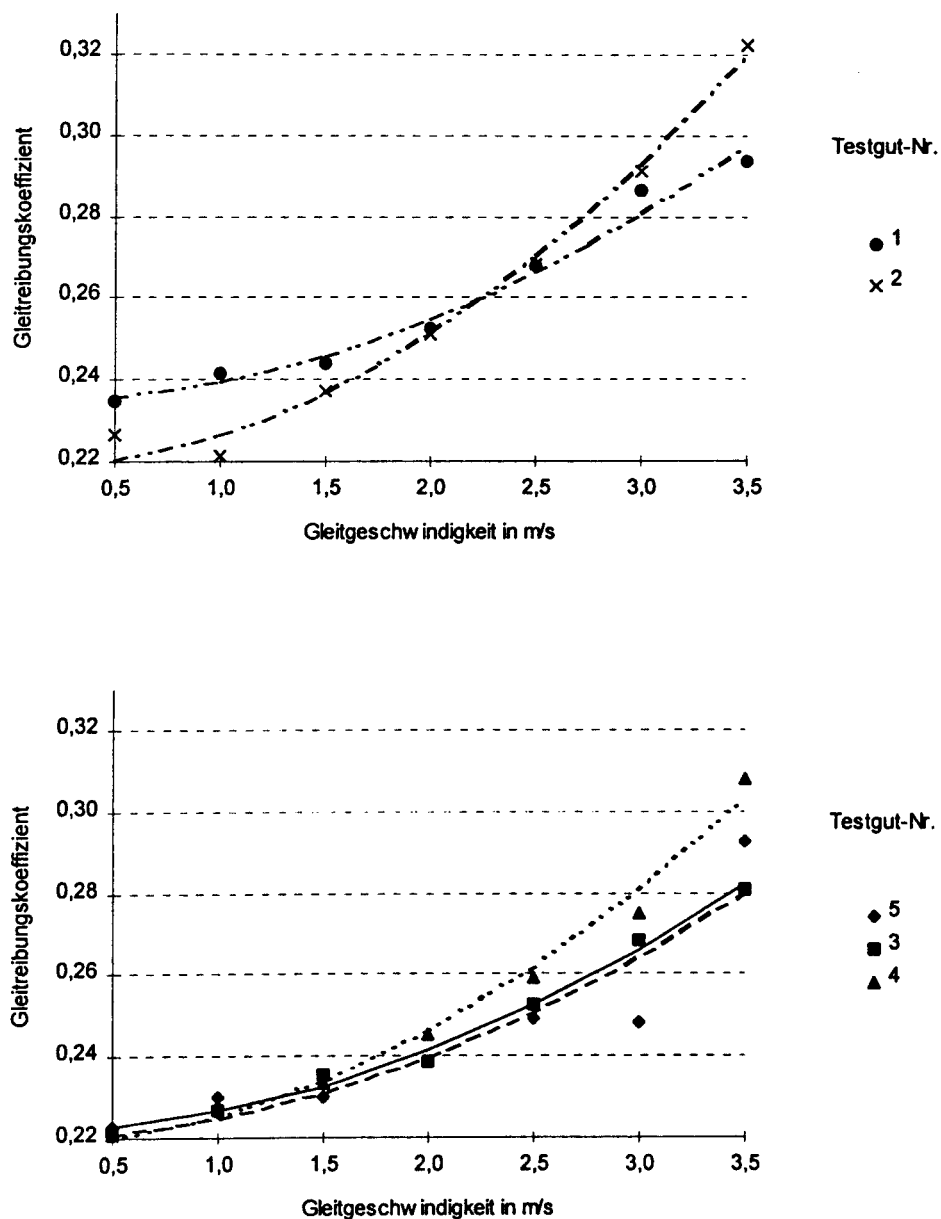
Schachtel Maße	Testgut-Nr.	0,5 m/s => 3,5 m/s	min => max
342 x 240 x 132	1	28,4%	28,4%
410 x 310 x 132	2	25,0%	25,0%
500 x 400 x 200	3	25,2%	25,2%

Die Koeffizienten der Näherungsfunktion ($y = A + B \cdot x^2$) sind bei allen Gütern etwa gleich, ebenso die Steigerung des Reibbeiwertes zwischen 0,5 und 3,5 m/s. Wie erwartet (vgl. Kap. 4.2) ist der Einfluß des Luftwiderstandes auf den Reibbeiwert minimal.

Reihe 2, Teil 2

Der erste Teil der Versuchsreihe klärte den Einfluß des Luftwiderstandes der gesamten Schachtel auf den Gleitreibbeiwert. Der zweite Teil dieser Reihe untersucht demgegenüber, welchen *Einfluß die Bodenkontur auf den Gleitreibbeiwert* hat. Daher wurden fünf verschiedene Bodenkonturen bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen miteinander verglichen.

Abb. 4-19. Darstellung des Gleitreibbeiwertverlaufs, Reihe 2, Teil 2, Oberfläche 2



Tab. 4-8. Tabelle der Koeffizienten und Tabelle der prozentualen Steigerung des Gleitreibbeiwertes, Reihe 2, Teil 2, Oberfläche 2

Schachtel Maße	Testgut-Nr.	A	B
plan ohne Einlauf	1	0,234	0,005
plan mit Einlauf	2	0,218	0,008
zwei Längskufen	3	0,222	0,005
zwei Querkufen	4	0,218	0,007
vier Eckenkufen	5	0,220	0,005

Schachtel	Testgut-Nr.		
		0,5 m/s => 3,5 m/s	min => max
plan ohne Einlauf	1	24,9%	24,9%
plan mit Einlauf	2	42,3%	45,7%
zwei Längskufen	3	26,8%	26,8%
zwei Querkufen	4	39,4%	39,4%
vier Eckenkufen	5	31,3%	31,3%

Der Vergleich der verschiedenen Bodenkonturen ist differenziert zu betrachten, da nach der Berührungsfläche der Güter und der Breite der Strömungskante in Gleitrichtung unterschieden werden muß (vgl. Bild 2-8.). Als Näherungsfunktion wurde wie für alle Schachteln ebenfalls die Gleichung $y = A + B * x^2$ angesetzt.

Die beiden ersten Testgüter haben *gleich große Auflageflächen*. Bei Gut 2 ist jedoch auf der gesamten Breite des Gutes eine Einlaufkante vorgesehen.

Aus den Messungen geht hervor, daß das Testgut 2 fast eine Verdopplung des Gleitreibbeiwertes erzielt. Aufgrund der Einlaufkante kann sich eine Luftströmung unter dem Gutboden ausbilden (vgl. Kap. 3.1). Diese Luftströmung führt zu einem erhöhten Anpreßdruck des Gutes, was wiederum zu einer scheinbaren Steigerung des Gleitreibbeiwertes führt. Der Offset (Koeffizient A) des Gutes 1 liegt jedoch höher als bei Gut 2, da dort eine scharfe Stoßkante gegen die Gleitrichtung wirkt. Der Modellansatz aus Kap. 3.1 wird mit diesen Beobachtungen bestätigt.

Korrekterweise müßte der Gleitreibbeiwert *Widerstandsbeiwert* heißen, da die Abhängigkeit von der Reibpaarung nur den Offset des Gleitreibungskoeffizienten liefert.

Die Güter 3, 4 und 5 haben alle die gleiche Berührungsflächengröße, jedoch *unterschiedliche Konturen*. Der Offset der drei Güter liegt in etwa in der gleichen Höhe wie bei Gut 2, da die Einlaufkante gleich gestaltet war. Die Steigerungsrate von Gut 4 kommt Gut 2 am nächsten, da dort eine ähnliche Form vorlag. Lediglich in der Mitte des Gutes ist ein Bereich, der nicht zur Anpreßdruckerhöhung beiträgt; wahrscheinlich liegt daher die Steigerungsrate etwas niedriger als bei Gut 2. Diese Tatsache spiegelt sich auch in der Höhe im Koeffizienten B wieder.

Die Güter 3 und 5 haben die gleichen Anströmverhältnisse; daher ist dort in etwa die gleiche Steigerung des Reibbeiwertes zu verzeichnen (siehe auch Koeffizient B). Die Unterschiede zwischen diesen beiden Bodenkonturen lassen sich nicht zweifelsfrei klären.

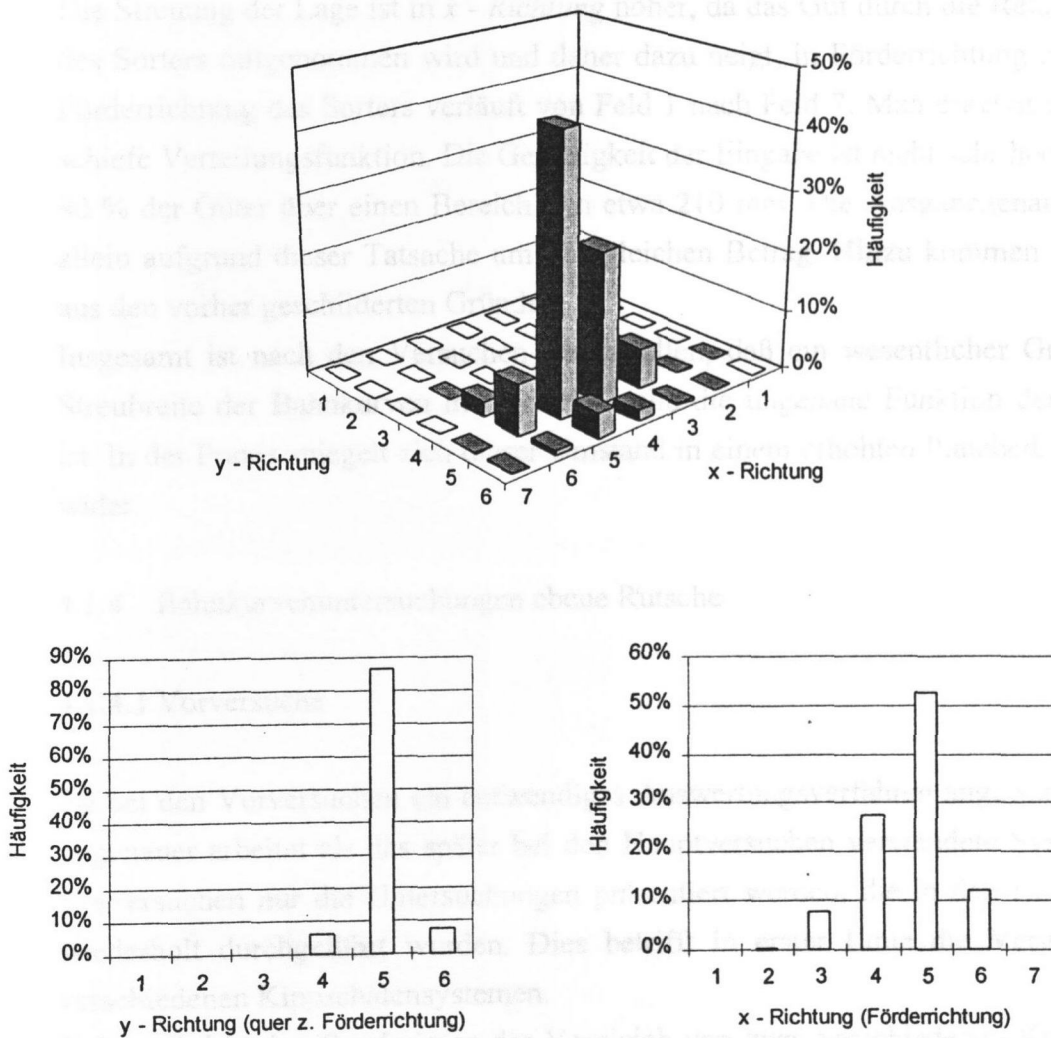
4.1.3 Lage der Güter auf dem Kippschalenelement

Bei der Auslegung von Endstellen an Kippschalensortern ist es wichtig, die Lage der Güter auf der Kippschale zu kennen. Nach dem Eingabepunkt, von wo aus die Güter auf die Kipp-

schale aufgegeben werden, kommen die Waren je nach Reibungsverhältnissen an einem anderen Punkt der Schale zum liegen. Für die Berechnung der Abwurfbahn ist es daher wichtig, einschätzen zu können, in welchem Bereich der Schale sich die Güter befinden. Aus dem Aufenthaltsbereich der Güter auf der Schale kann ein Offsetbereich der Rutsche ermittelt werden, von dem aus die Güter von der abgekippten Schale in den Bereich des Transferbleches der Rutschenkonstruktion übergehen. Dieser Streubereich liefert die äußeren Ränder (linker und rechter Offsetpunkt) zur Errechnung der begrenzenden Bahnkurven in der Rutsche (vgl. Kap 4.2.2.1).

Aus den Versuchen ergab sich das untenstehende Histogramm der Schwerpunktlagen der Güter.

Abb. 4-20. Histogramm der Schwerpunktlagen, gesamte Kippschale (oben), in Förderrichtung summiert (rechts), quer z. Förderrichtung summiert (links)



Die automatische Aufgabestation gab in *y-Richtung* von der Seite der *y*-Spalte 6 auf. Daher ist auch die einseitige Lage der Güter quer zur Förderrichtung zu erklären. Die Aufgabegeschwindigkeit ist einstellbar und in der Praxis wird versucht, das Gut "aufzuschießen", ohne

Gefahr zu laufen, über die andere Schalenseite hinauszukommen. Daher erklärt sich die einseitige Lage des Medians zur Aufgabeseite hin. Die Aufgabegenauigkeit ist höher als erwartet, auch wenn es sich um nahezu einheitliche Beutelware handelt. Die Toleranz quer zur Förderrichtung an der Abwurfstelle beeinflusst maßgeblich die Zeit bis zur Übergabe des Gutes auf das Rutschenblech. Das Gut rutscht ab, nachdem die Schale in Abkipposition gebracht wurde. In der Zwischenzeit bewegt sich die Kippschale aufgrund der Sortergeschwindigkeit weiter. Daher ist eine zentrierte Lage der Güter auf der Schale in y -Richtung sehr wichtig.

Die Reproduzierbarkeit der Aufgabe bei unterschiedlichen Gewichten und Beutelgrößen ist sehr hoch, da jedes Feld in y -Richtung (4, 5, 6) eine Breite von nur 116 mm hat. Trotzdem kommen etwa 86 % der Aufgaben auf das gleiche Feld. In den meisten Fällen bleibt der Schwerpunkt daher innerhalb eines Bereiches von 116 mm. Für den Ausgabeoffset bedeutet dies, daß die Abwurfgenauigkeit dadurch nicht gravierend beeinflusst wird.

Die Streuung der Lage ist in x -Richtung höher, da das Gut durch die Relativgeschwindigkeit des Sorters mitgenommen wird und daher dazu neigt, in Förderrichtung zu verrutschen. Die Förderrichtung des Sorters verläuft von Feld 1 nach Feld 7. Man erkennt deutlich eine linkschiefe Verteilungsfunktion. Die Genauigkeit der Eingabe ist nicht sehr hoch, es verteilen sich 80 % der Güter über einen Bereich von etwa 210 mm. Die Ausgabegenauigkeit streut daher allein aufgrund dieser Tatsache um den gleichen Betrag. Hinzu kommen die Abweichungen aus den vorher geschilderten Gründen.

Insgesamt ist nach den Versuchen festzustellen, daß ein wesentlicher Grund für die große Streubreite der Bahnkurven in einer Endstelle die ungenaue Funktion der Aufgabestationen ist. In der Praxis spiegelt sich dieser Umstand in einem erhöhten Platzbedarf der Sorteranlage wider.

4.1.4 Bahnkurvenuntersuchungen ebene Rutsche

4.1.4.1 Vorversuche

Da bei den Vorversuchen ein aufwendiges Auswertungsverfahren angewandt wurde, welches ungenauer arbeitet als das später bei den Hauptversuchen verwendete System, sollen in den Vorversuchen nur die Untersuchungen präsentiert werden, die in den Hauptversuchen nicht wiederholt durchgeführt wurden. Dies betrifft in erster Linie die Verwendung von zwei verschiedenen Kippschalensystemen.

Daher wird in den Ergebnissen der Vergleich von zwei verschiedenen Kippschalensystemen anhand der Bahnkurven und den gemessenen Bahngeschwindigkeiten erörtert.

Vergleich des Geschwindigkeitsverlaufes

Beim Abwerfen der Güter an der Endstelle eines Sortiersystems verlassen die Güter je nach verwendetem Sortertyp mit unterschiedlichen Abwurfgeschwindigkeiten den Sorter. Aufgrund der Anfangsgeschwindigkeiten in x und y-Richtung (die x-Richtung ist immer die Richtung des Förderers, die y-Richtung liegt dazu senkrecht in der Rutschenebene abwärtsgerichtet, vgl. Abb. 4-25) ergeben sich verschiedene Verläufe. Die Abhängigkeiten zwischen beiden Richtungen werden neben dem Neigungswinkel der Rutsche auch vom unterschiedlichen Reibungsverhalten der Stückgüter beeinflusst.

Abb. 4-21. Geschwindigkeitsprofil Kippschale Typ I, 1,5 m/s, Mittelwert aller Güter

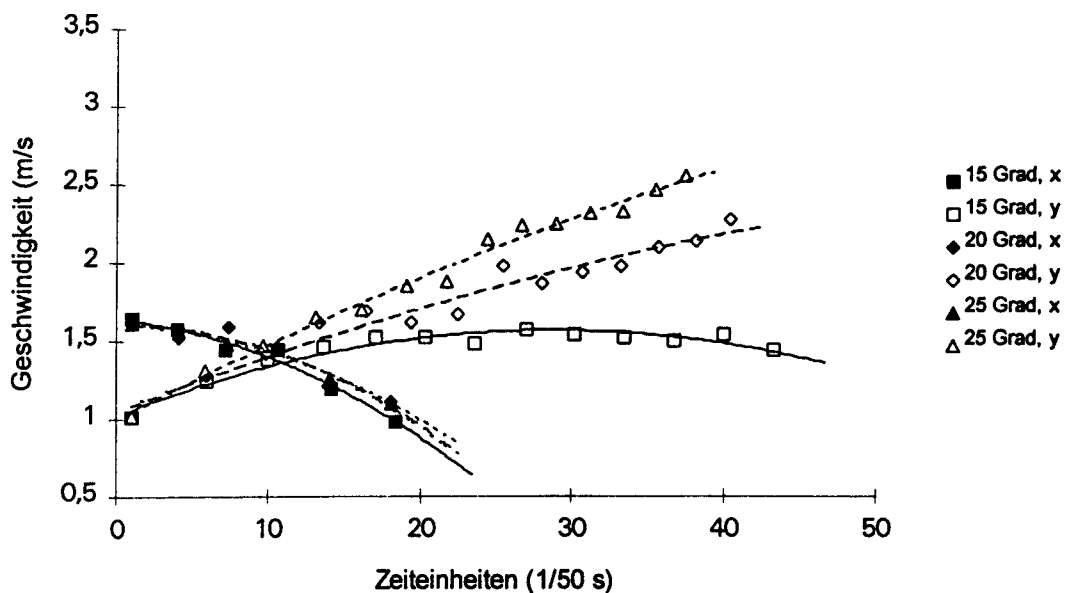
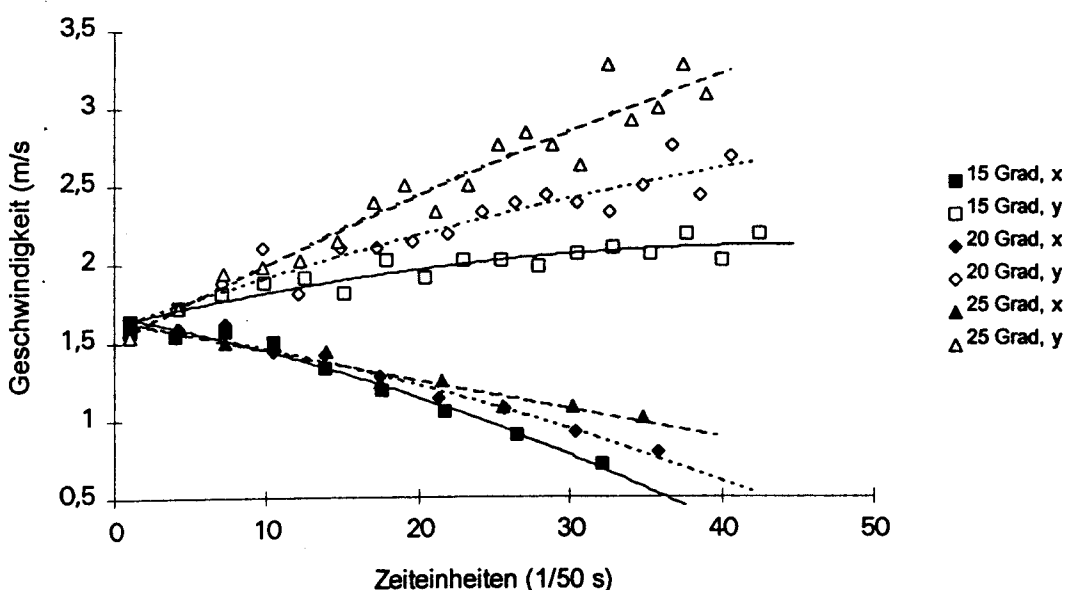


Abb. 4-22. Geschwindigkeitsprofil Kippschale Typ II, 1,5 m/s, Mittelwert aller Güter



Wie man aus den Ergebnissen der Messungen erkennt, ist bei beiden verwendeten Kippschalentypen (vgl. Kap. 2.5.1) eine klare Abhängigkeit der Geschwindigkeiten vom Neigungswinkel der Gleitebene gegeben. Die Gleitgeschwindigkeiten der Testgüter steigen mit zunehmendem Neigungswinkel. In x-Richtung nimmt die Geschwindigkeit ab, in y-Richtung nimmt die Geschwindigkeit zu. Dieses Verhalten war nach den Vorüberlegungen zum Versuch zu erwarten.

Interessant ist die Abhängigkeit des Gutverhaltens vom verwendeten Kippschalentyp. Beim Typ I, der eine konventionelle Kippbewegung zu einer Rutschenseite ausführt, ergibt sich eine *niedrige Anfangsgeschwindigkeit der Güter in y-Richtung*. Der andere Kippschalentyp verursacht hingegen höhere Anfangsgeschwindigkeiten in Rutschenrichtung. Dieser Offset führt insgesamt zu höheren Endgeschwindigkeiten als bei Typ I. Im Sinne einer geringeren Beschädigungsgefahr für die Güter soll die Geschwindigkeit, mit der ein Gut auf ein anderes in der Rutsche befindliches Gut prallt, niedrig sein. Der konventionelle Kippschalentyp I trägt dieser Forderung besser Rechnung.

Im Vergleich der Geschwindigkeiten in der x-Richtung liegen beide Typen in etwa auf dem Niveau der Fördergeschwindigkeit des Sorters, was zu erwarten war. Durch das insgesamt höhere Geschwindigkeitsniveau bei Typ II wird die Geschwindigkeit in x-Richtung mitbeeinflusst; sie nimmt im Verlaufe der Rutschbewegung langsamer ab als bei Typ I.

Vergleich des Bahnkurvenverhaltens

Aufgrund des unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus der verschiedenen Kippschalentypen war auch ein Unterschied im Bahnkurvenverlauf zu erwarten. Bei der Betrachtung der Bahnkurven wurden die äußeren, begrenzenden Kurven, die in den Versuchen reproduzierbar auftraten, abhängig von der Rutschenneigung dargestellt. Innerhalb dieser begrenzenden "Hüllkurven" liegt somit der Streubereich aller Waren, vom leichten Polybeutel bis zur schweren Deckelschachtel. Diese Betrachtung läßt einen Rückschluß auf die Breite und den Platzbedarf der Endstellenrutsche zu. Diese Parameter sind wesentlich für die Auslegung einer Endstelle. Für die Erstellung der Diagramme wurden nur Meßpunkte verwendet, die in allen drei Wiederholungen der Versuchsläufe erreicht wurden.

Beim Kippschalentyp I sollte die Endstelle bei langsamen Sortergeschwindigkeiten in etwa rechtwinklig zur Sorterrichtung verlaufen, da nach einem Meter Rutschenlänge fast nur noch Gleitgeschwindigkeit in y-Richtung vorhanden ist. Bei höheren Sortergeschwindigkeiten steigt dieser Winkel auf etwa 40 Grad (1,7 m/s). Die Empfindlichkeit des Kippschalentyps gegenüber einer Steigerung der Sortergeschwindigkeit ist damit wesentlich höher als bei Typ II. Die Streubreite der Bahnkurve liegt nach einem Meter Rutschenlänge bei etwa 470 mm und ist damit geringfügig breiter als bei Typ II.

Abb. 4-23. Hüllkurven Kippschale Typ I, 1,3 m/s, Mittelwert aller Güter

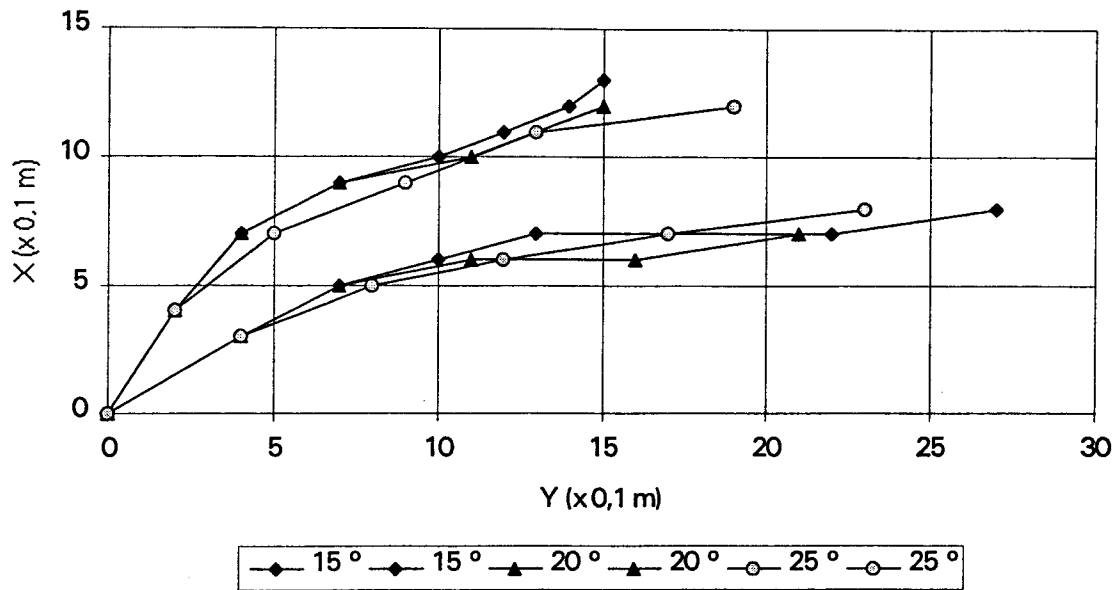
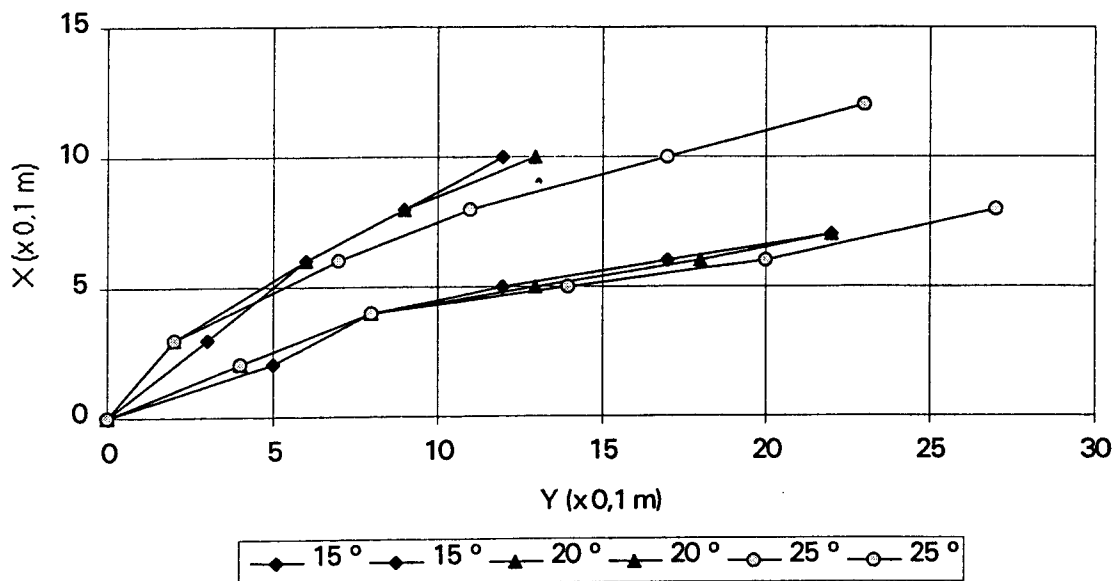


Abb. 4-24. Hüllkurven Kippschale Typ II, 1,3 m/s, Mittelwert aller Güter



Aufgrund der Darstellungen wird deutlich, daß der Kippschalentyp II aufgrund seiner hohen Geschwindigkeiten in y-Richtung (d.h. Rutschenabwärts) eine *schmalere Streubreite der Bahnkurven* erzeugt als der Typ I. Die Streubreite ist insgesamt weniger stark gekrümmt. Diese Tatsache erleichtert eine schmale, abgewinkelte Endstelle. Bei dieser Fördergeschwindigkeit des Sorters (1,3 m/s) sollte die Endstelle um etwa 20 Grad zur Förderrichtung des Sorters angewinkelt werden. Bei höheren Sortergeschwindigkeiten steigt dieser Winkel auf etwa 35 Grad (1,7 m/s) (vgl. a. die detaillierteren Ergebnisse aus Kap. 4.1.5). Die Streubreite der Bahnkurve liegt einen Meter nach dem Verlassen des Sorters bei etwa 440 mm.

Der Einfluß des Neigungswinkels auf die Bahnkurvenbreite ist bei beiden Kippschalentypen vernachlässigbar.

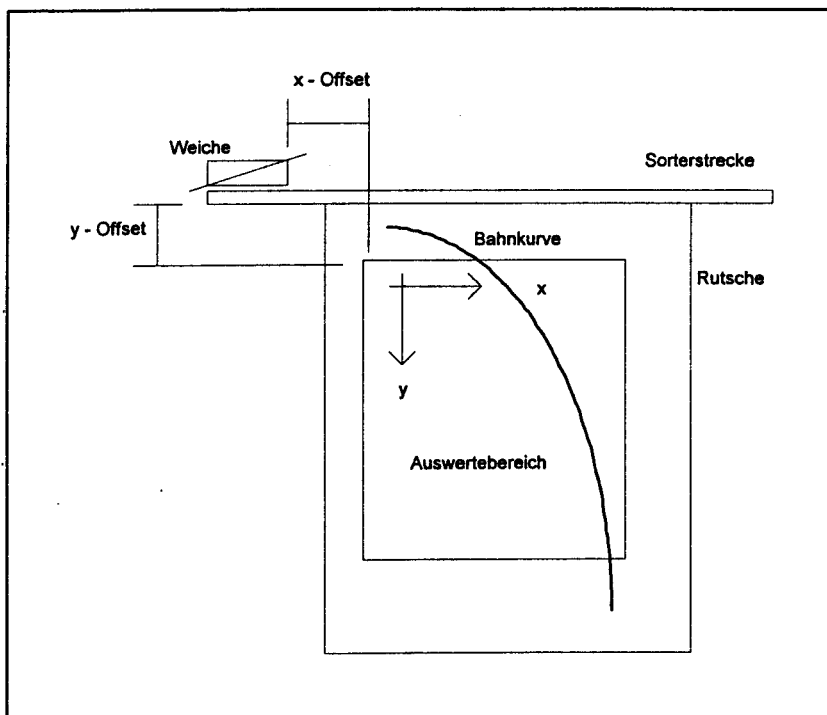
Aufgrund weiterer Versuche bei höheren Sortergeschwindigkeiten konnte festgestellt werden, daß die Streubreite der Bahnkurven bei höheren Geschwindigkeiten speziell beim Kippschalentyp II abnimmt, während die Streubreite beim Typ I zu höheren Sortergeschwindigkeiten sogar leicht zunimmt.

4.1.4.2 Hauptversuche

Die Hauptversuche werden über eine Bildverarbeitungssoftware ausgewertet, die unmittelbar die Bahnkurve des Schwerpunktes des Gutes in Absolutkoordinaten (bezogen auf das Auswertungsfenster) ausgibt. Der Offset, der zwischen dem Auswertungsbereich und dem Abwurfpunkt des Sorters besteht, wird von der Auslösevorrichtung bis zum Koordinatenursprung des Auswertungsbereiches gemessen.

Die Darstellung der Bahnkurven wird im Koordinatensystem des Auswertungsfensters vorgenommen. Dadurch, daß die optische Achse der Kamera nicht genau orthogonal zur Rutschen-ebene steht, entsteht ein Darstellungsfehler in beiden Ebenen des Auswertungsbereiches. Dieser Fehler (im vorliegenden Fall höchstens 7 % des ermittelten Bahnkoordinatenwertes) wurde mittels EXCEL-Makroprogrammen softwaremäßig kompensiert.

Abb. 4-25. Darstellung des Auswertebereiches mit Koordinatensystem



Falls der Offset während der Versuche verändert werden mußte, wurde diese Änderung später in den Auswertungsdateien korrigiert, so daß sich alle Bahnkurven in Absolutwerten mit

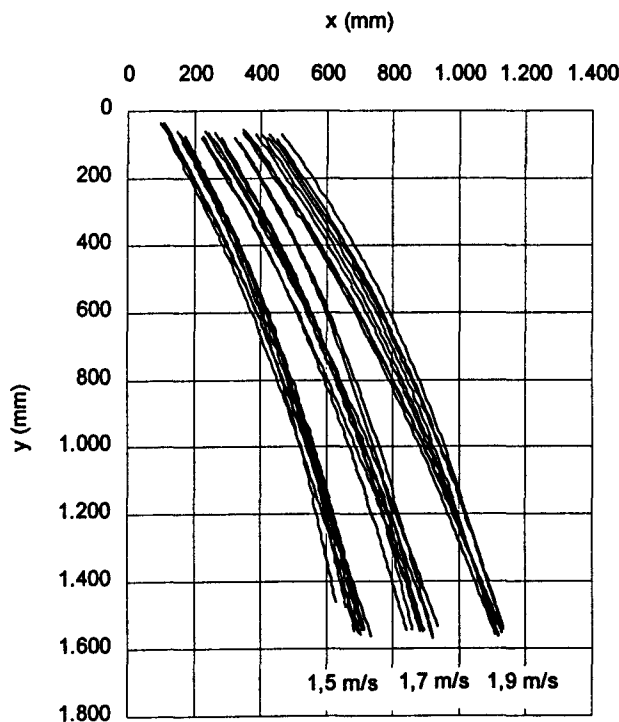
einem Ursprung darstellen lassen. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit, die Verschiebung des Ausgabepunktes bei verschiedenen Sortergeschwindigkeiten direkt mitzubetrachten. Die Darstellungen der Geschwindigkeitsverläufe wurden mit EXCEL-Makroprogrammen über Näherungsfunktionen (Polynome 3.Ordnung) geglättet, um einen gut ablesbaren Verlauf zu erhalten.

Alle Bahnkurven und die Geschwindigkeitsverläufe der Testgüter werden für alle Geschwindigkeitsstufen und für alle Rutschenneigungswinkel im *Anhang* dargestellt.

Vergleich des Bahnkurvenverhaltens

Zunächst wurde die Veränderung des Verhaltens bezogen auf die verschiedenen Sortergeschwindigkeit bei einem festen Neigungswinkel der Rutsche betrachtet.

Abb. 4-26. Bahnkurven bei einem Neigungswinkel von 15 Grad, alle Geschwindigkeiten, alle Testgüter

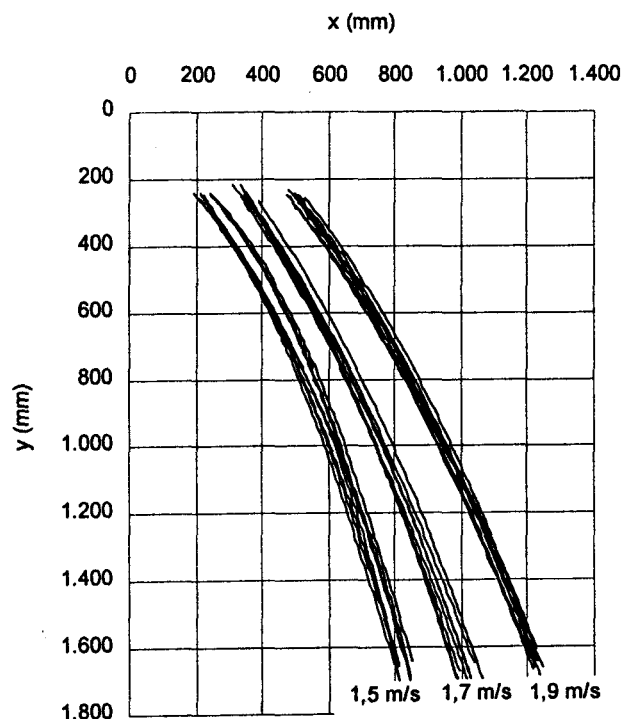


Man erkennt bei der langsamsten Sortergeschwindigkeit von 1,5 m/s, daß die Abwurfpunkte des Sorters wenig streuen, da die Anfangswerte der Bahnkurven nur etwa 70 mm auseinanderliegen. Bei den nächsten Geschwindigkeitsstufen liegen die Streubreiten wesentlich höher; je höher die Geschwindigkeit, desto höher wird die Streuung.

Auffallend ist, daß alle drei Geschwindigkeitsstufen in der Darstellung der Bahnkurven eine Einschnürung aufweisen. Diese Einschnürung wandert bei hohen Sortergeschwindigkeiten immer weiter zum Rutschenende hin. Die Verengung der Streubreite kann an diesem Punkt bis zu 50 % betragen.

Der Grund für diese Einschnürung liegt im geschwindigkeitsabhängigen Reibungsverhalten der Güter. Schnell rutschende Güter werden auf dieser Testoberfläche verhältnismäßig stärker gebremst als langsam rutschende Güter (vgl. Kap. 4.1.2.1). Dadurch entsteht ein gewisser Kompensationseffekt zum Ausgleich unterschiedlicher Rutschgeschwindigkeiten. Durch die Bremsung schneller Güter vor allem in x-Richtung, wo keine entgegen wirkende Hangabtriebskraft auf das Gut einwirkt, entsteht eine starke Verkürzung des Geschwindigkeitsvektors in diese Richtung. Dadurch krümmt sich die Bahn stärker, der resultierende Vektor der Reibungskraft in der Ebene wirkt mehr entgegen der Hangabtriebskraft. Die Geschwindigkeit der langsamen Güter wird weniger progressiv abgebaut. Daher ist die Krümmung der Bahnkurve weniger stark. Im Verlauf der Bewegung kann es somit vorkommen, daß sich die Bahnen des langsamen Gutes mit der Bahn des schnellen Gutes kreuzen. Dadurch kommt es zu einer *Einschnürung des Streubereiches*. Bei hohen Sortergeschwindigkeiten verlagert sich diese Einschnürung zum Rutschenende hin, da aufgrund der Fördergeschwindigkeit zum einen eine Streuung des Abwurfbereiches entsteht (vgl. Kap. 4.2.2.1) und zum anderen das Gleitgeschwindigkeitsniveau insgesamt so hoch liegt, daß eine Kreuzung der Kurven erst später (örtlich) im Verlauf der Kurve möglich ist.

Abb. 4-27. Bahnkurven bei einem Neigungswinkel von 20 Grad, alle Geschwindigkeiten, alle Testgüter

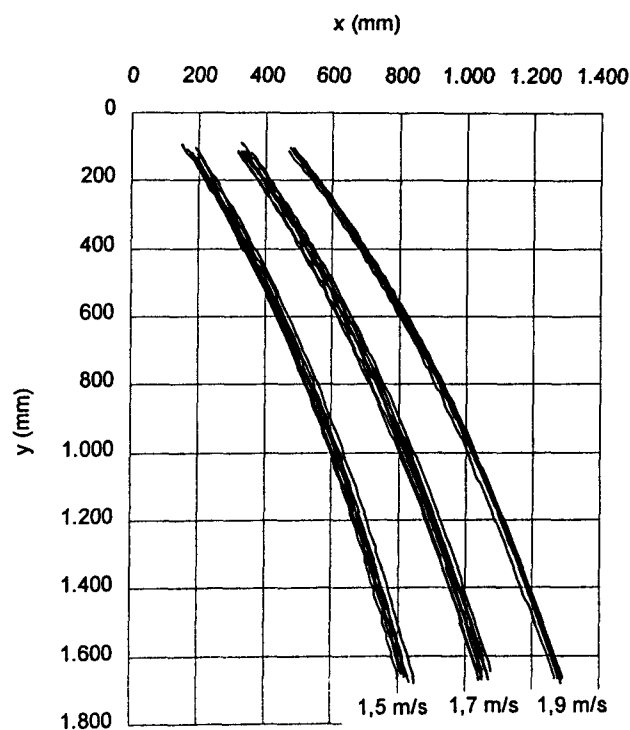


Bei den anderen Neigungswinkeln (20 und 25 Grad) *nimmt die Streuung der Bahnkurven ab*. Daher ist eine Einschnürung der Bahnkurven nicht mehr zu erkennen; außerdem tritt aufgrund

der erhöhten Neigung eine "Fokussierung" der Kurven erst außerhalb des Beobachtungsbereiches der Kamera auf.

Der Effekt der "Fokussierung" der Bahnkurven konnte mit dem Berechnungsmodell nachgewiesen werden. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 4-45 zu finden.

Abb. 4-28. Bahnkurven bei einem Neigungswinkel von 25 Grad, alle Geschwindigkeiten, alle Testgüter



Die Verringerung der Streubreite der Bahnkurven ist eindeutig erkennbar. Während bei 15 Grad Neigung die Streubreite bis zu 120 mm betrug, liegt sie bei 20 Grad Neigung maximal bei 70 mm, bei 25 Grad bei etwa 40 mm.

Diese Verringerung der Streubreite basiert ebenfalls darauf, daß die Gleitreibungsbeiwerte geschwindigkeitsabhängig sind. Bei *hohen Gleitgeschwindigkeiten* im Bereich der Grenzwerte (vgl. Gl. 5-1.) liegen die Reibungsbeiwerte ebenfalls auf einem hohen Niveau. Aufgrund der dadurch ausgelösten Verzögerung findet eine *weitere Bündelung der Bahnkurven* statt. Zum anderen kommt hinzu, daß bei einem größeren Rutschenneigungswinkel die Hangabtriebskomponente (y -Richtung) der einwirkenden Kräfte steigt und somit verhindert, daß die Güter nach dem Verlassen der Kippschale weit (in x -Richtung) streuen.

Vergleich des Bahnkurvenverhaltens zwischen Schachtel- bzw. Beutelware

Der Vergleich der Kurven für Schachteln bzw. Beutel zeigt, daß *Schachtelware in jeder Versuchsreihe deutlich weniger streut als Beutelware* (s. Anhang). Selbst bei hohen Sortergeschwindigkeiten und Neigungswinkeln (bei denen die festgestellte Bündelung der Kurven eintritt), liegt die Streuung der Beutel über der Streuung der Schachteln.

Abb. 4-29. Beispiel Streubreite der Bahnkurven bei Beuteln, 1,9 m/s, Neigung 25 Grad

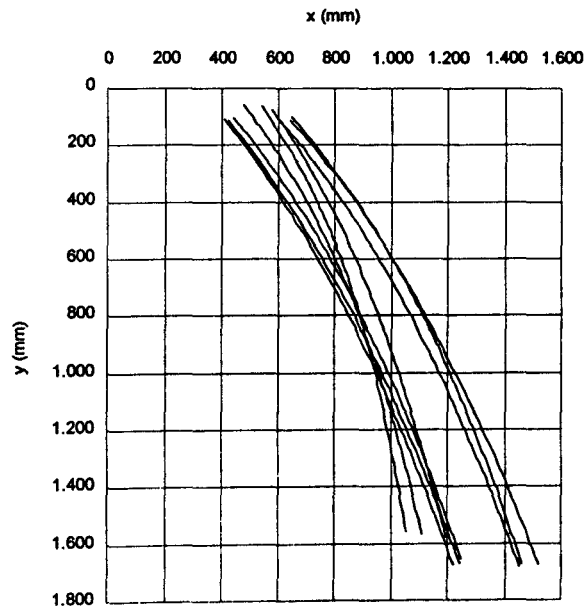
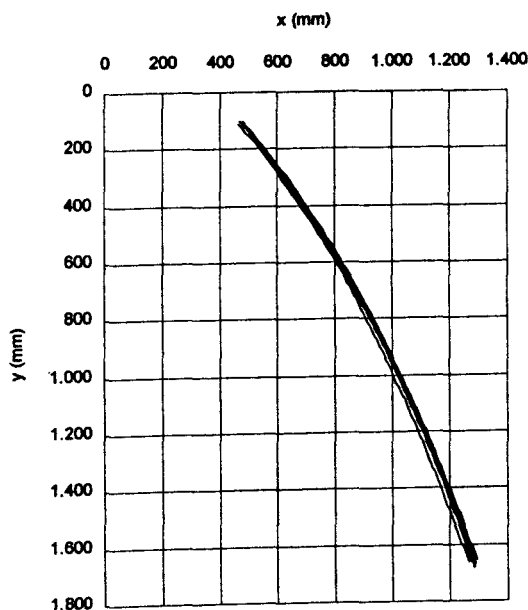


Abb. 4-30. Beispiel Streubreite der Bahnkurven bei Schachteln, 1,9 m/s, Neigung 25 Grad



Obwohl die Schachtelware wesentlich stärker streuende Reibbeiwertsverläufe hat, streuen die Bahnkurven der Beutelware offensichtlich breiter. Aus den Einzeltestgütern des Testbereichs Beutelware läßt sich keine Tendenz feststellen. Es wird lediglich deutlich, daß der Einfluß verschiedener Beladung auf die Einzeltestgüter nicht stark einwirkt, da alle Kurven eines Testgutes eng beieinanderliegen. Interessanter ist die Tatsache, daß die Streuung im wesentlichen durch einen *variierenden Ausgabeoffset* des Kippschalensorters bestimmt wird. Die Beladung der Güter kann dafür keine Ursache sein, da alle Güter mit dem gleichen Material und in der gleichen Weise beladen wurden. Die Position auf der Kippschale könnte ein Grund für die Verschiebung sein, da nicht bei jedem Versuch gewährleistet werden konnte, daß der Schwerpunkt der Beutelware in der Mitte der Schale lag. Da die Streuung etwa 250 mm beträgt, erscheint es unwahrscheinlich, daß diese Erklärung auf alle Versuchsläufe zutreffend ist. Es ist anzunehmen, daß die Beutelware aufgrund ihrer Instabilität zu einer dynamischen Veränderung des Gleitverhaltens während des Bewegungsvorgangs führt. Die Beobachtung kann in der Praxis an Sorteranlagen beobachtet werden. So kommt es vor, daß Güter in Polybeuteln während des Rutschens auf einmal abbremsen und sich nur noch kriechend weiterbewegen. Da dieses Verhalten besonders bei sehr leichter und flexibler Ware auftritt, erscheint es denkbar, daß sich Hohlräume zwischen Beutel und Gleitfläche ausbilden, die durch den Rutschvorgang evakuiert werden. Dadurch entsteht ein "Ansaugen" der Ware, welches eine starke Verzögerung der Rutschbewegung verursacht. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit dem Gleitvorgang zweier Glasplatten, die dadurch aneinander haften bleiben.

Tab. 4-9. Verhalten der Güter bzgl. des Bündelungseffektes der Bahnkurven, Übersicht

Testgut	Parameter	
	Neigungswinkel (Grad)	Sortergeschwindigkeit steigend
		Verhalten der Kurven
Schachtelware	15	↑
	20	↓
	25	↓
Beutelware	15	↔
	20	↓
	25	↓

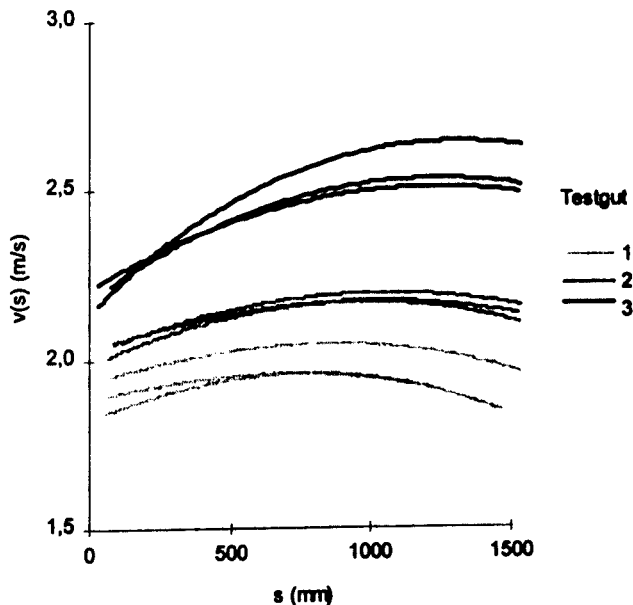
Tendenzen: ↔ indifferent ↑ Aufweitung ↓ Bündelung

Vergleich des Geschwindigkeitsverlaufes der Stückgüter am Beispiel der Schachtelware

Wie schon aus den oben aufgeführten Diagrammen deutlich wurde, ist die Bewegung der Güter stark geprägt durch den Einfluß des Neigungswinkels der Rutsche.

Um innerhalb des zur Verfügung stehenden Testfeldes den Effekt der geschwindigkeitsabhängigen Reibung auf die Gutgeschwindigkeit deutlich zu machen, ist es notwendig, den Rutschenwinkel flach zu wählen. Bei einem Winkel von 15 Grad liegt der Neigungswinkel nah am Gleitreibwinkel. Damit macht sich bei der Rutschbewegung der geschwindigkeitsabhängige Einfluß der Reibung schnell bemerkbar. Das Gut kommt in den Bereich der Grenzgeschwindigkeit (vgl. Gl. 5-1.), bei der sich Hangabtriebskraft und Reibkraft die Waage halten. In den untenstehenden Diagrammen werden die Gesamtgeschwindigkeitsverläufe über dem zurückgelegten Rutschweg dargestellt. Als Testgut wird Schachtelware verwendet; jedes Gut wird bei drei verschiedenen Beladungszuständen dargestellt, 1kg, 2kg und 3kg (vgl. Tab. 2-11.).

Abb. 4-31. Geschwindigkeitsverlauf $v(s)$ bei einem Neigungswinkel von 15 Grad, Geschwindigkeit 1,5 m/s, Schachtelware



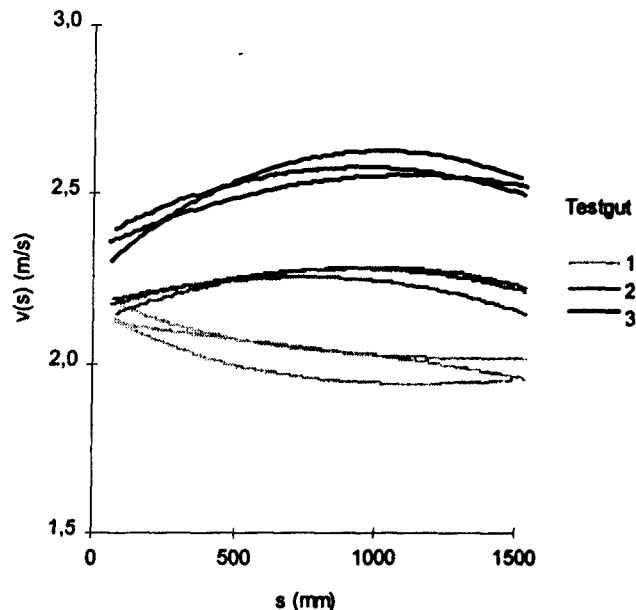
Bei niedriger Sortergeschwindigkeit (1,5 m/s) wird deutlich, daß sich die Geschwindigkeit bei Testgut 3 auf rund 2,7 m/s steigern kann, bevor die stärker werdende Reibkraft die Gleitgeschwindigkeit begrenzt. Die Kurve verflacht zu höheren Geschwindigkeiten hin.

Aus den Messungen der Reibbeiwerte geht hervor, daß z.B. das Testgut 3 (Deckelschachtel, Postpaket) speziell bei einem Gewicht von drei Kilogramm bei Geschwindigkeiten um 2,7 m/s einen Reibbeiwert von etwa 0,27 hat. Die entspricht einem Gleitreibwinkel von 15 Grad. Damit kommt dieses Gut in den *Grenzbereich der Gleitgeschwindigkeit*. Wenn dieser (gutspezifische) Grenzbereich erreicht wird, ist bei diesem Neigungswinkel der Rutsche *keine weitere Geschwindigkeitserhöhung mehr möglich*.

Die anderen beiden Schachteltypen, Testgut 1 (Faltschachtel mit Kunststoffklebeband) und 2 (Stülpedeckelschachtel), liegen schon bei etwa 2,0 bis 2,1 m/s an der Grenzgeschwindigkeitsschwelle. Daher verläuft die Geschwindigkeit bei diesen Testgütern nahezu konstant. Die

Reduzierung der Geschwindigkeit am Ende der Rutsche entsteht durch die Bremsung des Gutes in x-Richtung, die sich dem Gesamtgeschwindigkeitsverlauf überlagert.

Abb. 4-32. Geschwindigkeitsverlauf $v(s)$ bei einem Neigungswinkel von 15 Grad, Geschwindigkeit 1,7 m/s, Schachtelware

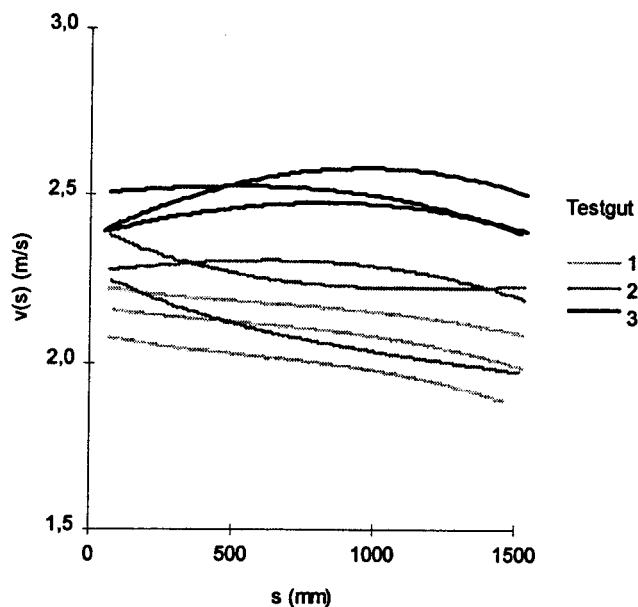


Bei der höheren Sortergeschwindigkeit wird vor allem bei Testgut 3 und 1 der begrenzen Einfluss der Reibung sichtbar. Gut 3 kann sich bis auf 2,7 m/s steigern, was nach der vorherigen Darstellung zu erwarten war, Gut 1 fällt jedoch aus einer Geschwindigkeit von 2,2 m/s wieder auf den Grenzwert von 2,0 m/s ab. Die Geschwindigkeit, mit der die Kippschale auswirft, liegt über der Grenzgeschwindigkeit des Gutes. Daher sinkt die Geschwindigkeit des Gutes sofort nach dem Erreichen der Rutsche ab.

Aus den geschilderten Abhängigkeiten erklärt sich die unterschiedliche Krümmung des Geschwindigkeitsverlaufes. Bei Gütern, die mit Geschwindigkeiten oberhalb der Grenzgeschwindigkeit abgeworfen werden, tritt eine sofortige Verzögerung ein. Damit ergibt sich ein konkaver Kurvenverlauf. Bei Gütern, die mit Geschwindigkeiten unterhalb der Grenzgeschwindigkeit abgeworfen wurden, ergibt sich ein konvexer Kurvenverlauf, da das Gut durch die Neigung der Gleitebene weiter beschleunigt.

In der Abbildung 4-33. wird das vorher beobachtete Verhalten von Testgut 3 weiter bestätigt. Die Testgüter 1 und 2 sinken ebenfalls auf ein niedrigeres Geschwindigkeitsniveau ab.

Abb. 4-33. Geschwindigkeitsverlauf $v(s)$ bei einem Neigungswinkel von 15 Grad, Geschwindigkeit 1,9 m/s, Schachtelware



Es läßt sich anhand dieser drei Abbildungen nicht mit letzter Sicherheit bestätigen, was in den Reibungsmessungen (Kap. 4.1.2.) an Ergebnissen gefunden wurde. Tendenzen in diese Richtung lassen sich jedoch eindeutig feststellen, wenn auch die Absolutwerte der Reibungsversuche nicht immer mit den hier präsentierten Darstellungen vergleichbar sind. Ein wesentlicher Grund dafür sind die nicht erfaßten Einflußgrößen (Raumklima, Materialstreuung, elektrostatische Aufladung usw.), die die Ergebnisse verfälschen können.

4.1.5 Bahnkurvenuntersuchungen gerade, ebene Rutsche mit Begrenzung durch seitliche Überhöhung

Die Untersuchungen an der ebenen Rutsche wurden fortgesetzt durch die Untersuchung der Bahnkurven bei Einsatz von seitlichen Begrenzungen. Jede Sorterendstelle hat damit eine definierte Breite. Zur Begrenzung dienen in der Praxis meist senkrechte Wände; besser dazu geeignet sind allerdings Überhöhungen mit stoßfreien Übergängen, die das Gut schonend abweisen. Auf Basis der Überlegungen zu einer kreisförmigen Überhöhung (s. Kap. 3.3) soll hier im Versuch gezeigt werden, welche Auswirkungen die Variation der verschiedenen Parameter (Anfangsgeschwindigkeit, Neigungswinkel, Anstellwinkel, Gutgewicht und Guttyp) auf das Ergebnis hat.

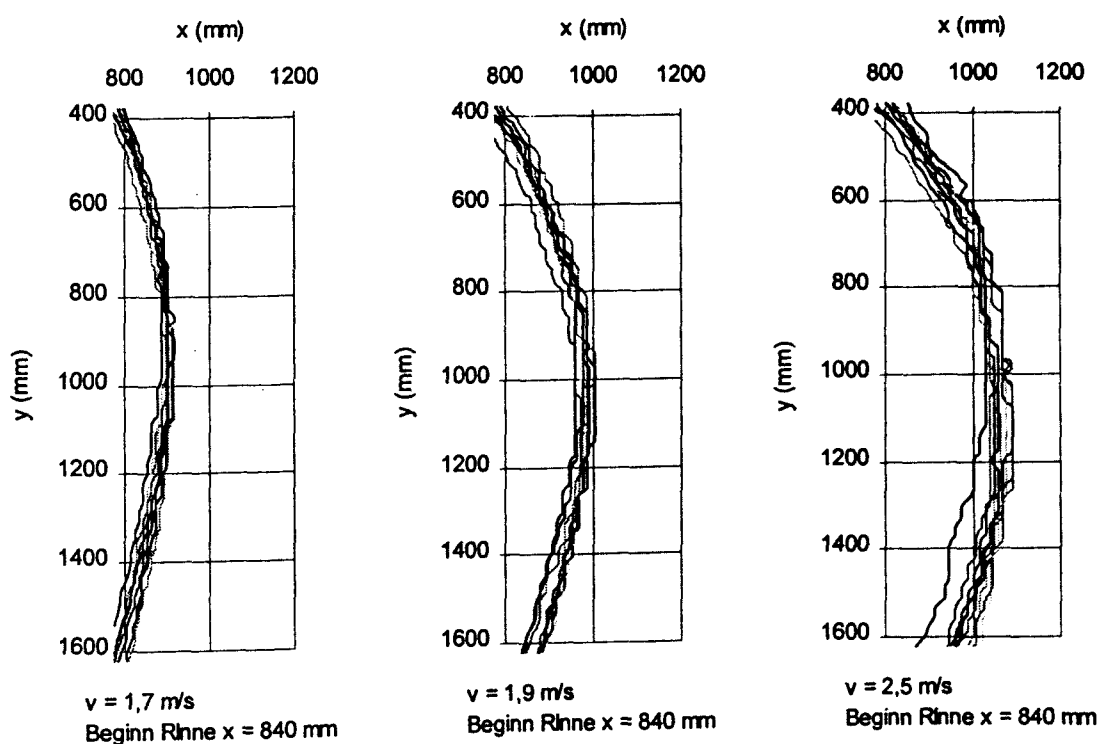
Alle dargestellten Diagramme wurden (ebenso wie in Kap 4.1.4) mit Makroprogrammen erarbeitet. Es wurden die Verzeichnungsfehler der Aufnahme korrigiert und die Lage des schwarzen Erkennungspunktes auf den Gütern (s. Kap. 2.5.2) auf einen virtuellen Berührungspunkt des Gutes mit der Rinne im Flächenschwerpunkt des Gutbodens rückgerechnet.

Weiterhin wurde der Anfangspunkt der Bahnkurve in der Rinne innerhalb einer Versuchsreihe auf den gleichen x-Offset des darstellenden Koordinatensystem gebracht (s. Fußnote im Diagramm). Die Normierungen wurden einerseits vorgenommen, um eine einheitliche Bewertung der Versuche zu ermöglichen, andererseits wird damit ein Vergleich mit den Berechnungsverfahren aus Kap. 3.3 möglich.

Einfluß der Gutgeschwindigkeit

Im untenstehenden Diagramm werden die Bahnkurven von Schachtelware bei drei verschiedenen Sortergeschwindigkeiten dargestellt. Wie zu erwarten war, verschieben sich die Bahnkurven mit zunehmender Geschwindigkeit in x-Richtung. Die Streubreite der Kurven verändert sich (anders als bei der Rutschenebene) nicht signifikant. Wenn eine Tangente an die einfallende und an die ausfallende Bahnkurvenparabel gelegt wird, ist erkennbar, daß der Einfallwinkel mit zunehmender Geschwindigkeit unter einem spitzeren Winkel (zwischen der konvexen Krümmungsseite der Parabel und Falllinie der Rutsche gerechnet) in die Überhöhung gleiten. Bei höheren Geschwindigkeiten liegen die größten Unterschiede zwischen Einfallwinkel und Ausfallwinkel vor. Der geschwindigkeitsregulierende Einfluß der Zentrifugalkraft sorgt ebenso wie bei einer Wendelrutsche [27] für eine geschwindigkeitsabhängige Verzögerung der Güter. Damit wird der Ausfallwinkel größer als der Einfallwinkel. Die Konstruktion der Rinne hat also einen positiven Einfluß auf Faktoren wie hohe Sortergeschwindigkeiten, mögliche Rutschenlänge und Gutbeschädigung.

Abb. 4-34. Vergleich von versch. Sortergeschwindigkeiten, kreisförmige Rinne, Radius 325 mm, Rutschenneigung 20Grad, Rinnenanstellwinkel 0Grad, Schachtelware



Es ist ebenfalls erkennbar, daß die Kurven sich bei höheren Sortergeschwindigkeiten "abplatteln". Die Ursache liegt (neben der Darstellungsform der Draufsicht, vgl. Abb. 5-3) in der Keilwirkung der Kanten des Kartons. Sobald die Schachtel vollständig in die Rinne gerutscht ist, wirken die verstärkten Kräfte auf die Kanten, damit wird die Schachtel gebremst. Erkennbar wird diese Tatsache im Zusammenhang mit den Beobachtungen bei Beutelwaren. Dort sind derartig starke Abflachungen der Bahnkurve nicht zu beobachten (s. a. Anhang), da diese Güter sich weitgehend der Kontur der Rinne anpassen können.

Bei fast allen Kurven ist festzustellen, daß im Umkehrpunkt der Rinne eine *Bündelung der Bahnkurven* eintritt, die weitgehend unabhängig vom Offset beim Abwurf (s. Abb. 4-37) ist. Diese Beobachtung ist im Zusammenhang mit einer Automatisierung von Endstellen (z.B. Entnahme von Gütern mit Robotern) wesentlich, da an diesem Punkt eine lagegenaue Abführung der Güter auf einen Entnahmeplatz oder in eine Brems- und Pufferstrecke möglich ist. An diesem Punkt ist die Streuung der Güter minimal.

Einfluß des Neigungswinkels

Der Einfluß des Neigungswinkels ist mit dem Geschwindigkeitseinfluß direkt vergleichbar, da mit einer stärkeren Neigung der Rutschebene eine Geschwindigkeitssteigerung verbunden ist. Die "Abplattung" der Bahnkurve wird mit zunehmendem Neigungswinkel gesteigert, da die Hangabtriebskraft steigt und das Gut mehr in Abwärtsrichtung beschleunigt wird.

Abb. 4-35. Vergleich von versch. Neigungswinkeln, kreisförmige Rinne, Radius 325 mm, Sortergeschwindigkeit 1,9 m/s, Rinnenanstellwinkel 0 Grad, Schachtelware

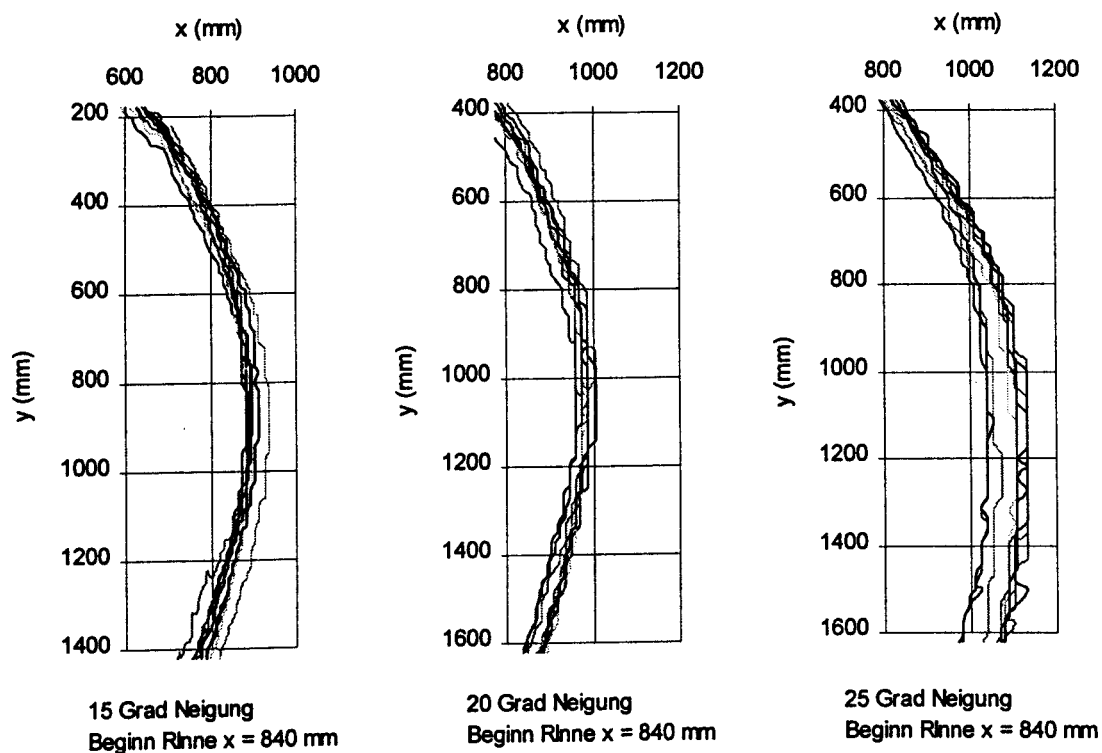
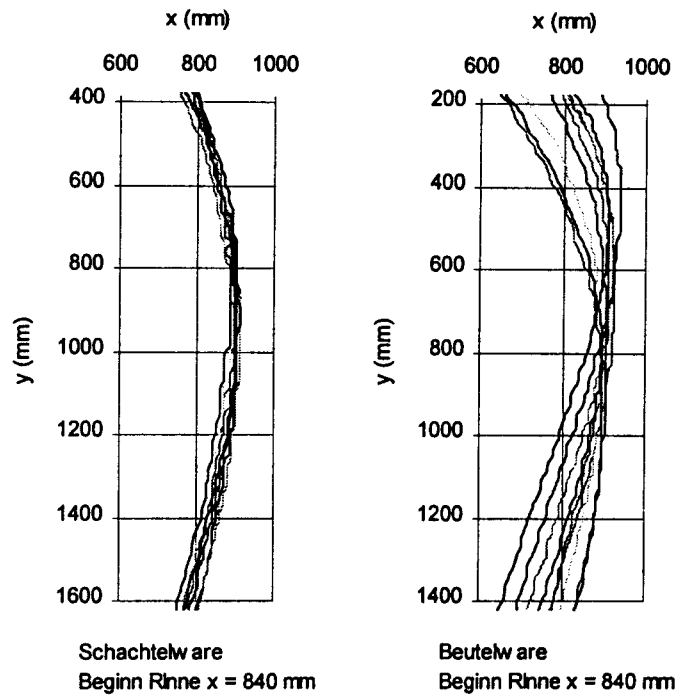


Abb. 4-37. Vergleich von Beutel- und Schachtelware, kreisförmige Rinne, Radius 325 mm, Sortergeschwindigkeit 1,7 m/s, Neigungswinkel 20 Grad



4.2 Berechnungen

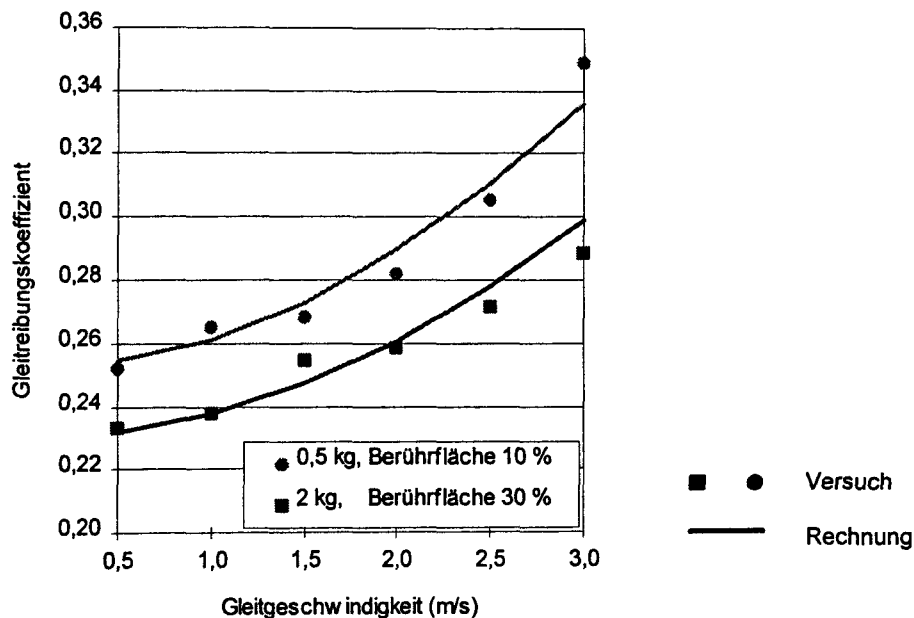
4.2.1 Beispiel der Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten mittels des aufgestellten Modells

In Kap. 3.1 wurde ein Modell erstellt, welches die Verhältnisse beim Gleiten von Stückgütern abbildet. In diesem Kapitel soll beispielhaft für ein Testgut gezeigt werden, daß mit den Mittelwerten der Ergebnisse für die Faltschachtel eine Berechnung des Reibbeiwertverlaufes möglich ist. Das Testgut hat folgende Parameter (vgl. Abb. 3-1.):

c_w	0,8
ρ_1	1,2 kg/m ³
b	0,31 m
c	0,132 m
l_1	0,03 m
l_2	0,41 m
l_3	0,03 m
h_1	0,0037 m
h_2	0,0017 m
p_1	1,00E+05 Pa
μ	0,218

Der c_w Wert und der ρ_1 Wert wurde entnommen aus Dubbel [14, S. 172, Tab. 2], die Abmaße und der Offset des Gleitreibungskoeffizienten μ entsprechen den Werten des Testgutes. Für den Luftspalt h_2 wurde die Annahme getroffen, daß er zwischen 1,5 und 2,0 mm liegt. Dieser Wert entspricht in etwa der mittleren "Welligkeit" von Schachtelkartons (s. Kap. 4.1.1.1).

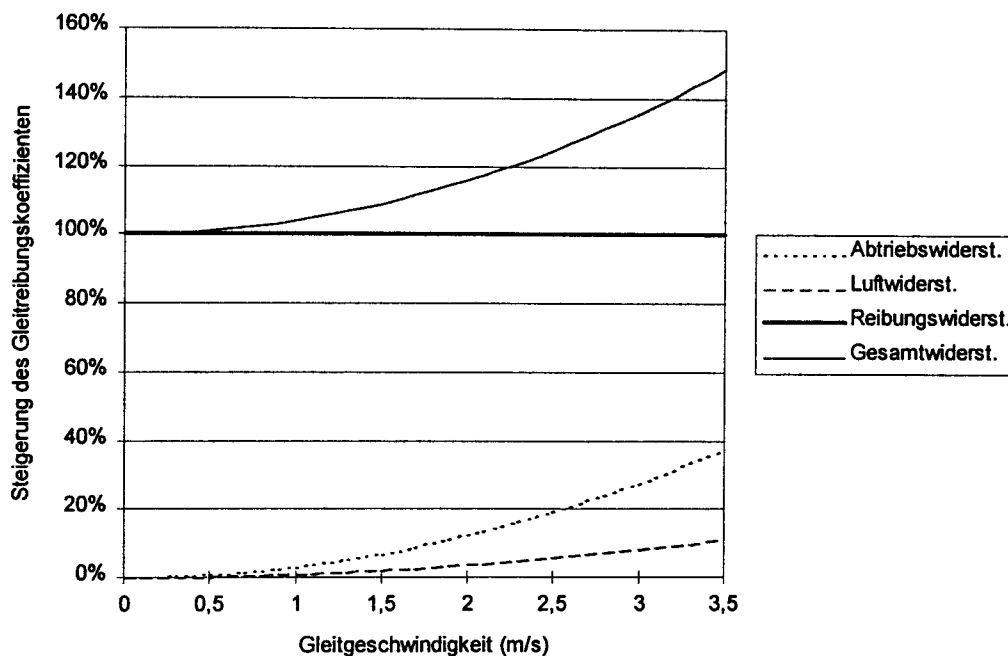
Abb. 4-38. Berechneter Gleitreibungswertverlauf gegenüber gemessenem Verlauf



Wie zu sehen ist, entspricht der berechnete Verlauf des Reibbeiwertes gut den Versuchswerten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Steigung stark von der Berührfläche des Gutes mit dem der Gleitfläche und von der Annahme der Luftspalthöhe h_2 abhängt. Der Verlauf des Reibbeiwertes läßt erkennen, daß das Berechnungsmodell vom Ansatz her richtige Ergebnisse liefert, wenn die Parameter genau bekannt sind. In diesem Fall wurde die Annahme getroffen, daß die mittlere Höhe des Luftspaltes bei 1,7 mm liegt. Dieser Wert liefert eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung.

Anhand des obigen Vergleichs zwischen Berechnung und Versuch wird in der folgenden Darstellung der *Einfluß der Einzelwiderstände* aufgezeigt. Man erkennt, daß bis zu einer Geschwindigkeit von 3,5 m/s der Luftwiderstand gerade 10 % der Steigerung ausmacht, wohingegen der Einfluß der Bodenkontur sich durch eine Erhöhung des Reibbeiwertes um 40 % bemerkbar macht. Der Widerstand der Schachtel bleibt jedoch unabhängig von der Bodenkontur immer erhalten, wohingegen der Einfluß der Bodenkontur von Gut zu Gut verschieden sein kann. Somit hat die Bodenkontur von Gut *und* Gleitfläche bei der Erforschung des Gleitverhaltens von Stückgütern eine hohe Priorität.

Abb. 4-41. Einzelkomponenten des Gleitreibungsbeiwertes, dargestellt anhand der Einzelwiderstände (basierend auf einem typischen Testgut)



4.2.2 Auslegung einer Sorterendstellenrutsche, Auslegungsdiagramme

Die konstruktive Gestaltung von Rutschen als Sorterendstellen ist von vielen Parametern abhängig. Zur Berechnung der Bewegungsbahnen von Stückgütern wurden im Kap. 3.2 die verschiedenen Bewegungsgleichungen mit den dazugehörigen Parametern im Detail erörtert. Aus den dargestellten Ansätzen geht hervor, daß die Bewegungsgleichungen Differentialgleichungen sind, die einer geschlossenen analytischen Lösung nicht zugänglich sind. Für die Verwendung zur Auslegung der Endstellen ist es daher nur möglich, mittels einer Berechnung durch ein Softwareprogramm (s. Kapitel 3.2.4) die Bewegungsbahn vorherzubestimmen und damit eine Sorterendstelle in ihren Dimensionen auszulegen.

Um für die Praxis eine einfache, überschlägige Berechnung von Abschnitten der Bahnkurve zu ermöglichen, wurden mittels des Softwareprogramms Auslegungsdiagramme errechnet. Die Auslegungsdiagramme sind für einige, eingeschränkte Parametervarianten dargestellt worden, da alle möglichen Varianten der Bewegungsgleichung nicht mehr darstellbar sind. Zu berücksichtigen ist ebenfalls, daß mit einem konstanten Gleitreibbeiwert gerechnet wurde. Folgende Diagramme wurden erarbeitet und befinden sich im *Anhang*:

Ebene Rutsche

Parameter:

α :	24°									
μ :	0,2	0,3	0,4							konstant
v_{x0} :	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5					(m/s)
v_{y0} :	0,0	1,0	2,0	3,0						(m/s)

Darstellungen:

$$v_x = f(v_y)$$

$$x = f(v_x)$$

$$y = f(v_x)$$

Überhöhung, kreisförmig

Parameter:

α :	24°									
β :	90°									
γ :	0°									
μ :	0,2	0,3	0,4							konstant
r :	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8		(m)

Darstellung:

$$v_x = f(v_y)$$

Im nächsten Abschnitt werden die Auslegungsdiagramme an einem Beispiel exemplarisch vorgestellt.

Dazu wird die *Auslegung einer Sorterendstellenrutsche* an einem Beispiel durchgeführt. Es werden zwei Wege im Vergleich aufgezeigt:

- Überschlägige Bestimmung der Rutschendimensionen anhand der Auslegungsdiagramme
- Genaue Berechnung der Bahnkurven mittels des Softwareprogramms

Die Auslegung soll für einen *Kippschalensorter* errechnet werden, da zu diesem Typ Versuche gemacht wurden (s. Kap. 2.4) und daher Erfahrungen vorliegen. Die Vorgehensweise ist jedoch allgemeingültig und kann ebenfalls für andere Sortertypen (z.B. f. Quergurtsorter) durchgeführt werden.

4.2.2.1 Überschlägige Bestimmung der Rutschendimensionen anhand der Auslegungsdiagramme

Zunächst muß festgelegt werden, welche Güter exemplarisch untersucht werden sollen. Es wird angenommen, daß es sich beim ersten Gut um eine *Faltschachtel mit verklebten Laschen* (Testgut 1) handelt. Das Gut soll ein Gewicht von 2 kg haben. Die Gleitoberfläche entspricht der Testfläche 2, *gestrichenes Stahlblech*. Aus den Versuchen in Kap. 3.1.2 hat sich bei diesem Gewicht ein *mittlerer Gleitreibungskoeffizient von 0,298* ergeben (s. Tabellen Anhang).

Beim zweiten Gut handelt es sich um einen *Polybeutel aus PP* (Testgut 9). Das Gut soll ein Gewicht von 1 kg haben. Aus den Versuchen in Kap. 4.1.2 hat sich bei diesem Gewicht ein *mittlerer Gleitreibungskoeffizient von 0,205* ergeben (s. Tabellen Anhang).

Teil 1, Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeiten und des Gutoffsets nach dem Abkippvorgang

Durch den Abkippvorgang wird die Kippschale in einen Winkel von 35 Grad gebracht. Wie aus Versuchsaufnahmen ermittelt werden konnte, behält das Gut in fast allen Fällen seine Position auf der Kippschale bis zur Endstellung des Abkippvorgangs bei. Dann erfolgt ein Abrutschvorgang, bei dem das Gut die Schale hinabgleitet. Durch diesen Vorgang ergibt sich abhängig von der Lage des Gutes auf der Kippschale eine unterschiedliche Geschwindigkeit in y-Richtung beim Verlassen der Schale. Außerdem erfolgt durch die unterschiedliche Rutschzeit des Gutes und die Fördergeschwindigkeit des Sorters eine Verlagerung des Auswurfpunktes in Förderrichtung (x-Richtung).

Zur Ermittlung der Anfangsbedingungen für die Auslegung der Sorterendstellenrutsche werden die untenstehenden Diagramme benutzt. Die Berechnung der Darstellungen erfolgte mit den Berechnungsprogrammen bei Annahme eines konstanten Gleitreibbeiwertes.

Weiterhin muß die genaue Lage des Gutes auf der Kippschale angenommen werden. In diesem Fall soll von den Versuchsergebnissen aus Kap. 2.1.3 ausgegangen werden. Es wird der am häufigsten vorkommende Ort gewählt. Damit hat das Gut die Lage von etwa -175 mm in y-Richtung. Die Lage in x-Richtung soll hier zunächst unberücksichtigt bleiben; sie ist wichtig im Zusammenhang mit der richtigen Position des Abkippmechanismus.

Von der Lage des Gutes auf der Schale ausgehend wird mittels des Diagramms eine *Endgeschwindigkeit* beim Verlassen der Schale von ca. 1,05 m/s bzw. 1,15 m/s ermittelt. Im nächsten Diagramm wird als Hilfsgröße die dazu notwendige Rutschzeit abgelesen. Sie liegt bei etwa 0,30 s bzw. bei 0,32 s.

Abb. 4-40. Diagramm zur Bestimmung der Endgeschwindigkeit v_y

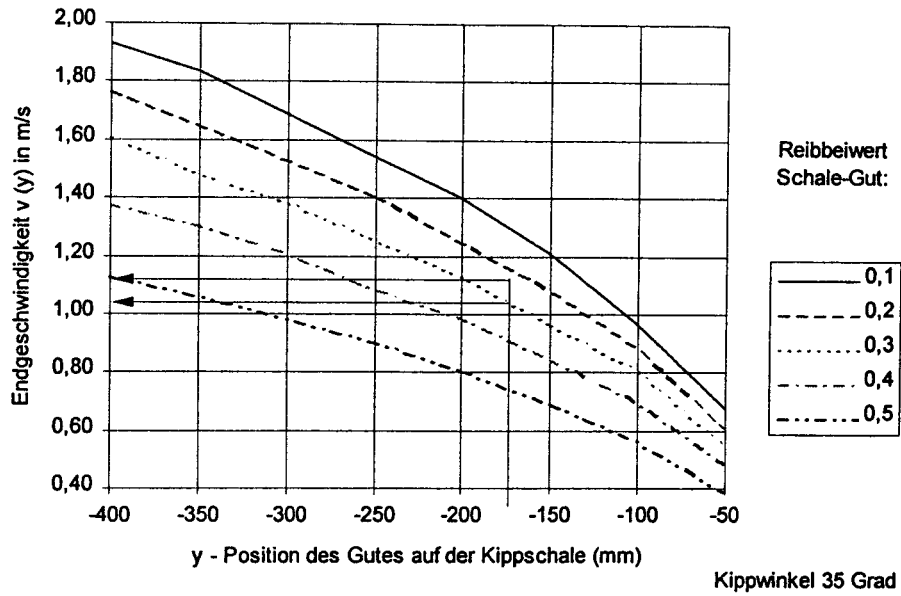
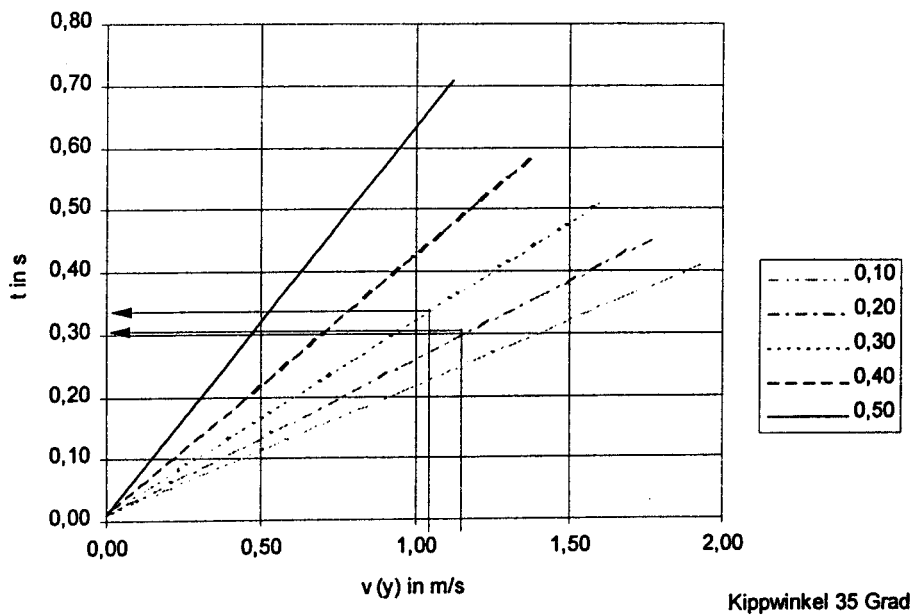
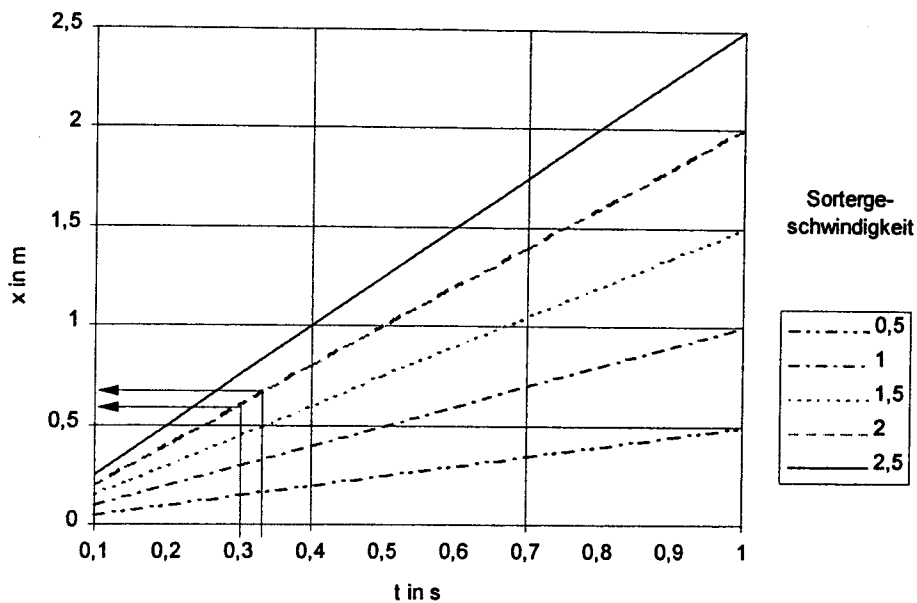


Abb. 4-41. Diagramm zur Bestimmung der Rutschzeit des Gutes



Zur Bestimmung der Offsetunterschiede der Güter wird das untenstehende Diagramm benutzt. Es wird dabei angenommen, daß die Sortergeschwindigkeit 2 m/s beträgt.

Abb. 4-42. Diagramm zur Bestimmung des Offset des Gutes



Durch Ablesen ergibt sich ein Δ Offset in x-Richtung von $0,7 \text{ m} - 0,6 \text{ m} = 0,1 \text{ m}$. Damit sind für die Berechnung der Bahnkurven der Güter in der Endstelle folgende Anfangsbedingungen ermittelt worden:

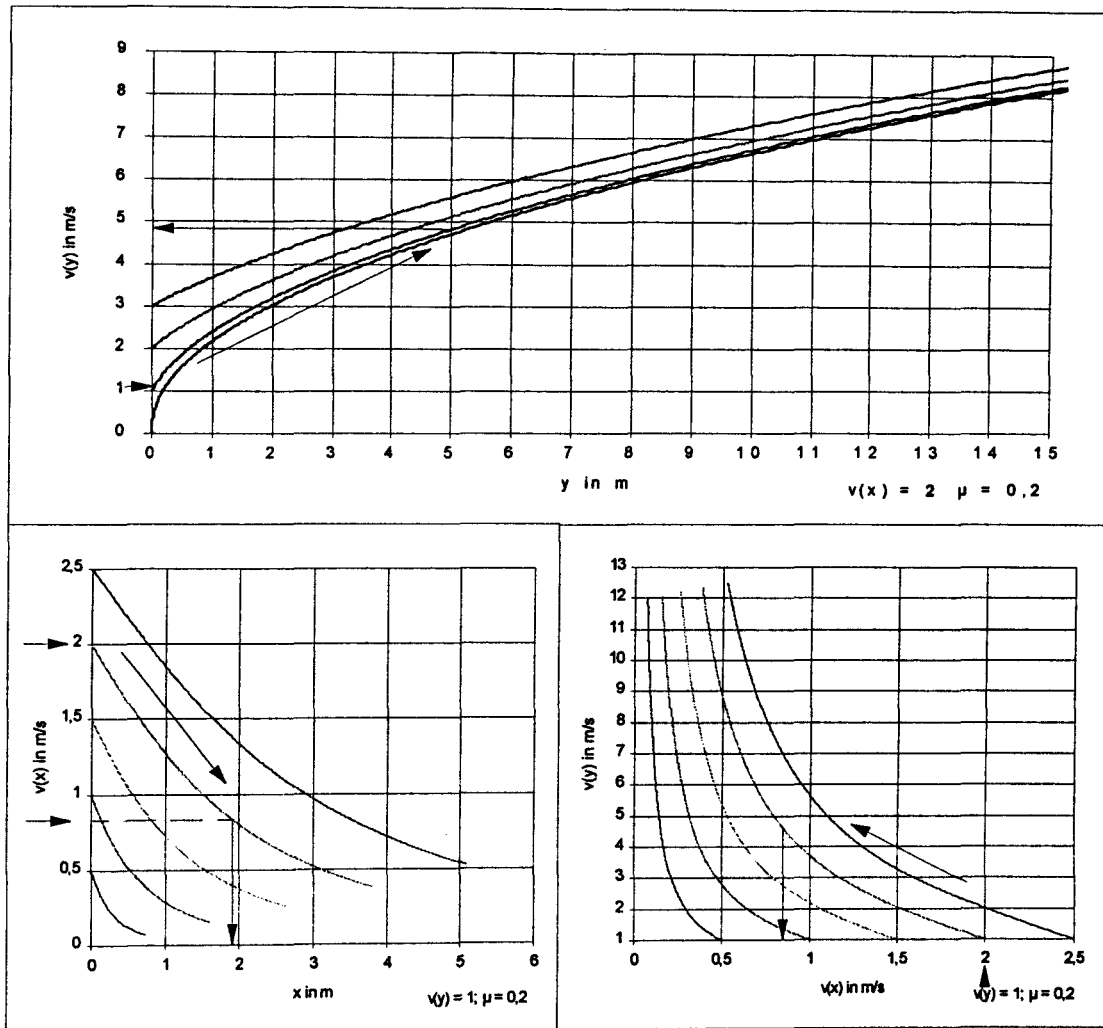
- Testgut 1: $v_y = 1,05 \text{ m/s}$
- Testgut 9: $v_y = 1,15 \text{ m/s}$
- Offset: $\Delta x_0 = 0,1 \text{ m}$

Teil 2. Bestimmung der Hüllkurven bzw. der Rutschenbreite

Die Rutschenkonstruktion soll einen Neigungswinkel von 24 Grad haben. Dieser Winkel ist für Rutschenkonstruktionen üblich [25]. Die Länge der Rutsche soll auf 5 m begrenzt sein.

Die Bestimmung der Endgeschwindigkeit in Rutschenrichtung erhält man aus dem folgenden Diagramm. Bei einer Anfangsgeschwindigkeit von $1,15 \text{ m/s}$ steigt die Geschwindigkeit auf etwa $4,8 \text{ m/s}$. Aus dem rechten Diagramm geht hervor, daß bei einer Sortergeschwindigkeit von 2 m/s (=Anfangsgeschwindigkeit in x-Richtung) eine Verringerung der Geschwindigkeit auf etwa $0,8 \text{ m/s}$ erfolgt, wenn das Ende der Rutsche erreicht ist. Aus dem linken Diagramm läßt sich ableiten, daß das Gut dann eine Breite von $1,9 \text{ m}$ in x-Richtung überstrichen hat.

Abb. 4-43. Auslegungsdiagramme zur Bestimmung der Rutschendimensionen für das Testgut 9, Polybeutel aus Polypropylen, $\mu = 0,2$



Ebenso lässt sich natürlich jeder Zwischenwert aus den Diagrammen abgreifen und damit aus diesen Stützstellen die Bahnkurve konstruieren.

Für das zweite Testgut, die Faltschachtel, lassen sich aus den Diagrammen im Anhang ebenfalls die notwendigen Werte ablesen. Im Vergleich ergeben sich damit folgende Werte:

Testgut 1, Faltschachtel mit Laschenklebung

- Endgeschwindigkeit in x-Richtung 0,3 m/s
- Endgeschwindigkeit in y-Richtung 3,9 m/s
- Bahnkurvenbreite in x-Richtung 1,6 m

Testgut 9, Beutel aus Polypropylen

- Endgeschwindigkeit in x-Richtung 0,8 m/s
- Endgeschwindigkeit in y-Richtung 4,8 m/s
- Bahnkurvenbreite in x-Richtung 1,9 m

Daraus kann man zum einen erkennen, wie hoch die maximale Endgeschwindigkeit der Güter sein kann, andererseits läßt sich daraus ebenfalls die maximale Bahnkurvenbreite ablesen.

Bei den Überlegungen zur Offsetverschiebung bei der Ausgabe des Gutes durch die Kippchale muß berücksichtigt werden, daß das langsamste Gut (in diesem Fall die Schachtel) eine Offsetverschiebung der Bahnkurve von +100 mm gegenüber dem schnelleren Gut hat. Die *Bahnkurvenstreuung* der Güter ergibt sich somit zu

$$\Delta x_{St} = 1,9 \text{ m} - 1,6 \text{ m} - 0,1 \text{ m} = 0,2 \text{ m}.$$

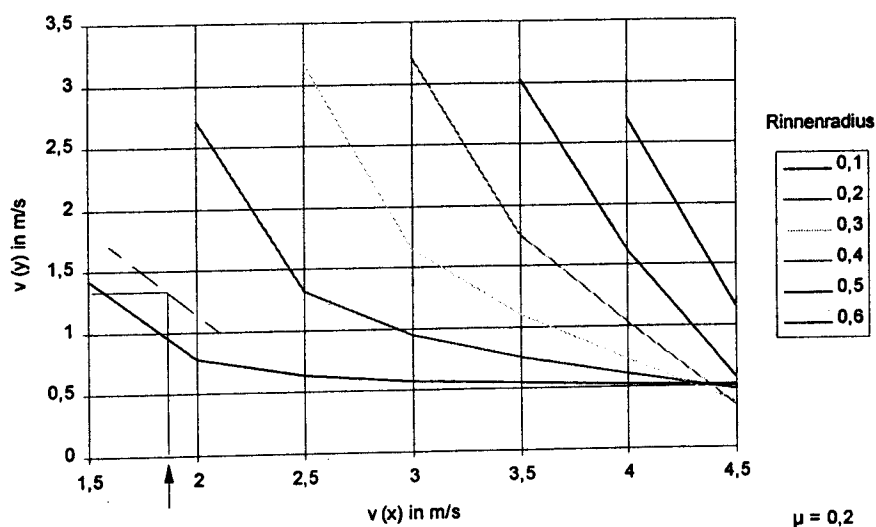
Aus diesen überschlägigen Berechnungen kann jetzt für die Konstruktion der Rutsche bei der gegebenen Länge und dem gegebenen Gut eine entsprechende Breite der Rutsche vorgesehen werden. Ebenfalls kann daraus die optimale Anwinkelung der Rutschenbahn an den Sorter errechnet werden.

Teil 3. Dimensionierung einer seitlichen Begrenzung der Rutsche

Falls aus Platzgründen eine Anwinkelung nicht vorgesehen werden kann oder die Rutschenbreite minimiert werden soll, kann man direkt nach der Abgabe des Gutes in die Endstelle von der ebenen Rutsche in eine Überhöhung überleiten.

Dazu kann in eine Rinne mit kreisförmigem Querschnitt übergeben werden.

Abb. 4-44. Auslegungsdiagramm zur Bestimmung des Radius einer kreisförmigen Überhöhung (Kennfeld f. Überhöhungswinkel 90 Grad)



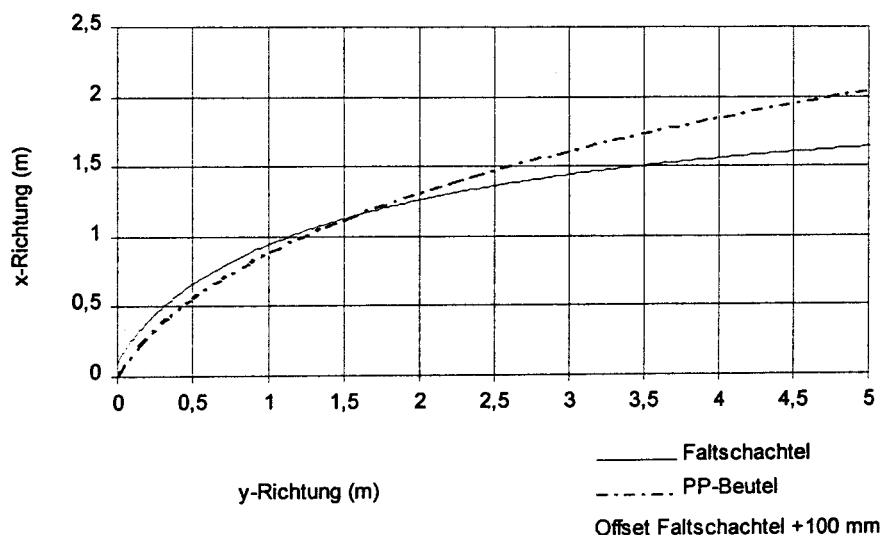
Aus dem vorher gezeigten Diagramm v_x / v_y geht hervor, daß bei einer Geschwindigkeit von 1,8 m/s in y-Richtung gleichzeitig eine Geschwindigkeit von etwa 1,3 m/s in x-Richtung existiert. Aus dem obenstehenden Diagramm kann entnommen werden, bis zu welchen Geschwindigkeitsverhältnissen welcher *Rinnenradius* ausreichend ist, das Gut nicht höher als *90 Grad Überhöhungswinkel* aufsteigen zu lassen. Für den Beispielfall des Polybeutels ist ein Rinnenradius von 0,15 m sicher ausreichend (s. Abb. 4-44.).

Eine weitere Verfolgung der Bahnkurve in der Rinne ist auf diesem Weg nicht mehr möglich. In diesem Fall muß eine Berechnung mittels der unten beschriebenen Software erfolgen.

4.2.2.2 Genaue Berechnung der Bahnkurven mittels Softwareprogramm

Um die Bahnkurven der Güter genau zu berechnen und die ermittelten Werte mit denen der graphischen Methode zu vergleichen, wird mittels des Berechnungsprogramms der Gutweg nach dem Verlassen der Kippschale berechnet. Dabei wird im Gegensatz zu den Diagrammen der Reibbeiwert abhängig von der jeweiligen Geschwindigkeit ermittelt.

Abb. 4-45. Berechneter Verlauf der Bahnkurven (Offset Faltschachtel siehe Abb. 4-42)



Man erkennt, daß die Überschlagsrechnung eine recht genaue Kalkulation der Endstellenbreite ergibt. Es wurde für die Faltschachtel eine Breite der Bahnkurve in x-Richtung von 1,54 m berechnet, für den Polybeutel eine Breite von 2,05 m. Somit ergibt sich für die Faltschachtel eine kleinere Breite als vorausberechnet und für den Beutel eine größere Breite als vorausberechnet. Dies entspricht den Erwartungen, da die Ungenauigkeiten vor allem von der Annahme herrühren, daß der Reibbeiwert in der Überschlagsrechnung konstant ist. Dadurch wird die Progression des Reibbeiwertes (vor allem bei Schachtelwaren) ungenügend berücksichtigt. Trotzdem ist die graphische Methode für herkömmliche Rutschenlängen als durchaus ausreichend anzusehen.

4.2.3 Vergleich zwischen Berechnungsmodellen und Versuchsergebnissen

4.2.3.1 Ebene Rutsche

Um zu überprüfen, wie genau mit dem Berechnungsmodell für die ebene Rutsche (Kap. 2.2.1) die Bahnkurven vorausberechnet werden können, wurden alle Versuche des Hauptversuchs

mit der Berechnungssoftware simuliert und mit den Bahnkurven des Versuchs verglichen. Da die Abweichungen von der Berechnung in einigen Fällen nur knapp über dem Auflösungsvermögen des Bildverarbeitungssystems (ein Pixel entspricht ca. 7 mm im Original) liegen, wurden alle gemessenen Bahnkurven über ein Makroprogramm mit einem Ausgleichspolynom dritter Ordnung angenähert. Aufgrund der hohen Abtastrate der Aufzeichnung (125 Bilder/s) existieren viele Stützstellen zur genauen Berechnung der Ausgleichskurve. Aus dem gefundenen Ausgleichspolynom wurde die Bahnkurve als $f(t)$ (in den gleichen Zeitintervallen wie mit der Bildverarbeitung aufgenommen) neu berechnet. Die entstandene Kurve ist "glatt" und läßt einen besseren Vergleich mit der berechneten Bahnkurve zu.

Die Ergebnisse in der untenstehenden Tabelle zeigen neben der Abweichung in x- und y-Richtung die Verteilungsfunktion der Analyseergebnisse. Jede Abweichung der Berechnungsergebnisse vom Versuch wurde analysiert und anschließend in Klassen eingeteilt. Durch eine Kreuztabellenanalyse lassen sich alle Ergebnisse sowohl bezogen auf jedes einzelne Testgut 1 bis 6 als auch auf die Klassen B wie Beutelware und S wie Schachtelware zusammengefaßt darstellen.

Die Abweichung ist definiert als der Unterschied der beiden Kurven (Simulation und Versuch) bezogen auf den Endwert der Versuchskurve (in den Versuchen wurden Bahnkurvenlängen von etwa 1,6 m gemessen). Die Abweichung wird in der Auswertung als Betrag der Abweichung gerechnet; negative Abweichungen werden gezählt wie positive Abweichungen. Die Auswertung über die negativen und positiven Abweichungen ergab, daß die Verteilungsfunktionen zu beiden Seiten hin fast identisch sind. Somit können die Abweichungen zusammengefaßt werden, ohne die Aussage zu verfälschen.

Tab. 4-10. Abweichung zw. Berechnungsverfahren und Versuch, Analyse der Klassen Beutelware und Schachtelware (Maximalwerte fett), Basis 162 Versuche

Testgut		Abweichung					
		< = 2%	< = 4%	< = 6%	< = 8%	< = 16%	> = 16%
		Häufigkeit in % d. Versuche					
B	x - Richt.	21	30	16	14	12	7
	y - Richt.	22	28	16	7	14	12
S	x - Richt.	58	21	12	6	2	0
	y - Richt.	40	21	20	12	6	1
Gesamtverteilung		35	25	16	10	9	5

Aus der Tabelle läßt sich erkennen, daß das Berechnungsmodell eine sehr gute Näherung des tatsächlichen Verhaltens ergibt. Gerade bei Schachteln liegt die Ungenauigkeit *in den meisten Fällen bei < 2 %*. Bei einer Rutschenlänge von z.B. 3000 mm würde die Bahn mit einer Tole-

ranz von +/- 60 mm genau vorherbestimmt werden können. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß die Genauigkeit des Modells in x-Richtung wesentlich größer ist als in y-Richtung. Die Ursache kann darin liegen, daß die Bodenkontur der Schachteln (vgl. Kap. 4.1.1) in x- und y-Richtung unterschiedlich geformt ist. Dadurch ergeben sich für die beiden Richtungen unterschiedliche Verläufe des Gleitreibbeiwertes abhängig von der Gutgeschwindigkeit (vgl. Modellannahme aus Kap. 2.1). Einen Hinweis auf die Richtigkeit der Annahme liefert der Vergleich mit der Beutelware, die offensichtlich keine Vorzugsrichtung aufweist. Bei den Beutelwaren ist die Streuung größer, die meisten Güter haben eine *Streuung von < 4 %*.

Tab. 4-11. Abweichung zw. Berechnungsverfahren und Versuch, Analyse der einzelnen Testgüter 1 bis 6 (Maximalwerte fett), Basis 162 Versuche

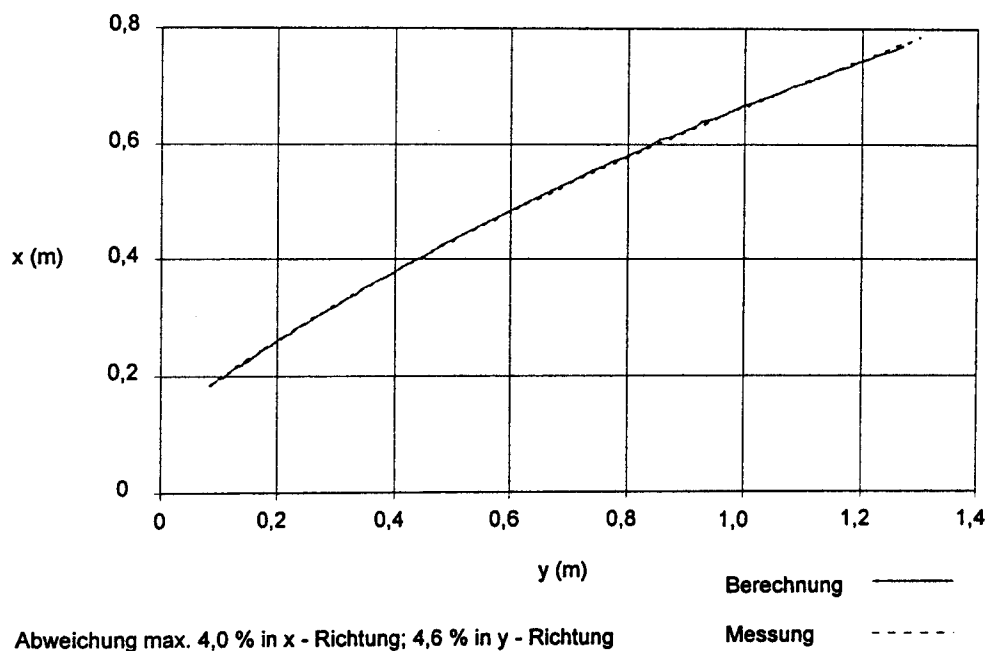
Abweichung, x - Richtung						
Testgut	< = 2%	< = 4%	< = 6%	< = 8%	< = 16%	> = 16%
Häufigkeit in % d. Versuche						
1	59	19	15	4	4	0
2	70	15	7	4	4	0
3	44	30	15	11	0	0
4	11	37	15	15	15	7
5	37	37	7	11	7	0
6	15	15	26	15	15	15
Summe	40	25	14	10	7	4
Abweichung, y - Richtung						
Testgut	< = 2%	< = 4%	< = 6%	< = 8%	< = 16%	> = 16%
Häufigkeit in % d. Versuche						
1	22	26	33	15	4	0
2	70	15	7	4	4	0
3	67	11	11	4	7	0
4	44	30	15	11	0	0
5	30	26	15	19	7	4
6	11	37	15	15	15	7
Summe	41	24	16	11	6	2

Die obenstehende Tabellen bestätigen die vorher gefundenen Erkenntnisse. Eine Unregelmäßigkeit läßt sich für Testgut 1 (Faltschachtel) finden; es weicht in der y-Richtung stärker von den Berechnungsergebnissen ab als die anderen Testgüter.

Am genauesten vorherbestimmbar ist der Bahnkurvenverlauf des Testgutes 2 (Stülpdeckelschachtel). 70% aller Versuche liegen in der Genauigkeitsklasse $< 2\%$ Abweichung. Es gibt darunter mehrere Versuche, bei denen die Genauigkeit bei $\pm 0,6\%$ liegt. Dies entspricht z.B. einer Abweichung von nur $\pm 18\text{ mm}$ auf 3000 mm Rutschenlänge.

Einen optischen Vergleich für die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenem Verlauf liefert beispielhaft die untenstehende Abbildung.

Abb. 4-46. Versuch mit Klappdeckelschachtel (Postpaket), Geschwindigkeit $1,7\text{ m/s}$, Winkel 15 Grad , Gewicht 3000 g



Die Darstellung zeigt eine typische Abwurfbahn. Die Abweichungen der Berechnung liegen in diesem Fall über dem Klassendurchschnitt.

4.2.3.1 Kreisförmige Überhöhung

Die Versuche mit einer seitlichen Begrenzung der Endstelle (Kap. 4.1.5) wurden ausgewertet und mit dem Berechnungsmodell für die kreisförmige Überhöhung verglichen.

Einen detaillierten Aufschluß über die Genauigkeit der Versuche gibt die *Verteilungsfunktion der Analyseergebnisse*. Ebenso wie im vorherigen Kapitel wird das Ergebnis in Tabellenform dargestellt. Es wurden alle Versuche ausgewertet, die bei einem Rinnenanstellwinkel von 0 Grad durchgeführt worden sind.

Die Tabellen zeigen die Abweichung von Berechnung und Versuch bezogen auf das *Maximum der jeweiligen Bahnkurven in x -Richtung*.

Tab. 4-12. Abweichung zw. Berechnungsverfahren und Versuch, Analyse der Klassen Beutelware und Schachtelware (Maximalwerte fett), Basis 162 Versuche

Testgut	Neigung	Abweichung im Maximum, x - Richtung					
		$\leq 40\text{mm}$	$\leq 70\text{mm}$	$\leq 100\text{mm}$	$\leq 130\text{mm}$	$\leq 160\text{mm}$	$> 160\text{mm}$
		Häufigkeit in % d. Versuche					
Beutel	15 Grad	4%	4%	4%	16%	16%	56%
	20 Grad	0%	4%	11%	26%	30%	30%
	25 Grad	11%	19%	52%	19%	0%	0%
Schachteln	15 Grad	0%	0%	0%	19%	37%	44%
	20 Grad	7%	15%	19%	31%	23%	4%
	25 Grad	49%	38%	0%	0%	0%	13%

Wie aus den Ergebnissen zu erkennen ist, ist das Verhalten aller Testgüter abhängig vom *Neigungswinkel der Rutsche*. Je größer die Neigung ist, desto besser ist die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Versuch. Weiterhin zeigt sich, daß Beutelwaren größere Abweichungen als Schachteln haben.

Es geht aus der Analyse ebenfalls hervor, daß die Absolutwerte der Berechnungen stark von den Ergebnissen des Versuches abweichen. Da die Genauigkeit des Berechnungsmodells für die ebene Rutsche demgegenüber sehr hoch war, mußten erkennbare Fehlerquellen für diese Abweichungen existieren. Es stellte sich heraus, daß die Modellannahme einer Punktmasse im Flächenschwerpunkt des Gutbodens in dieser Form nicht geeignet ist, um exakte Ergebnisse zu liefern.

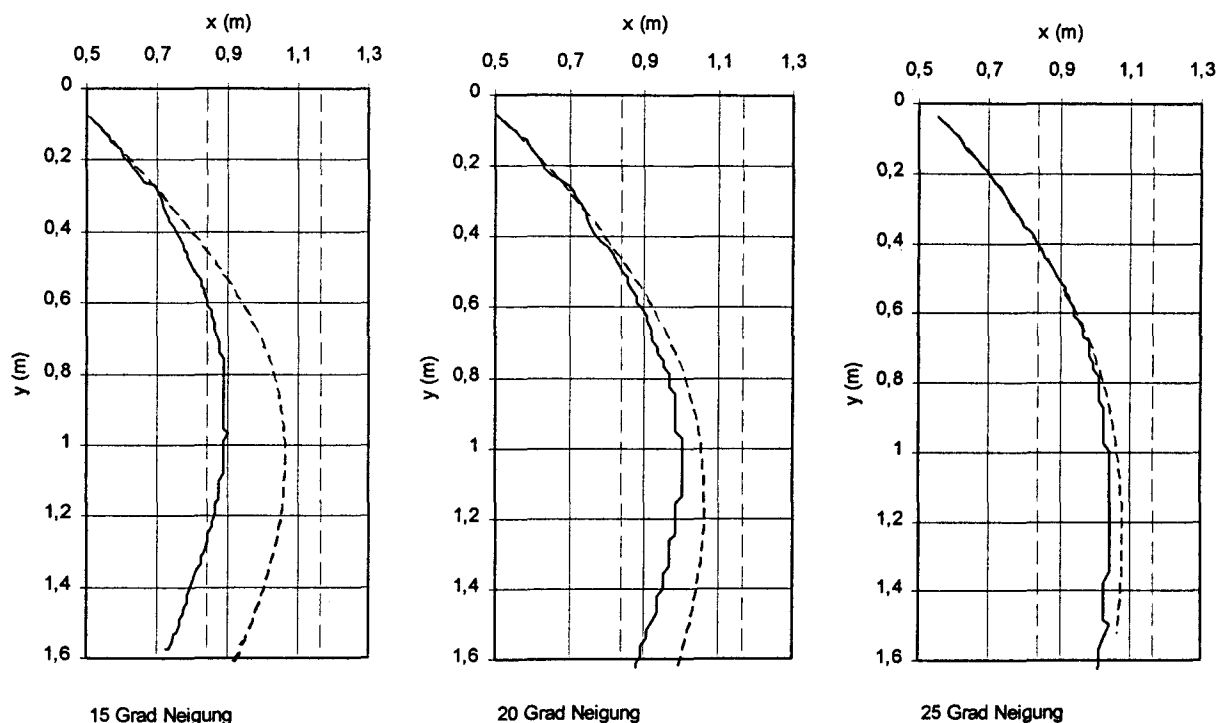
Die *Hauptursache für die Abweichungen* liegt darin, daß die Güter mit der Vorderkante schon in den Einfluß der Überhöhung kommen, während die Berechnung der Bahnkurve immer auf den Schwerpunkt bezogen durchgeführt wird. Dadurch ergeben sich je nach Neigung der Rutsche und der Geschwindigkeit des Gutes Abweichungen, die darauf basieren, daß die Gutbewegung schon beim Eintreten der Vorderkante in die Rinne beeinflusst wird (siehe Abb. 5-5.). Es ergibt sich so ein (individuell) zurückverlegter Startpunkt für die Berechnung der Gutbewegung in der Rinne.

Diese Erklärung reicht allein nicht aus, um die Abweichungen zu begründen. Es gibt einen Übergangsbereich, in dem sich das Gut zu einem Teil auf der Rutschenebene, zum anderen an der Wandung der Überhöhung (siehe Abb. 5-4.) abstützt. Während sich das Gut in dieser Bewegungsphase befindet, wirken die Reibkräfte demzufolge anders auf das Gut ein, als es im Berechnungsmodell berücksichtigt worden ist. Es kommt zu weiteren Abweichungen zwischen Berechnung und Versuch.

Eine weitere Ursache für die Abweichungen liegt in der Keilwirkung der Gutkanten (siehe Abb. 5-3.). Diese tritt ein, wenn sich das Gut vollständig in der Überhöhung befindet (speziell bei Schachtelware). Durch die Keilwirkung findet eine Erhöhung der Reibungswirkung statt. Dadurch ergibt sich eine engere Bahnkurve des Gutes in der Überhöhung.

Die Ergebnisse aus Tabelle 4-12. und die Überlegungen zu den aufgetretenen Abweichungen lassen sich durch die Darstellungen der Bahnkurven belegen.

Abb. 4-47. Beispiel Testgut 1 (Faltschachtel), Gewicht 3000 g, Sortergeschwindigkeit 1,9 m/s. Messung durchgezogene Linie, Berechnung gestrichelte Linie, Überhöhung gekennzeichnet durch gestrichelte Linie.

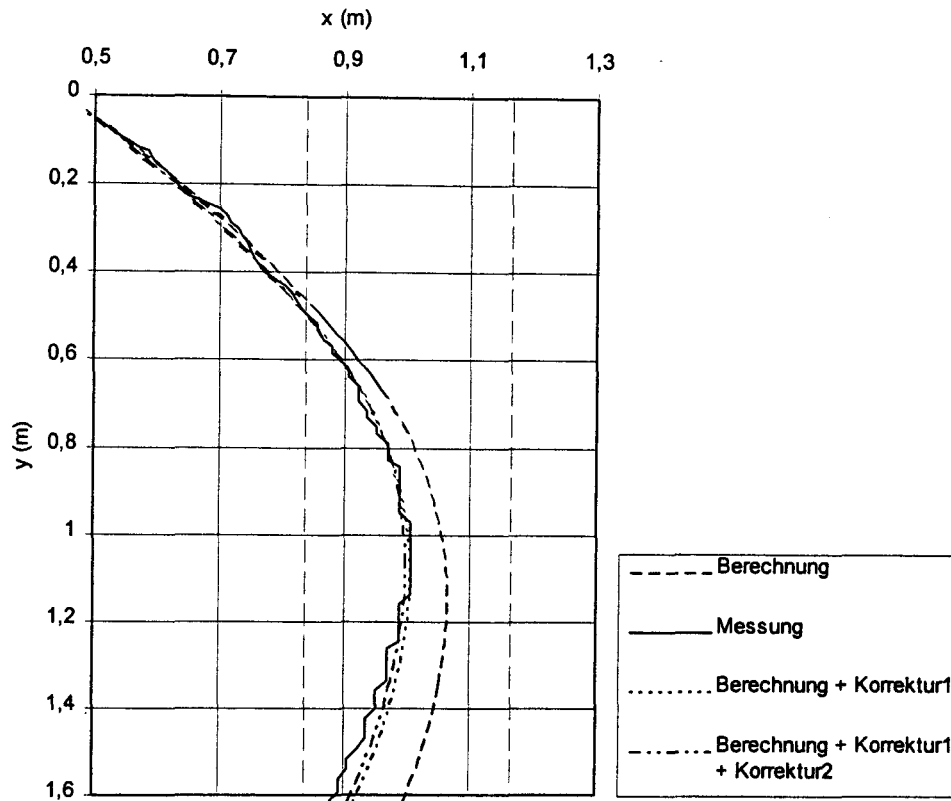


Wie zu sehen ist, sind die Berechnungsergebnisse um so genauer, je steiler der Neigungswinkel der Rutsche ist. Dies entspricht den Erkenntnissen aus der Analyse der Abweichungen. Weiterhin ist erkennbar, daß das Gut schon früh von der Überhöhung abgelenkt wird (linkes Diagramm). Dieser Effekt führt im wesentlichen zu den Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung und wird im Kapitel 5.2, S. 120 ff. näher beschrieben.

Wenn man den Startpunkt für die Berechnung der Gutbewegung in der Überhöhung zurückverlegt in den *Punkt der ersten erkennbaren Beeinflussung des Gutverlaufes*, läßt sich die aufgetretene Abweichung zum Teil kompensieren. Dabei wird vereinfachend angenommen, daß die Gutgeschwindigkeit an beiden Punkten gleich ist.

Das Ergebnis der *Korrektur 1* zeigt die folgende Abbildung 4-48. Hier wurde die Kurve um $x = -0,06$ m und $y = -0,06$ m verschoben.

Abb. 4-48. Korrektur der Berechnungsergebnisse am Beispiel Testgut 1 (Faltschachtel)
(aus Abb. 4-47, Neigung 20 Grad).



Das Diagramm zeigt, daß die Korrektur der Berechnungen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchswerten ergibt. Lediglich im Auslauf der Rinne sind Abweichungen festzustellen.

Um den Einfluß der *Kantenwirkung* (siehe Kap. 5.2, S. 120 ff.) auf das Gleitverhalten zu überprüfen, wurde das Programm ergänzt um die Beziehung 5-2. für die Berechnung der Zentrifugalkraftwirkung. Damit verstärkt sich die Reibkraft in der Rinne in diesem Fall (Testgut 1) um den *Faktor 1,3*. Die Auswirkung der *Korrektur 2* auf den Bahnkurvenverlauf ist in Abb. 4-48 gut zu erkennen. Die Kurve verengt sich im Auslauf der Rinne, da die Schachtel (vor allem bei höherer Geschwindigkeit) stärker abgebremst wird. Dadurch läßt sich der Fehler in der Bahnkurvenberechnung nochmals vermindern.

Insgesamt gesehen ist festzuhalten, daß die Berechnung der Bahnkurven in der Überhöhung noch verbesserungswürdig ist. Die Ansätze dazu wurden oben aufgezeigt. Mit ihnen läßt sich die Abweichung auf ein Maß bringen, welches für die Praxis ausreichend genau ist.

Mit dem umgesetzten Berechnungsmodell lassen sich nur bei Neigungswinkeln von 25 Grad ausreichend genaue Ergebnisse erzielen. Dabei sind die Ergebnisse für Schachteln (max. Abweichung 40 mm) genauer als für Beutel (max. Abweichung 100 mm).

5. Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse wird im folgenden anhand der Zusammenhänge, die sich während der Versuche ergeben haben, durchgeführt. Dabei werden die Fragestellungen, die in Kapitel 1 aufgeworfen wurden, im Gesamtzusammenhang besprochen.

5.1 Reibungseinflüsse auf die Stückgutbewegung

Wie aus den Versuchen zur Bodenkontur von Stückgütern hervorgeht, sind charakteristische Unterschiede zwischen den verschiedenen Schachtelformen zu erkennen. Je nach Typ der Schachtel läßt sich die Bodenkontur der Bauform zuordnen. Die Berührungsfläche der Schachtel verändert sich bei zunehmender Beladung und nimmt bei einem Gewicht von 3 kg Größenordnungen 40 bis 60 % der Bodenfläche der Schachtel ein. Es existiert dabei kein linearer Zusammenhang zwischen Gutgewicht und Berührungsfläche des Gutes.

Wie sich aus den Versuchen zum Reibungsverhalten ergab, ist die Bauform entscheidend für den Verlauf des Reibbeiwertes abhängig von der Gleitgeschwindigkeit. Somit kann gefolgert werden, daß bestimmte Schachteltypen auch bestimmte Eigenschaften haben, die es erlauben, sie in Gruppen der gleichen Bauform einzuordnen. Für die Übertragbarkeit der gefundenen Ergebnisse bedeutet dies, daß für andere Anwendungsfälle Berechnungen der Endstellenrutsche möglich sind, wenn sich die verwendeten Güter in die getesteten Bauformenklassen von Schachteln einordnen lassen. Dazu muß der Gleitreibbeiwert des Gutes bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten ($< 0,5$ m/s) für die verwendete Rutsche bekannt sein (= Koeffizient A). Der Anstieg des Gleitreibbeiwertes mit der Geschwindigkeit ist dann über das Verhalten der entsprechenden Gutklasse zu bestimmen.

Der Gleitreibbeiwert von Schachtelware ist wesentlich stärker abhängig von der Geschwindigkeit als der Gleitreibbeiwert von Beutelware. Die Abhängigkeiten des Reibbeiwertes von Gleitgeschwindigkeit und Gutgewicht werden in der Tab. 4-5 anschaulich deutlich gemacht. Der Gleitreibbeiwert von Beutelware ist nicht so stark abhängig von der Gutgeschwindigkeit und vom Gutgewicht, weil es keine Möglichkeit gibt, eine Luftströmung unter dem Gutboden zu erzeugen. Statt dessen treten dort aufgrund der biegeweichen Materialeigenschaften dynamische Phänomene auf, die die Bewegung von Beutelwaren schwerer vorhersagbar machen als von Schachtelware. So wurde zum Beispiel in den Versuchen beobachtet, daß bei den Reibungsmessungen auf Kunststoffflächen Beutelware plötzlich einen stark steigenden Reibbeiwertsverlauf bei konstanter Gleitgeschwindigkeit

hatten. Die Ursache liegt vermutlich in einer Evakuierung von Zwischenräumen zwischen Beutel und Gleitfläche. Diese führt zu einem Ansaugeffekt, der die Reibbeiwerte steigen läßt. Das Modell für die Berechnung des Gleitreibbeiwertes von Schachteln (Kap 3.1) ließ sich in den Versuchen nachweisen, da sich die prognostizierten Effekte anschließend bei der Messung des Gleitreibbeiwertes einstellten. Schachteln haben im Gegensatz zu Beuteln eine "wellige" Bodenfläche, die das Auftreten einer Strömung unter dem Gutboden ermöglicht. Es ließ sich über die Messung der Bodenkonturen (Kap. 4.1.1.1) ebenfalls nachweisen, daß sich durch das steigende Gewicht des Stückgutes die Flächen des Schachtelbodens einebnen. Durch die geringere Welligkeit des Gutbodens sinkt der Einfluß des Andruckeffektes aus der Luftströmung, damit wird der Anstieg des Reibbeiwertes mit der Gleitgeschwindigkeit verringert. Der Einfluß der Bodenkontur auf den Reibbeiwert ließ sich durch Versuche mit definierten Bodenkonturen (Kap. 4.1.2.2) weiter bestätigen. Aus den Versuchen ging auch hervor, daß die Schachtelform das Gutverhalten nicht nachweisbar beeinflusst.

Um das vorgeschlagene Berechnungsmodell weiter zu verbessern, müßte die Bodenkontur einer Schachtel abhängig vom Beladungsgewicht ermittelt werden. Dies setzt einen Berechnungsansatz voraus, der die Biegung des Gutbodens bei der Ermittlung der Berührungsfläche berücksichtigt. Umsetzbar ist diese Berechnung am sinnvollsten mit Finite-Elemente-Methode (FEM), da die Schachtel meist einen komplexen Aufbau besitzt, der sich mit den Berechnungsmethoden der Platten- und Membrantheorie [15,24] nur unzureichend abbilden läßt.

Es ist weiterhin gelungen, einen empirischen und einen analytischen Ansatz für die Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten für Stückgüter zu finden (Tab. 4-1.). Verglichen mit dem Ansatz von Kragelski, Dobycin und Kombalov (Kap 1.1), liegt der Berechnung des Reibungskoeffizienten eine grundsätzlich andere Überlegung zugrunde. In diesem Fall wurde eine praxisnahe Berechnungsgleichung aufgestellt, die das gesamte Phänomen der Reibung von Stückgütern in einer Gleichung erfaßt. Aufgrund des großen Einflusses der äußeren Widerstände auf das Gut spielt die eigentliche Reibpaarung der Werkstoffe eine untergeordnete Rolle (vgl. Ergebnisse aus Kap. 4.2.1) und hat nur Auswirkungen auf den Offset des Reibbeiwertes. Der Verlauf des Reibbeiwertes bezogen auf die Reibpaarung ist aus den durchgeführten Versuchen nicht nachvollziehbar, da diese Effekte bei der Betrachtung des Gesamtwiderstandes nur mit einfließen, aber nicht separat betrachtet werden können. Es wurden jedoch charakteristische Kurvenverläufe für jedes Rutschenmaterial ermittelt, offensichtlich spielt die Wahl des Rutschenmaterials trotzdem eine große Rolle für das Bewegungsverhalten der Güter.

Wie aus den Analyseergebnissen von Kap. 4.2.3 hervorgeht, ist die Genauigkeit der Rutschenebene von untergeordneter Bedeutung für das Gutverhalten, da zwar Abweichungen von bis zu 2 Grad Neigung gefunden wurden, diese sich aber bei der Beobachtung des Bahnkurvenverhalten nicht ausgewirkt haben.

5.2 Bewegungsverhalten von Stückgütern auf Rutschen, Berechnungsverfahren

Die Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Gütern bei der Ausgabe in Endstellen fängt beim Sorterelement an. Die Untersuchung der Lage der Stückgüter auf einem Kippschalensorter (s. Abb. 4-20.) ergab, daß die Wiederholgenauigkeit der Aufgabestationen sehr gut ist, da die Verteilungsfunktion der Güter auf der Kippschale eine geringe Streubreite aufweist. Dagegen liegt der Median der Verteilung asymmetrisch auf der Kippschale, was zu Nachteilen beim Abwurf der Güter führt. Durch die Konzentration der Güter auf einer Seite der Kippschale ergibt sich ein zu beiden Seiten des Sorters verschiedener Abwurfoffset. Gleichzeitig ergibt sich damit zu beiden Seiten ein verschiedener Streubereich für die Bahnkurven. Ein weiterer Nachteil ist die starke Streuung der Güter in Förderrichtung. Im vorliegenden Fall entsteht eine Variationsbreite von 200 mm beim Abwurfoffset. Die Streuung der Güter quer zur Förderrichtung ist dagegen geringer und wirkt sich nicht wesentlich auf die Streubreite der Güter beim Abwurf aus.

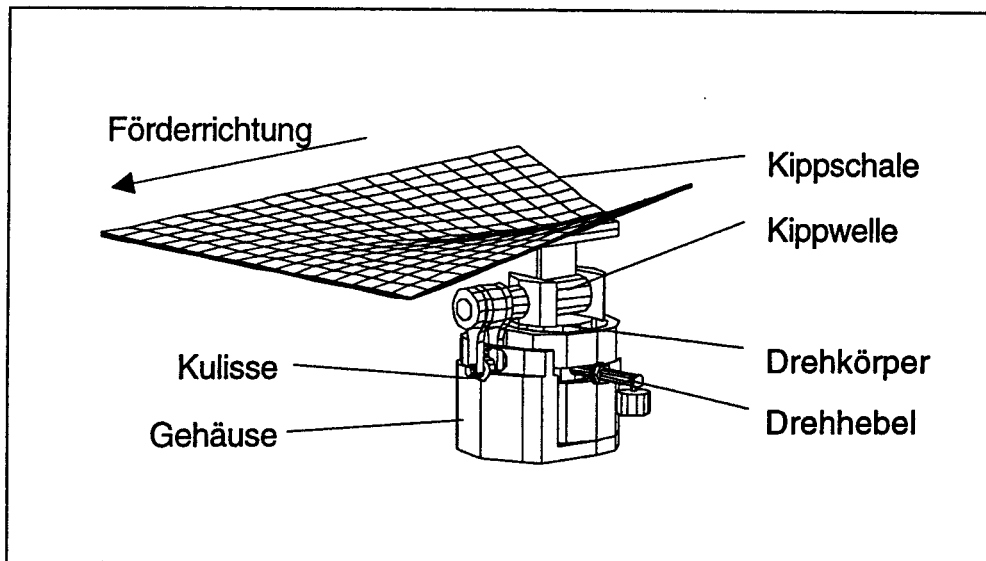
Als Konsequenz aus dem ermittelten Verhalten muß gefordert werden, daß die Eingabestationen wesentlich präziser arbeiten als zur Zeit, damit die Vorteile, die durch die Möglichkeit der genauen Bahnkurvenberechnung entstehen, nicht durch eine unpräzise Eingabevorrichtung wieder zunichte gemacht werden. Hier hat ein Kippschalensorter seine systembedingten Nachteile. Ein Quergurtsorter ist demgegenüber z.B. wesentlich besser zu beherrschen.

Durch den Vergleich zweier Kippschalensortertypen (Abb. 4-21 bis Abb. 4-24.) wurde deutlich, daß noch ein Potential in der Entwicklung anderer Kippschalensorterkinematiken liegt, um die Nachteile dieser Technik zu kompensieren. Wie aus den Ergebnissen hervorgeht, ist der herkömmliche Kippschalensorter dem räumlich kippenden Element in der benötigten Rutschenbreite unterlegen. Demgegenüber hat er allerdings ein wesentlich niedrigeres Geschwindigkeitsniveau beim Auswerfen der Güter, so daß die Gefahr der Gutbeschädigung aufgrund von Aufprall oder Stößen bei diesem Sortertyp geringer ist. Ziel der Entwicklung von Kippschalensortertypen sollte es sein, diese beiden positiven Eigenschaften in einem Sorterelement zu vereinigen. Der Autor hat während seiner Tätigkeiten am IML einen Prototypen eines Kippschalenelementes entwickelt, welches die Bahnkurvenbreite eines Gutes beim Abwurf um ca. 50 % vermindern kann. Eine Darstellung des Elementes zeigt die Abbildung 5-1.

Die Analyse der Bewegungsbahnen von Gütern in einer Endstellenrutsche ergab, daß Beutelware wesentlich stärker streut als Schachtelware. Wie sich herausstellte, lag dieser Fehler weniger in einer Störung des Gleitverhaltens, als vielmehr in einem unterschiedlichen Offset beim Eintritt in die Endstelle. Diese Versatz entsteht wahrscheinlich durch das unterschiedliche Ablösen des Gutes von der Kippschale. Je nach Gutverhalten, kann sich das Abrutschen des Gutes von der Kippschale verzögern. Aus Beobachtungen konnte ermittelt

werden, daß das Gut sich erst dann auf der Kippschale in Bewegung setzt, wenn der Abkippvorgang beendet ist. Dieser Zeitpunkt kann sich bei Beutelwaren durchaus verzögern, so daß sich eine Streuung beim Offset ergibt. Die Streuung hängt mit der Flexibilität der Beutel zusammen; speziell die Polybeutel "saugen" sich oftmals auf Gleitflächen an.

Abb. 5-1. Neuartiges Kippschalenelement



Es konnte weiterhin festgestellt werden, daß eine Einschnürung der Bahnkurven aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes eintritt (s. Abb. 4-26. u. Tab. 4-9.). Dieser Einschnürungspunkt ist die günstigste Stelle, um das Gut bereitzustellen für einen Handhabungsvorgang, so z.B. für eine Palettierung von Versandkartons auf Auftragspaletten mittels Robotereinsatz. Die Lage der Güter ist im Punkt der maximalen Einschnürung der Bahnkurven am besten definiert.

Wenn die Rutsche jedoch als Puffer für viele Güter dienen soll, muß das Gut bis mindestens an diese Stelle frei rutschen können. Erst danach kann ein Pufferabschnitt in der Rutsche beginnen. Am uweckmäßigsten ist es, ab dort mit seitlichen Begrenzungen das Gut zu führen, z.B. mit einer Überhöhung.

Der Winkel, unter dem eine Endstelle an die Sortieranlage angesetzt wird, ist abhängig vom verwendeten Kippschalensortertyp, der Sortergeschwindigkeit und dem Neigungswinkel der Rutschebene. Aus den Versuchen konnten optimale Anstellwinkel (s. Kap. 4.1.5, Einfluß des Anstellwinkels) ermittelt werden, die eine minimale Breite der Endstelle gewährleisten und trotzdem gutschonend sind, da sie eine Berührung mit seitlichen Begrenzungen der Endstelle möglichst vermeiden. Falls das Gut trotzdem die Seiten berührt, geschieht dies unter minimalen Einflüssen auf das Gut, d.h. besonders gutschonend.

Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes spiegelt sich auch in den Geschwindigkeitsdiagrammen der Versuche wieder. Aus den Kurven (s. Abb. 4-31. bis 4-33.) wurde deutlich, daß es gutindividuelle Grenzgeschwindigkeiten gibt, die beim Rutschvorgang

nicht überschritten werden können. Sollte ein Gut schneller sein (z.B. bei der Übergabe auf eine Rutsche) wird es abgebremst. Dieser Zusammenhang erscheint einleuchtend, da ansonsten alle Güter, die sich auf Rutschen bewegen, im Laufe des Weges immer schneller werden würden. Das allerdings die Grenzggeschwindigkeiten in einem derart niedrigen Geschwindigkeitsbereich liegen würden, war nicht zu erwarten. Es bestärkt ebenfalls die Modellannahme über das Reibungsverhalten.

Anhand der Gleichung 3-13. läßt sich durch die *Bedingung* $\ddot{s} = 0$ die Grenzggeschwindigkeit für Güter auf der Testoberfläche 2 berechnen. Nach $\dot{s} (= v)$ aufgelöst ergibt sich die Grenzggeschwindigkeit für die ebene Rutsche zu:

$$v = \sqrt{\frac{\tan \alpha - A}{B}} \quad (5-1.)$$

Die Koeffizienten A und B der Testgüter sind im Anhang tabelliert.

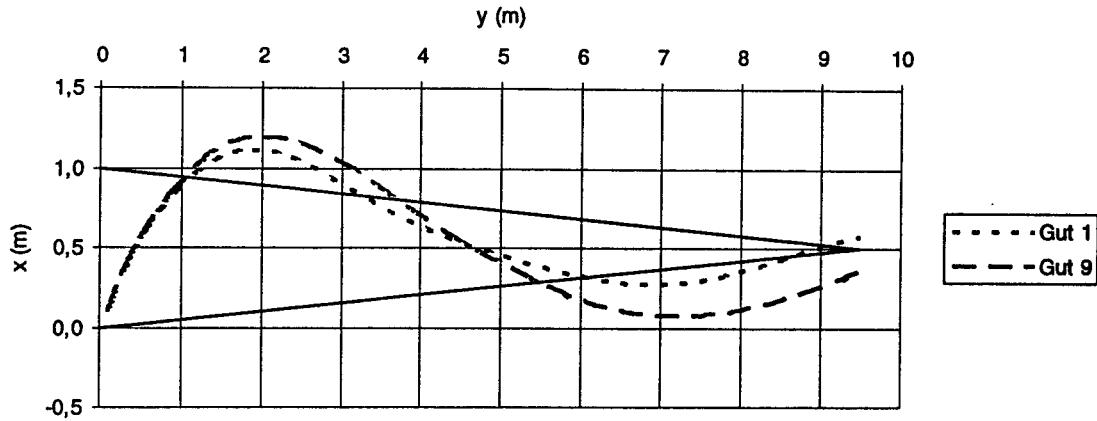
Die Beobachtung der Gutbewegungen unter Einfluß der Überhöhung der Rutsche zeigte, daß auch die Überhöhung einen geschwindigkeitsregulierenden Einfluß hat. Die Zentrifugalkraft bremst das Gut aufgrund der starken Reibung ab. Eine positive Auswirkung ist in der Praxis, daß das Gut sich am Wendepunkt der Bahn in der Überhöhung weitgehend unabhängig von den Guteigenschaften "fokussiert". Diese Eigenschaften führen dazu, daß die spezifischen Reibungsverhältnisse der Güter sozusagen "vereinheitlicht" werden. Sogar unterschiedliche Sortergeschwindigkeiten wirken sich nicht wesentlich aus. Die Streuung der Güter bleibt trotz höheren Geschwindigkeitsniveaus konstant (s. Abb. 4-34.).

Es ist daraus zu folgern, daß derartig aufgebaute seitliche Begrenzungen auf das Gut einen positiven Einfluß hinsichtlich Gutkontrolle und Gutgeschwindigkeit haben. Aus den Beobachtungen ist zu schließen, daß eine optimal konstruierte Endstellenrutsche zwei seitliche Begrenzungen mit der Form einer hyperbolischen Spirale (vgl. Kap. 3.2.3) haben sollte, die unter einem definierten Anstellwinkel die Güter in der Endstelle auf einen Punkt zusammenführen. Die Konstruktion könnte übergangslos als ein Konus ausgeführt werden, um eine optimale Beeinflussung der Bewegungsbahn zu erzielen.

In der untenstehenden Abbildung wird eine günstige Ausführung einer langen Rutsche vorgestellt und berechnet. Das Gut wird durch die Rutschenform fokussiert und kontrolliert; die Auswirkungen auf die Gutbewegung werden anhand der Bahnen zweier verschiedener Güter deutlich gemacht.

Aus den Bewegungsgleichungen in Kap. 3.2 wurde ein Programm erstellt, welches es ermöglicht, die Bahnkurven von Gütern genau zu berechnen, sowohl auf der ebenen Rutsche als auch bei einer Rutschenkonstruktion mit kreisförmigen, seitlichen Begrenzungen. Mit Hilfe dieses Programms wurden Auslegungsdiagramme erstellt, die es ermöglichen, in einem eingeschränkten Bereich an Parametervariationen Berechnungen zur Rutschendimensionierung anzustellen.

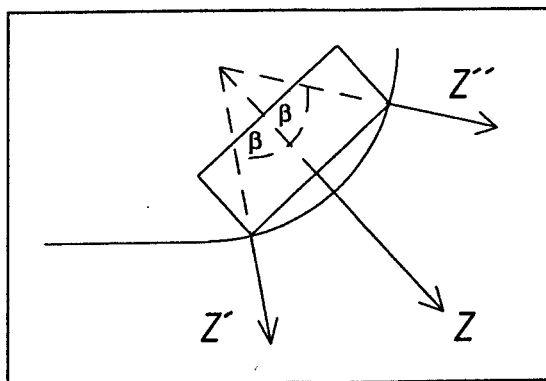
Abb. 5-2. Konstruktion einer günstigen Rutschenform für eine Endstelle, Bewegungsbahnen der Testgüter 1 (Faltschachtel) und 9 (PP-Beutel), $v(x) = 2 \text{ m/s}$, $v(y) = 1,15 \text{ m/s}$, Beginn seitliche Begrenzung eingezeichnet, $r = 0,5 \text{ m}$



Eine Überprüfung der Diagramme mit Hilfe des Berechnungsprogrammes ergab, daß die Genauigkeit der Berechnung mit Hilfe der Auslegungsdiagramme für die Praxis ausreichend ist. Lediglich das Auslegungsdiagramm zur Abschätzung des benötigten Rinnenradius einer seitlichen Begrenzung der Rutsche liefert nur Ergebnisse für Überschlagsrechnungen, da die Vereinfachungen des Modells gegenüber der Realität in diesem Fall großen Einfluß auf die Genauigkeit der Berechnungen haben. Zur Erläuterung des Zusatandekommens der Abweichungen werden im folgenden die Vorgänge des Gleitvorganges von Schachtelware in der Rinne genauer betrachtet.

Die Schachtel stützt sich beim Eintritt in die Rinne auf drei Ecken oder zwei Kanten ab. Dadurch wird eine Keilwirkung erzeugt, die die Reibung erhöht und damit das Gut stärker abbremst.

Abb. 5-3. Wirkung des Keileffektes auf die Gutkanten

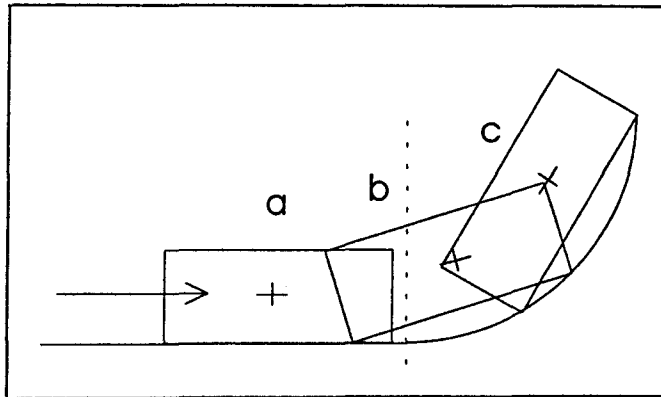


Die Andruckverstärkung durch die Keilwirkung der Kanten läßt sich näherungsweise zu

$$Z = \cos \beta (Z' + Z'') \quad (5-2.)$$

bestimmen [25]. Bei Gütern, die groß im Verhältnis zum Rinnenradius sind, wirkt sich dieser Verstärkungseffekt besonders aus; bei kleinen Gütern ist er vernachlässigbar gering. Während des Übergangs von der ebenen Rutschenfläche in die Rinne entstehen vom Berechnungsmodell abweichende Kraftwirkungen auf das Gut. Die untenstehende Graphik verdeutlicht die Zustände beim Übergang des Gutes von der ebenen Rutsche in die Überhöhung. In der Zwischenphase (b) gleitet eine Kante des Gutes auf der Ebene, während eine Kante sich schon in der Rinne bewegt.

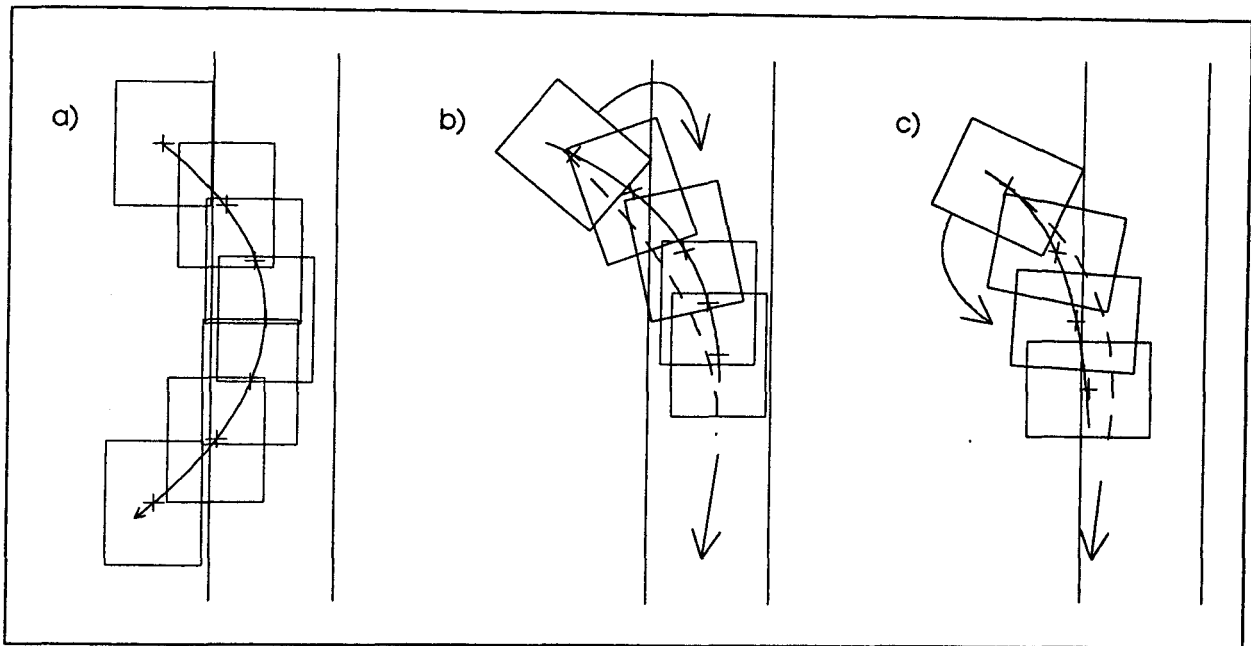
Abb. 5-4. Übergang des Gutes von der ebenen Rutsche in die Überhöhung



Hinzu kommen Dreheffekte des Gutes um die Hochachse, die die gemessene Bewegungsbahn (die sich am Flächenschwerpunkt des Gutes orientiert) von der berechneten Bahn abweichen läßt. Dabei hängt die Drehrichtung der Güter davon ab, wie das Gut in die Überhöhung einläuft. Unten sind drei mögliche Situationen für den Eintritt der Güter in die Überhöhung dargestellt. Fall (a) zeigt das Auftreffen des Gutes mit einer Kante auf die Überhöhung. Fall (b) und (c) zeigen die Situation, daß das Gut mit einer Ecke in die Überhöhung einläuft. Die gemessene Bahn des Gutschwerpunktes wird mit einer durchgezogenen Linie gezeigt, die berechnete Bahn mit einer gestrichelten Linie. In den Fällen (b) und (c) werden die Drehrichtungen der Güter durch Pfeile angedeutet.

Die damit verbundenen Auswirkungen lassen die berechnete Bewegungsbahn des Gutes in der Überhöhung z.T. stark von den Versuchsergebnissen abweichen. Erst mit Hilfe von Korrekturrechnungen wird eine befriedigende Übereinstimmung von Berechnung und Versuch erzielt (siehe Kapitel 4.2.3.1).

Abb. 5-5. Bewegung eines Gutes in der rinneförmigen Überhöhung
(Draufsicht, unmaßstäblich).



Im Gegensatz dazu sind die Gutbewegungen auf der ebenen Rutsche sehr genau vorherbestimmbar. Das Programm lieferte ohne weitere Umrechnung der Ergebnisse Werte, die weniger als 2 % von den Versuchswerten abwichen. In diesem Punkt hat sich gezeigt, daß eine genaue Kenntnis der auf die Bewegung einwirkenden Parameter es ermöglicht, sehr gute Berechnungsergebnisse zu erzielen. Es konnte ebenfalls festgestellt werden, daß die Schachtelwaren bessere Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen lieferten als die Beutelwaren. Der Grund liegt in dem noch unerforschten Verhalten von flexiblen Gütern. Hier liegt noch ein weiterer Forschungsbedarf, wenn auch die bis jetzt erzielte Genauigkeit von < 4 % Abweichung schon sehr vielversprechend ist.

Mit diesen Auslegungsdiagrammen können Rutschenkonstruktionen ausgelegt werden, ohne weitreichende Versuche mit Testgütern durchzuführen. Wenn genauere Berechnungen der Bahnkurven notwendig sind, kann mit dem Programm die Auslegung überprüft werden.

In der Praxis sollten für den Planungsfall einfache Messungen des Reibungsverhaltens vorgenommen werden (s. Bemerkungen vorher), um sich aus den getesteten Testgütern ein repräsentatives Testgutspektrum für die Berechnungen zusammenzustellen. Um die Berechnungen der Rutschenbreite und der maximalen Gutgeschwindigkeit in einer Rutsche vorzunehmen, werden mit allen Gütern Testläufe simuliert. Daraus ergibt sich eine Hüllkurve, in der alle Versuchsläufe liegen, ähnlich Abb. 4-23. oder Abb. 4-24. Diese Hüllkurve gibt den möglichen Aufenthaltsbereich aller Stückgüter des Planungsfalls an. Diese Fläche sollte der konstruktiven Umsetzung der Rutschenfläche entsprechen. Diese Berechnungen gelten unabhängig vom verwendeten Sortersystem, lediglich die Anfangsgeschwindigkeiten beim Abwurf müssen bekannt sein.

Um die Ergebnisse auf spezielle Sorter anwenden zu können, muß der Berechnung des Bahnkurvenverlauf die Berechnung des Abwurfverhaltens des jeweiligen Sorterelements vorangestellt werden. Bei einigen Sorterelementen ist der Zusammenhang einfach, z.B. bei Quergurtsortern oder Schiebeschuhsortern. Diese Sorter arbeiten mit festen Ausgabegeschwindigkeiten, so daß die Bewegungszustände des Gutes fest vorgegeben sind und nicht variieren können. Im Berechnungsbeispiel in Kap. 4.2.2.1 werden die Zusammenhänge für die Auslegung bei Kippschalensortern vorgestellt. Mit Hilfe dieser Diagramme ist eine Berechnung des Abwurfverhaltens von Kippschalensortern möglich.

Dieser Berechnungsansatz ist jedoch immer noch statisch und basiert auf einer vorgegebenen Abwurfposition des Gutes auf der Kippschale. Um wirklich das Verhalten des Sorters abzubilden, muß noch ein Schritt weitergegangen werden. Anhand von Untersuchungen wie in Kap. 4.1.3 kann die statistische Verteilung der Lage der Güter auf dem Sorterelement mit berücksichtigt werden. Das Verhalten eines Sorters in der Praxis ist, daß die Bahnkurven in einer Endstelle sich nach statistischen Gesetzmäßigkeiten verteilen. Dadurch kann es überhaupt erst zu Fehlsortierungen kommen, bei denen das Gut in eine benachbarte Endstelle gelangt. Wie aus den Untersuchungen hervorgeht, ist der Offset der Gutabgabe in die Endstelle genau vorherkalkulierbar. Die Tatsache, daß Güter in der Praxis trotzdem streuen, liegt vor allem an der statistisch verteilten Lage der Güter auf dem Sorterelement. (Gründe, die auf klimatischen Bedingungen, Verschmutzung der Endstelle etc. basieren, werden zunächst außer acht gelassen, da sie im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden konnten). Es ist jedoch nach den vorliegenden Erkenntnissen möglich, diesen Faktor zu berücksichtigen. Als Ausbau des vorgestellten Berechnungsprogrammes sollte es möglich sein, einzelne Sortertechniken auszuwählen und eine Berechnung unter Berücksichtigung der speziellen kinematischen Bedingungen des jeweiligen Sortertyps durchzuführen.

6. Schlußfolgerungen, Ausblick

Über die Verwendung einer gemessenen Verteilungsfunktion der Lage der Güter auf dem Sorterelement kann eine genaue Planung der Abwurfbahnen durchgeführt werden. Es wird eine vorher definierte Sortiersicherheit angenommen, die dann durch Berechnung der Bahnen der Güter in eine entsprechende Endstellendimensionierung umgesetzt wird. Die Verteilungsfunktion gibt dabei an, mit welcher Sicherheit sich Güter in einem bestimmten Aufenthaltsbereich der Endstelle befinden werden. Je nach gewünschter Sortiersicherheit ist es also möglich, eine dafür ausgelegte Endstellenbreite zu berechnen. Damit ist eine direkte Umsetzung von Qualitätsgrößen (= Sortiersicherheit) einer Planung in Kostengrößen (= Platzbedarf u. Konstruktion der Endstelle) möglich.

Es ist für die weitere Erforschung des Gutverhaltens auf gekrümmten Rutschen von sehr großer Bedeutung, das Berechnungsmodell zu verfeinern. Es muß zukünftig möglich sein, mit einem Flächenlastmodell der Stückgüter zu arbeiten. In diesem Fall würde die Berechnung des Gleitreibungskoeffizienten B mit in das Programm einzubinden sein. Benötigt würde dann nur noch der Offset des Gleitreibbeiwertes (= Koeffizient A). Die Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Geschwindigkeit ist dann über die (bekannte) Bodenkontur des Gutes möglich. Die aufgestellten Bewegungsgleichungen müssen um die Möglichkeit erweitert werden, Drehbewegungen der Güter um die Hochachse zu berechnen. In Verbindung mit der vorher vorgeschlagenen Erweiterung des Punktlastmodells auf ein Flächenlastmodell ist damit eine genauere Berechnung von Gutbewegungen möglich.

Aufgrund der Möglichkeiten, die sich durch die Berechnung des Gutverhaltens von Stückgütern ergeben haben, sollte es später einmal möglich sein, ganze Fördertechniksysteme zu simulieren. Bei den steigenden Anforderungen an eine Sortierung, die sich vor allem in immer höheren Durchsätzen und Fördergeschwindigkeiten ausdrücken, ist es ein dringender Bedarf, das Verhalten von Gütern auf derart komplexen Systemen schon in der Planungsphase simulieren zu können. Es liegen auch andere Arbeiten zur Berechnung des Gutverhaltens auf Förderelementen vor, zum einen für das Verhalten von Gütern an Schrägabweisern, zum anderen zum Verhalten auf Rollenbahn- und Gurtkurven von Stetigförderern [21,23]. Weitere Arbeiten sind in Bearbeitung, u.a. am Lehrstuhl FLW der Universität Dortmund.

Die Simulation von fördertechnischen Vorgängen ist eine andere Qualität von Simulation, als sie z.Zt. in Materialflußplanungen angewandt wird [17]. Hierbei geht es nicht um Modelle auf einem hohen Abstraktionsniveau zur Verifizierung von logistischen Kenngrößen, sondern um die Simulation des Realverhaltens von Gütern in der Bewegung. Diese Simulation ist eher vergleichbar mit einer Fahrzeugsimulation auf einer im Rechner abgebildeten Teststrecke.

Die statistische Verteilung von verschiedenen Stückgütern in einem Fördersystem und das ebenfalls nur statistisch zu behandelnde Problem der Reibungsabhängigkeit von Stückgütern sind dabei wichtige Simulationsparameter.

Der Bedarf für solche Simulationen von Fördertechnikgesamtanlagen wird steigen, da die Tendenz zu immer höheren Fördergeschwindigkeiten speziell bei Sortern unübersehbar ist. Damit diese Anlagen beherrschbar bleiben, muß für die detaillierte Auslegung einer Anlage eine Simulation des Bewegungsverhaltens erfolgen. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang auch die Tendenz zur Verpackungsminimierung. Sie sorgt für immer instabilere Stückgüter, die immer empfindlicher auf eine Belastung reagieren.

Die vorliegende Arbeit ist als eine Grundlage in diese Richtung zu verstehen, sie liefert für den Bereich der Endstellenoptimierung an Sorteranlagen einen Beitrag zur besseren Planungsgenauigkeit solcher Hochleistungskommissioniersysteme und schafft die Voraussetzungen für die Schnittstellenautomatisierung im Bereich der Endstelle.

7. Zusammenfassung

Sortier- und Verteilanlagen sind die wichtigsten Bestandteile einer Hochleistungskommissionierung. Sie werden in steigendem Maße eingesetzt, da viele Versandhäuser, Post und Paketdienstleister oder Großhändler den Bedarf haben, in immer kürzeren Zeiteinheiten Kundenaufträge zu kommissionieren. Sortieranlagen sind große Installationen mit vielen Endstellen, in denen die Artikel eines Kundenauftrags gesammelt werden. Die Endstellen werden häufig als *Rutschen* ausgebildet, die für jeden Anwendungsfall kundenspezifisch konstruiert werden müssen. Zur Zeit geschieht die Auslegung der Endstelle anhand grober Erfahrungswerte nach einem "trial and error"-Verfahren. In aufwendigen Vorversuchen müssen die Sortierhersteller Erfahrungen mit dem Gut des Kunden gewinnen und daraus eine Endstellenauslegung ableiten.

Daraus geht hervor, daß Hilfsmittel erarbeitet werden müssen, um bei der Planung und Konstruktion von *Rutschen als Sorterendstellen* eine Verbesserung der obengenannten Schwachstellen zu erreichen. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die Parameter *Reibungsverhalten des Gutes, Gewicht des Gutes und die verwendete Sortergeschwindigkeit*. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, in dem oben geschilderten Zusammenhang Antworten auf die folgenden Fragestellungen zu erhalten:

1. Ermittlung der *Abhängigkeiten des Reibungsbeiwertes* von der *Gutgeschwindigkeit* und dem *Gutgewicht*
2. Erarbeitung von *Auslegungsverfahren zur Bestimmung der Bahnkurven von Stückgütern* an Endstellenrutschen.

Zum ersten Punkt wurden *empirische Gleichungen für den Zusammenhang zwischen Gleitreibbeiwert, Gutgewicht und Guttyp* gefunden. Dazu wurden die Güter, die häufig an Sortieranlagen verwendet werden, zunächst zu einem repräsentativen Gutspektrum zusammengefaßt. Verwendung fanden elf verschiedene Schachtel- und Beutelformen, Behälter wurden ausgeklammert. Mit diesen Gütern wurden systematische Versuchsreihen durchgeführt, deren Ergebnis Kennfelder für den Gleitreibbeiwert abhängig von Gutgewicht und Gleitgeschwindigkeit sind. Daraus wurden Näherungsgleichungen entwickelt, die später die Grundlage der Berechnung der Bahnkurven von Stückgütern sind. Die Gleichungen haben eine Genauigkeit von etwa $\pm 5\%$ und sind für die Praxis einfach anwendbar. Durch Analyse von verschiedenen Bodenformen von Stückgütern ließen sich Erkenntnisse über spezifische Besonderheiten der Testgüter finden. Für die Gruppe an Schachteln konnte mit Hilfe dieser Erkenntnisse die em-

pirisch aufgestellte Gleichung für den Reibbeiwert mit einem *analytischen Modell* untermauert werden.

Aufgrund der *Untersuchung der Bodenkonturen* ließen sich auch die Gründe für eine lastabhängige Veränderung des Gleitreibbeiwertes bei Stückgütern finden.

Um das zweite Ziel der Arbeit zu erreichen, wurden mit dem vorher erwähnten Testspektrum *Versuche mit einem Kippschalensorter* unternommen. Mit einem Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem wurden systematisch *Untersuchungen an Bahnkurven von Gütern* bei verschiedenen Einstellparametern der Rutsche und des Sorters vorgenommen. Die Erfassung der Gutbewegung erfolgte ohne Gutbeeinflussung mit Hilfe einer Bildverarbeitung.

Parallel dazu wurden die *Bewegungsgleichungen für Stückgüter auf einer Endstellenrutsche* erarbeitet. Damit ist es möglich, die Endstellenbreite anhand des Gutverhaltens beim Abwurf genau zu dimensionieren. Notwendig ist dazu eine genaue Kenntnis aller Einflußgrößen auf die Gutbewegung.

Auf Basis dieser Bewegungsgleichungen, die sich neben der Berechnung auf einer ebenen Rutsche auch auf die Berechnung von Bahnkurven in einer seitlichen Begrenzung erstrecken, wurde ein *Berechnungsprogramm* erstellt. Damit ist es möglich, die Bewegung von Gütern in einer beliebig konstruierten Rutschenendstelle zu berechnen und die dabei erreichten Geschwindigkeiten zu analysieren. Mit Hilfe dieses Programms wurden *Kennfelder für die Auslegung von Rutschen* als Sorterendstellen erarbeitet. Die Verwendung dieser Kennfelder wird am Beispiel vorgestellt und mit der Genauigkeit des Programms verglichen.

Unter Verwendung des Programms wurden die oben geschilderten Bahnkurvenberechnungen mit den Auswertungen des Bahnkurvenverlaufs im Versuch verglichen. Es zeigte sich eine sehr hohe Genauigkeit von ca. $\pm 2\%$ Abweichung für die Berechnung des Verlaufes auf der ebenen Rutsche. In der seitlichen Begrenzung der Rutsche war eine ausreichende Genauigkeit des Berechnungsmodells jedoch nur nach einigen Korrekturrechnungen zu erzielen. Die Ursache für die Abweichungen lag in der Art des verwendeten Berechnungsmodells begründet. Hier ist für die Zukunft noch ein Entwicklungsfeld für die Verfeinerung der Ansätze zu sehen. Die Genauigkeiten des Berechnungsprogramms für die ebene Rutsche sind aber so hoch, daß andere Faktoren im Praxisbetrieb mit Sicherheit wesentlich größere Abweichungen produzieren.

Insgesamt gesehen konnte gezeigt werden, daß es möglich ist, Rutschen an Sorterendstellen mit den vorgestellten Berechnungsmethoden auszulegen. Der Planer erhält so die Möglichkeit, schon in der Planung eine hohe Genauigkeit der Auslegung zu erreichen und damit erhebliche Investitionskosten zu sparen.

8. Literatur

- [1] Akademischer Verein Hütte.
"Hütte" des Ingenieurs Taschenbuch, 21. Auflage.
Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn; 1911.
- [2] Bargel, H.J.; Schulze, G.
Werkstoffkunde.
Düsseldorf: VDI-Verlag; 1983.
- [3] Böcker, Th.; Köbbing, H.; Schieleit, J.; Steigenberger, K.
Unveröffentlichte Studie "Automatisches Vereinzeln-, Lese-, und Eingabesystem".
FhG - IML Dortmund u. DETECON, 1991.
- [4] Böcker, Th.
Auswahl und Dimensionierung von Hochleistungssortieranlagen.
Tagungsband Technokongreß; 1992.
- [5] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.
Taschenbuch der Mathematik.
Leipzig: BSG B.G. Teubner Verlagsgesellschaft; 1979.
- [6] Budde.
Materialfluß und Lagerung.
3/95, Kap. 4, Jhg. 10/89.
- [7] Bundesministerium für das Post- und Fernmeldewesen.
Richtlinie für die Gestaltung der maschinellen Päckchenverteilung.
Darmstadt: Posttechnisches Zentralamt; 1988.
- [8] DIN 55405
Begriffe für das Verpackungswesen, Teil 1 - 4.
Berlin: Beuth Verlag; 1977.
- [9] DIN 55429
Schachteln.
Berlin: Beuth Verlag; 1985.

- [10] DIN 55450
Beutel.
Berlin: Beuth Verlag; 1986.
- [11] DIN 55468
Wellpappe.
Berlin: Beuth Verlag; 1987.
- [12] DIN 6730
Papier und Pappe.
Berlin: Beuth Verlag; 1985.
- [13] Drescher, H.
VDI Zeitschrift. 1959; Bd. 101 Nr. 17: 697 - 732.
- [14] Dubbel.
Taschenbuch für den Maschinenbau, 14. Auflage.
Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag; 1981.
- [15] Girkmann, K.
Flächentragwerke, 6. Auflage.
Wien New York, 1978.
- [16] Grimmer, K.-J.; Thormann, D.
fördern und heben. 1967; Heft 2: 96 - 101.
- [17] Jünemann, R.
Materialfluß und Logistik.
Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong:
Springer-Verlag; 1989.
- [18] Koster, K.
Leichtbandtransporttechnik.
Essen: Vulkan-Verlag; 1989.
- [19] Koster, K.
Industrieanzeiger. 1978; 100 Jg. Nr. 69: 20 - 21.
- [20] Kragelski, I.V.; Dobycin, M.N.; Kombatov, V.S.
Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß.
München, Wien: Carl Hanser Verlag; 1983.
- [21] Möhle, B.
Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Stückgütern auf Gurtförderern
beim Ausrichten und Abweisen.
Dissertation TU Braunschweig, 1983.

- [22] Molitz, H.; Strobel, R.
Äußere Ballistik.
Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag; 1963.
- [23] Müller, H.
Untersuchungen zum Bewegungsverhalten von Einzellasten auf Gurtförderern
beim Abweisvorgang.
Dissertation TU Braunschweig, 1980.
- [24] Schapitz, E.
Festigkeitslehre für den Leichtbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag; 1951.
- [25] Stiehr; Prätorius; Horstenke.
Mitteilungen aus dem PTZ Darmstadt, Förderrutschen für den Postbetrieb.
1960; (38/39).
- [26] Thormann, D.; Wisseroth, E.
F + H Fördern und Heben. 1993; Jg. 43 Nr. 11: 768 - 770.
- [27] Thüsing, H.
Beitrag zur Theorie der Förderrutschen.
Dissertation TU Aachen, 1953.
- [28] VDI 3590.
Kommisioniersysteme.
Düsseldorf: VDI Verlag; 1993.
- [29] VDI 3619.
Sortiersysteme für Stückgut.
Düsseldorf: VDI Verlag; 1983.
- [30] Vogt, H.
Beitrag zur Theorie der Speichertechnik aus dem Fachbereich der
Paketverteilung.
Dissertation TU Braunschweig, 1969.
- [31] Droste, H.
Untersuchungen an Kippelmenten für Stückgutsortieranlagen
Dissertation Universität Hannover, 1995

III. Anhang

III. 1 Bodenebenheitsmessungen

Abb. 1-1. Bodenkontur Faltschachtel, ohne Beladung

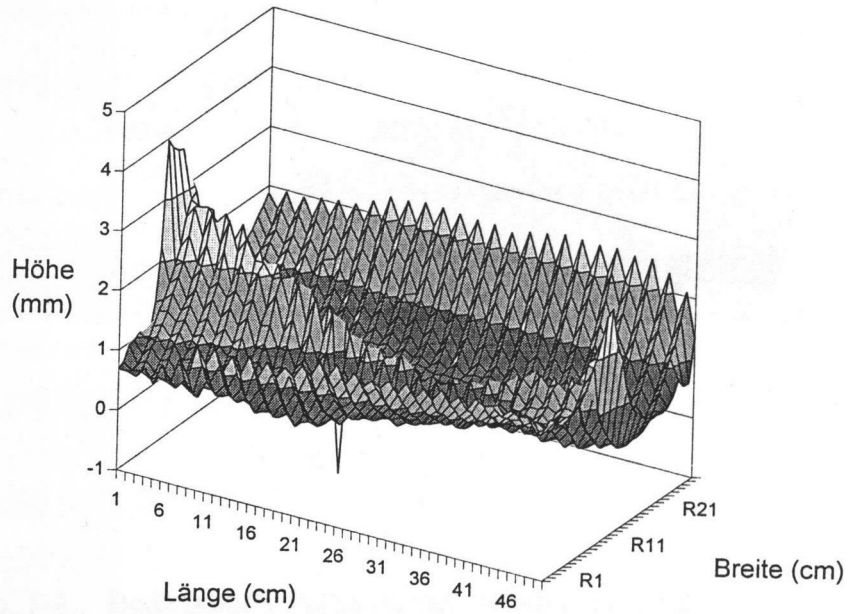


Abb. 1-2. Bodenkontur Faltschachtel, beladen mit 1 kg

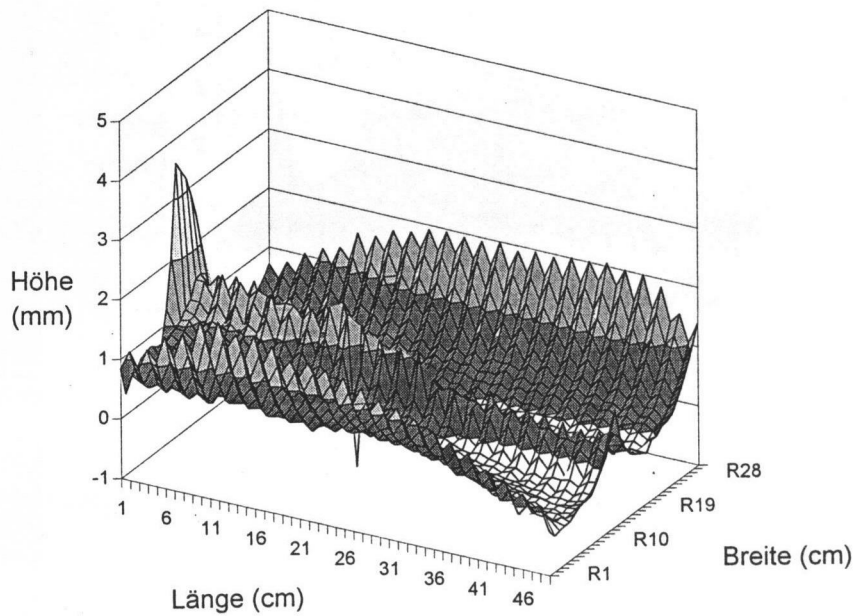


Abb. 1-3. Bodenkontur Faltschachtel, beladen mit 2 kg

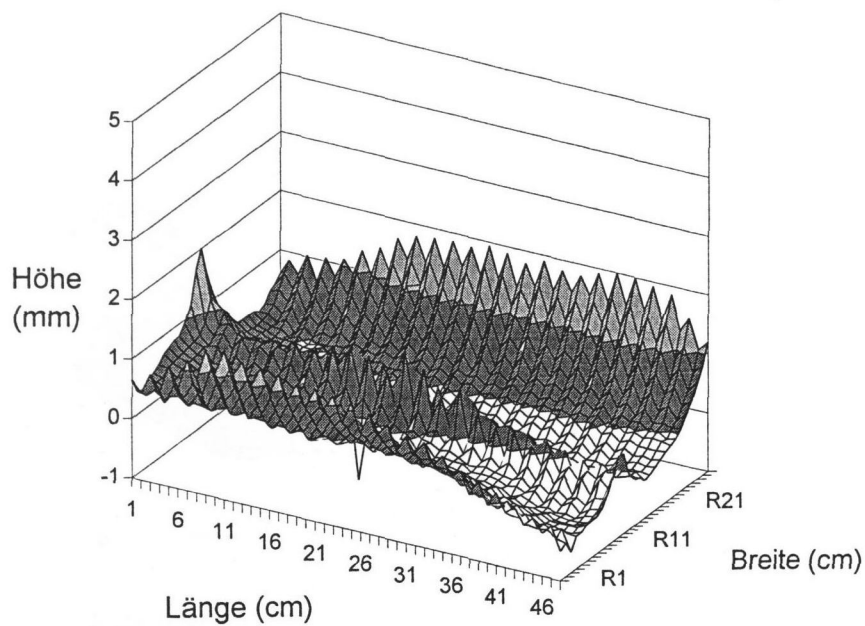


Abb. 1-4. Bodenkontur Faltschachtel, beladen mit 3 kg

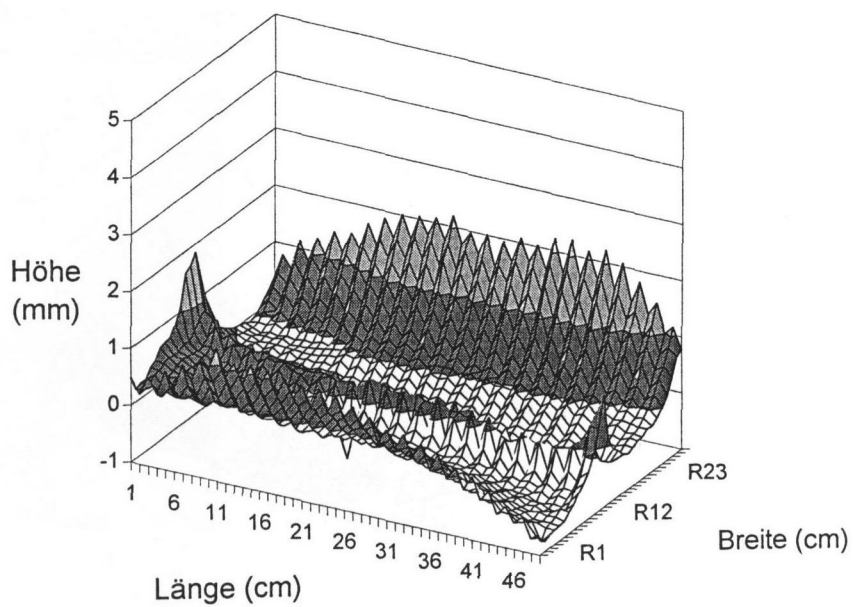


Abb. 1-5. Bodenkontur Klappdeckelschachtel, ohne Beladung

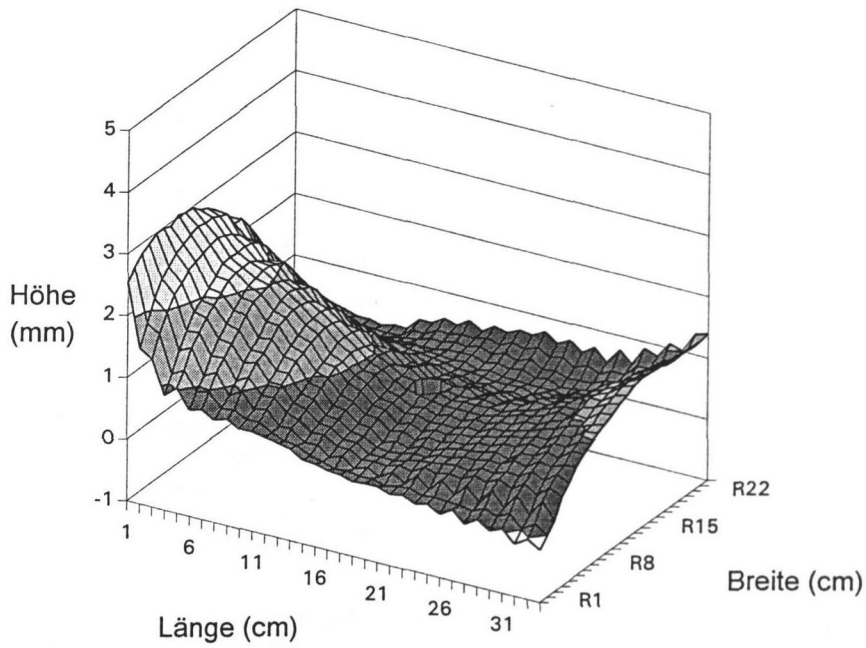


Abb. 1-6. Bodenkontur Klappdeckelschachtel, beladen mit 1 kg

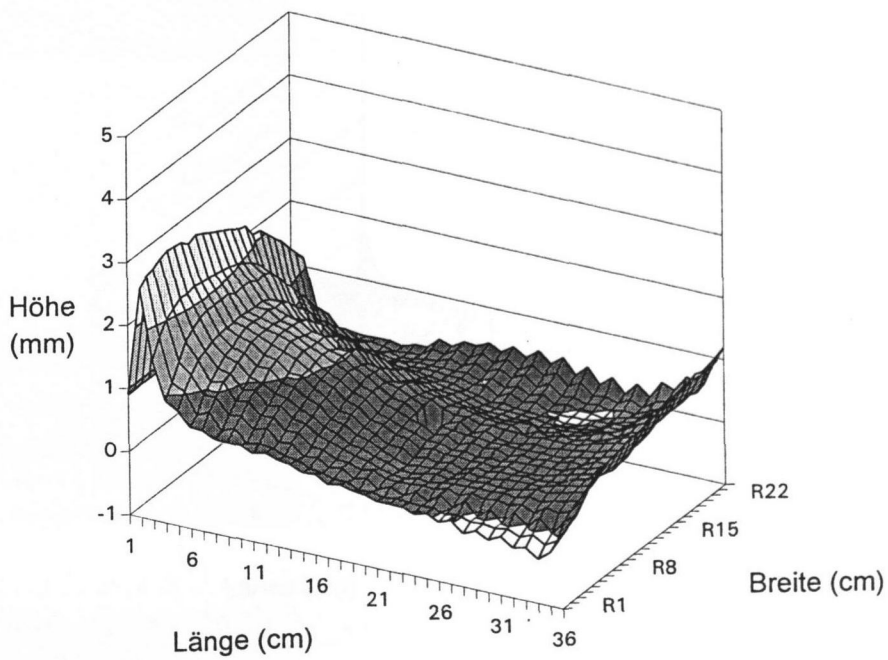


Abb. 1-7. Bodenkontur Klappdeckelschachtel, beladen mit 2 kg

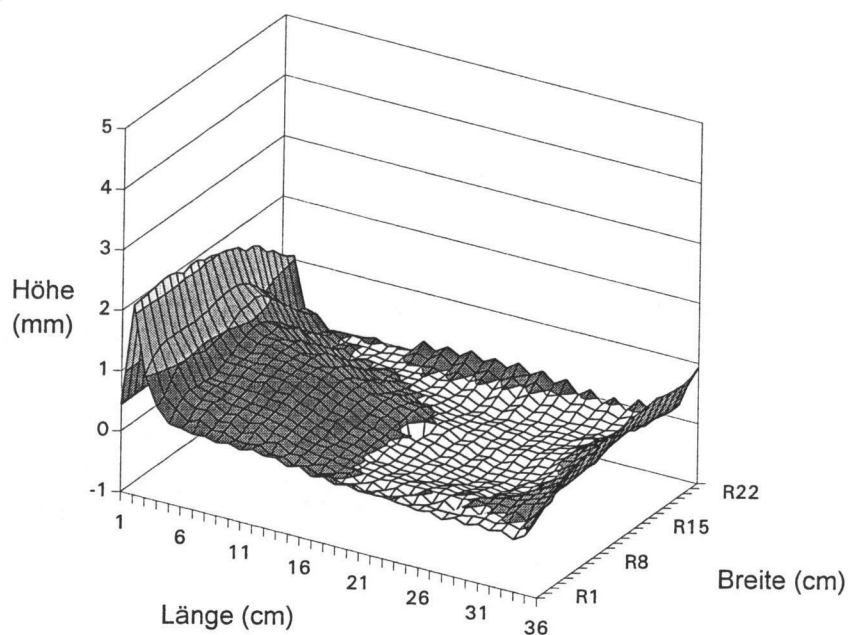


Abb. 1-8. Bodenkontur Klappdeckelschachtel, beladen mit 3 kg

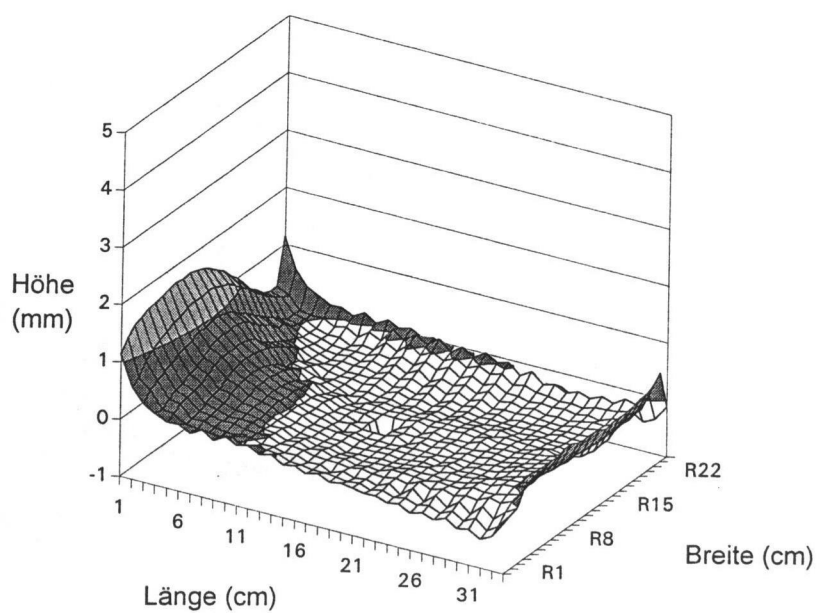


Abb. 1-9. Bodenkontur Stülpedeckelschachtel, ohne Beladung

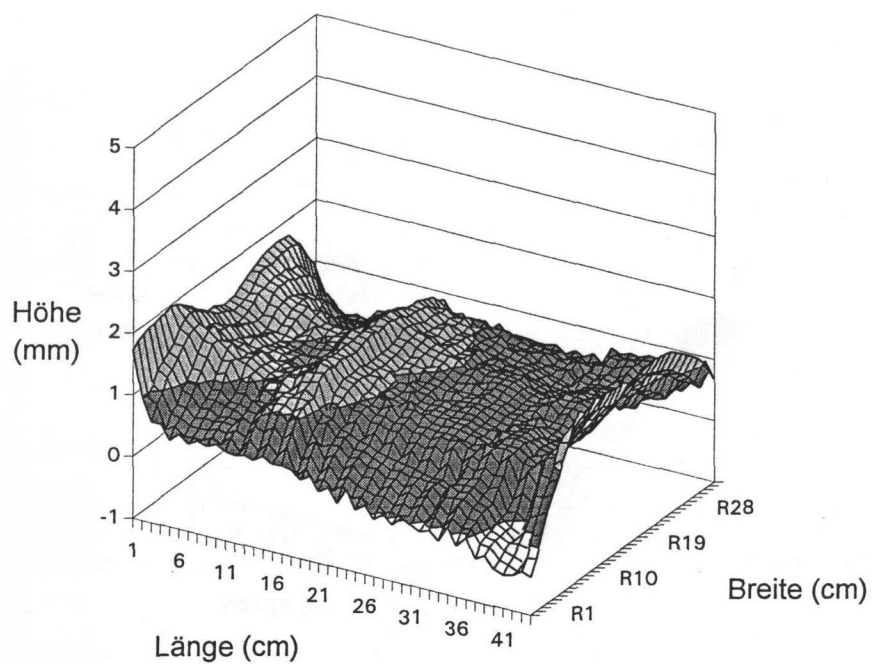


Abb. 1-10. Bodenkontur Stülpedeckelschachtel, beladen mit 1 kg

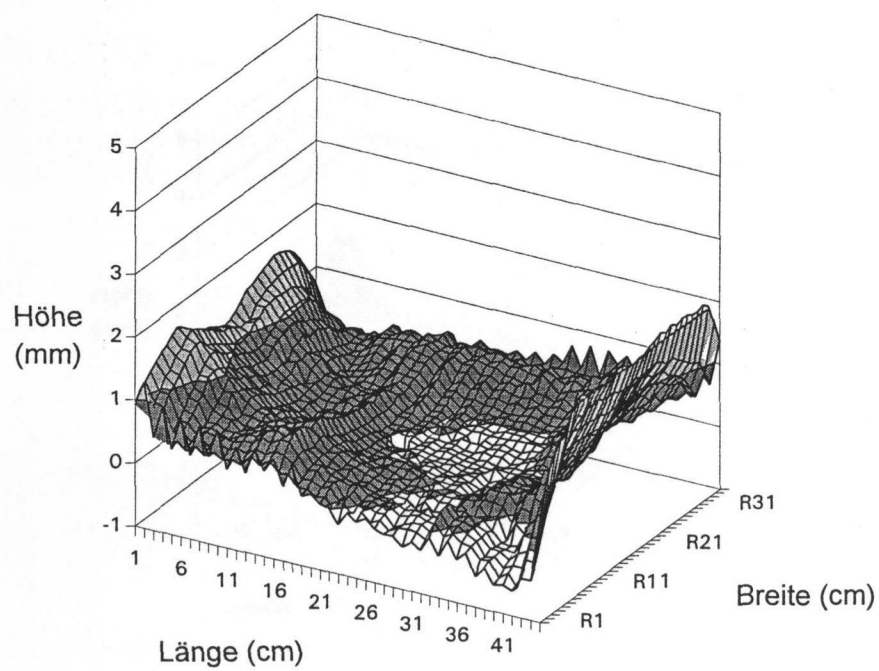


Abb. 1-11. Bodenkontur Stülpedeckelschachtel, beladen mit 2 kg

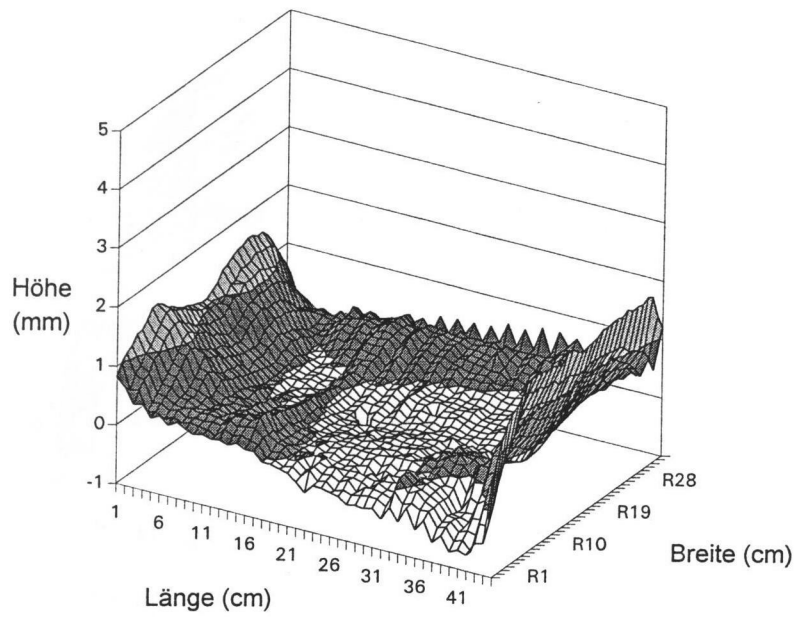


Abb. 1-12. Bodenkontur Stülpedeckelschachtel, beladen mit 3 kg

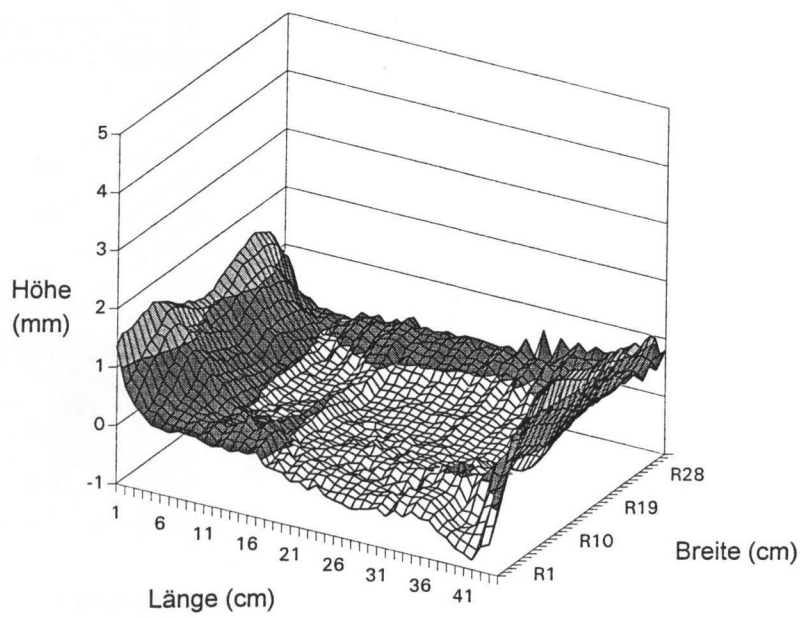


Abb. 1-13. Bodenkontur Papierbeutel, ohne Beladung

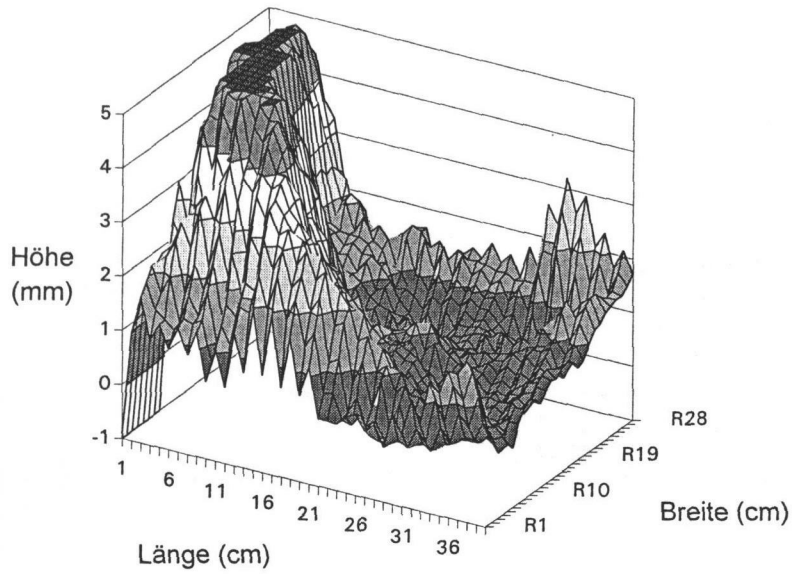


Abb. 1-14. Bodenkontur Papierbeutel, beladen mit 1 kg

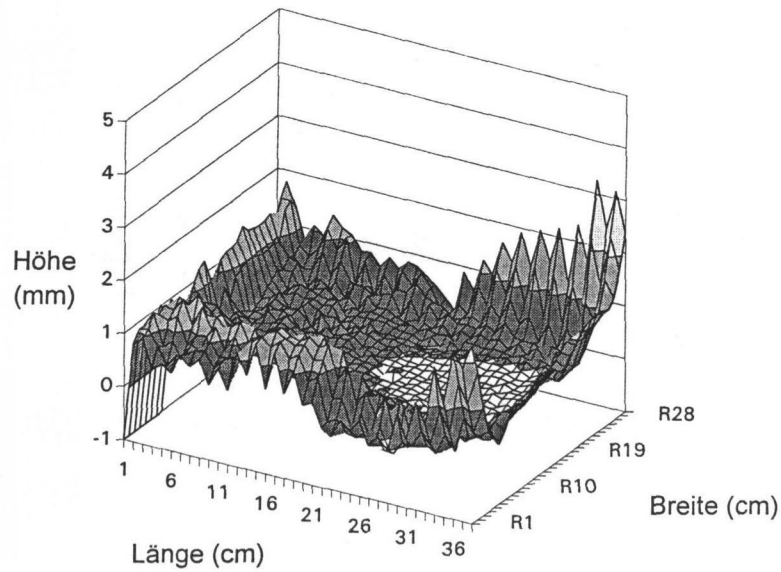


Abb. 1-15. Bodenkontur Papierbeutel, beladen mit 2 kg

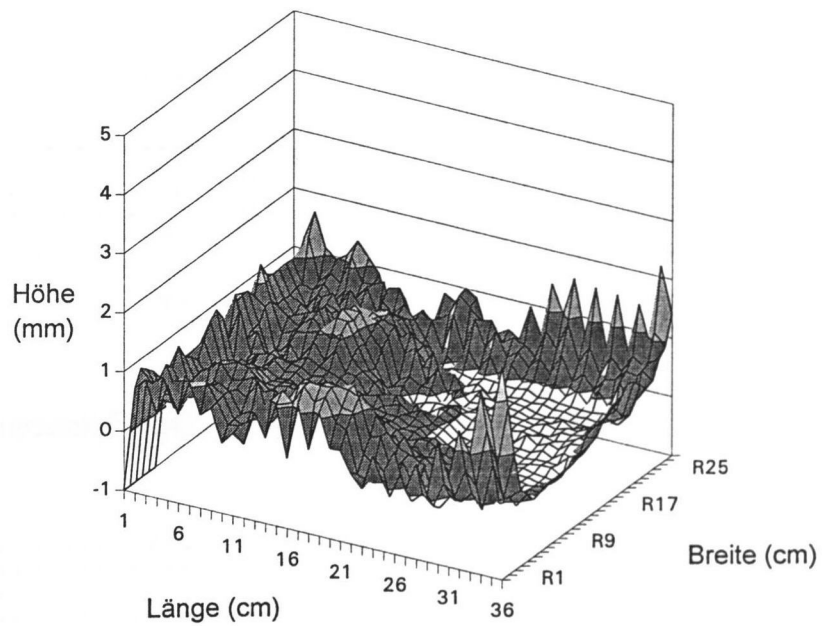


Abb. 1-16. Bodenkontur Papierbeutel, beladen mit 3 kg

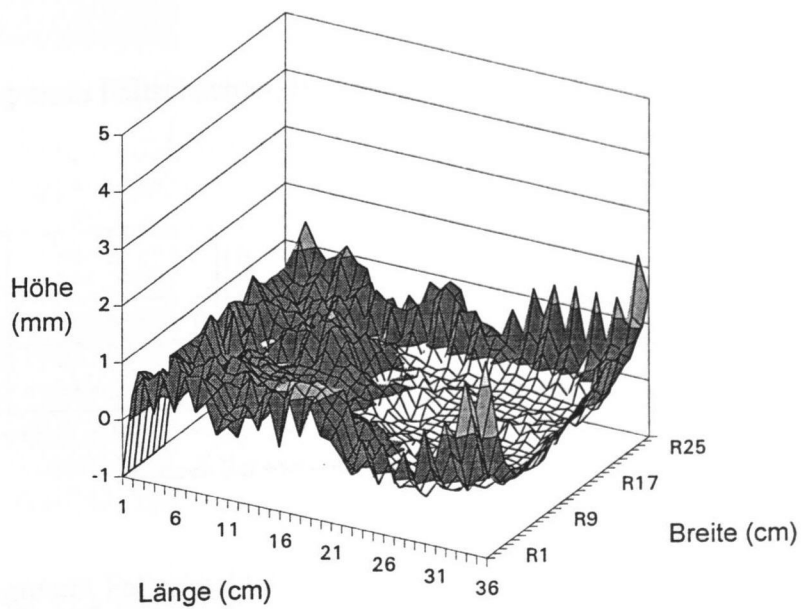


Abb. 1-17. Histogramm Faltschachtel, ohne Beladung

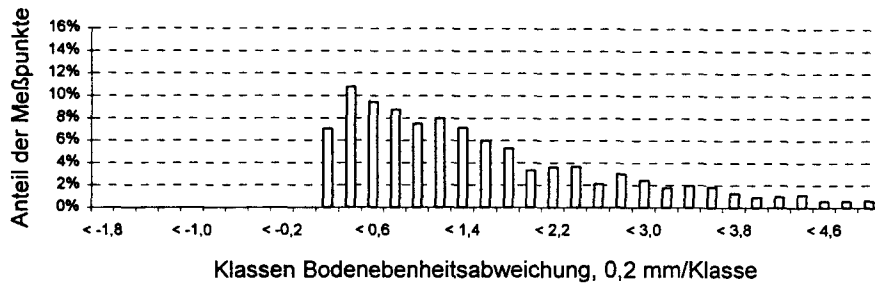


Abb. 1-18. Histogramm Faltschachtel, Beladung 1 kg

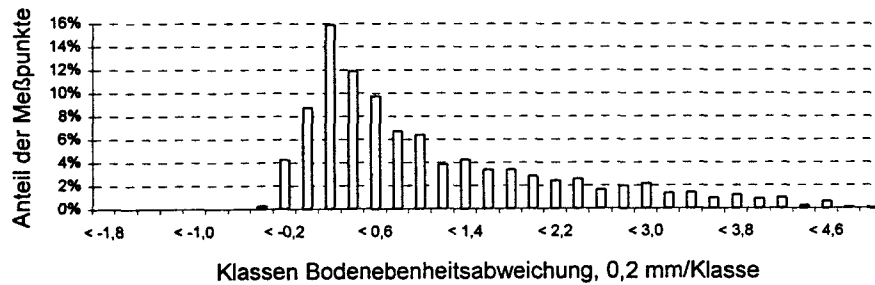


Abb. 1-19. Histogramm Faltschachtel, Beladung 2 kg

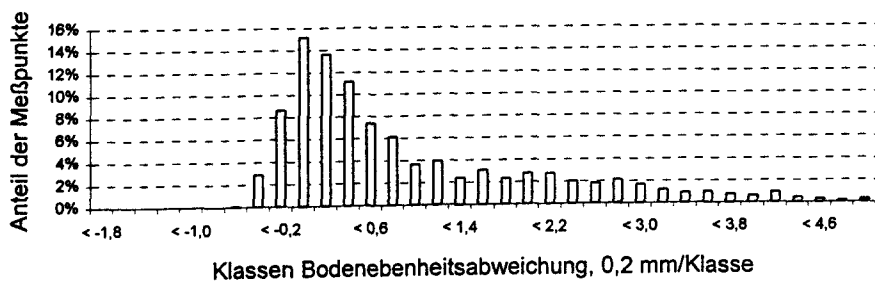


Abb. 1-20. Histogramm Faltschachtel, Beladung 3 kg

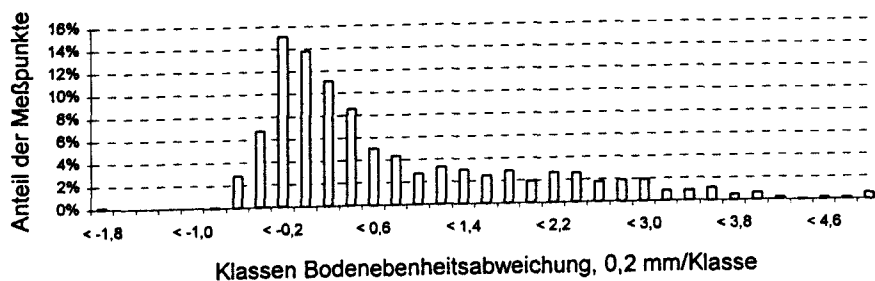


Abb. 1-25. Histogramm Stülpedeckelschachtel, ohne Beladung

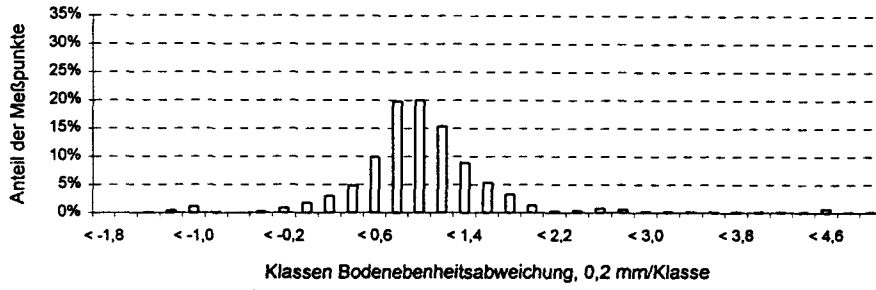


Abb. 1-26. Histogramm Stülpedeckelschachtel, Beladung 1 kg

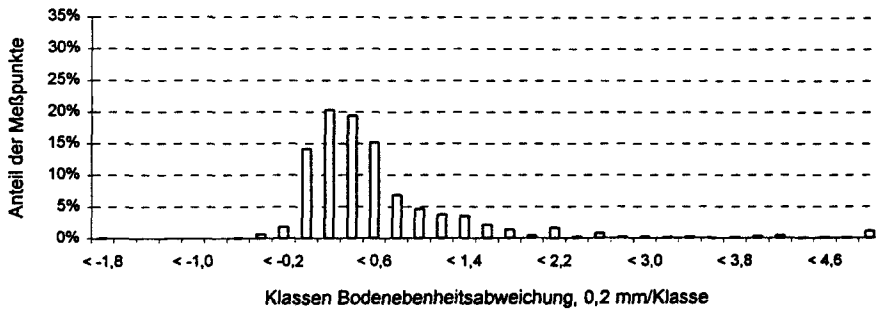


Abb. 1-27. Histogramm Stülpedeckelschachtel, Beladung 2 kg

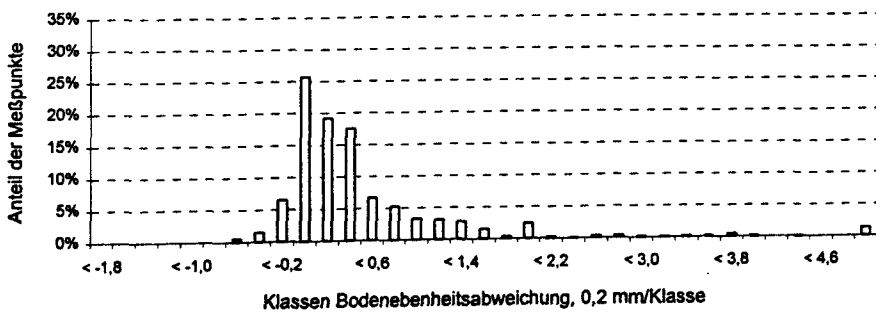
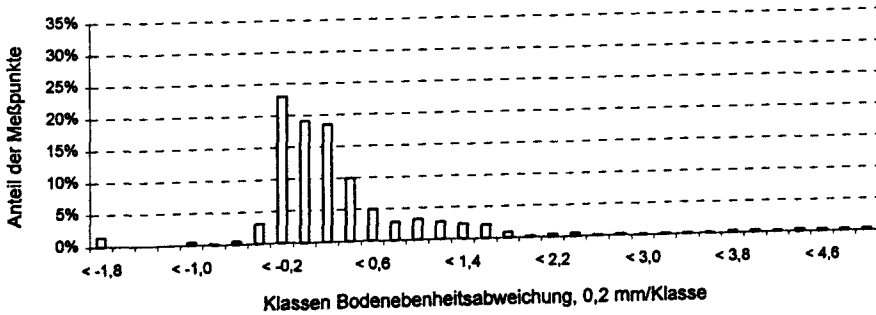


Abb. 1-28. Histogramm Stülpedeckelschachtel, Beladung 3 kg



III. 2 Reibungsmessungen

Tab. 2-1. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 1; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 1 bis 4

T1							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,331	0,371	0,406	0,416	0,431	0,461	0,481
1000	0,309	0,324	0,344	0,354	0,364	0,384	0,400
1500	0,288	0,305	0,322	0,331	0,339	0,339	0,348
2000	0,304	0,310	0,317	0,317	0,317	0,323	0,355
3000	0,331	0,326	0,318	0,322	0,322	0,339	0,339
5000	0,322	0,324	0,324	0,317	0,322	0,327	0,337

T2							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,320	0,330	0,350	0,380	0,400	0,420	0,430
1000	0,308	0,308	0,313	0,333	0,358	0,373	0,373
1500	0,308	0,317	0,308	0,317	0,325	0,342	0,360
2000	0,305	0,318	0,318	0,318	0,318	0,331	0,337
3000	0,306	0,310	0,314	0,314	0,319	0,323	0,323
5000	0,301	0,301	0,291	0,285	0,291	0,291	0,306

T3							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,316	0,337	0,357	0,377	0,403	0,444	0,459
1000	0,320	0,325	0,335	0,340	0,355	0,360	0,365
1500	0,287	0,295	0,304	0,304	0,304	0,312	0,312
2000	0,273	0,286	0,286	0,298	0,298	0,311	0,305
3000	0,288	0,288	0,288	0,292	0,296	0,296	0,305
5000	0,286	0,291	0,293	0,296	0,296	0,301	0,301

T4							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,303	0,323	0,354	0,364	0,384	0,384	0,384
1000	0,327	0,332	0,337	0,339	0,342	0,344	0,357
1500	0,304	0,304	0,313	0,321	0,321	0,321	0,321
2000	0,280	0,280	0,287	0,293	0,299	0,306	0,306
3000	0,297	0,297	0,297	0,306	0,306	0,297	0,297
5000	0,311	0,296	0,280	0,280	0,285	0,291	0,301

Y=A+B*X

Y=A+B*X

Y=A+B*X

Y=A+B*X

Koeffiziententabellen

Gewicht	A	B
500	0,320	0,047
1000	0,295	0,030
1500	0,287	0,019
2000	0,295	0,013
3000	0,320	0,004
5000	0,318	0,003

Gewicht	A	B
500	0,296	0,040
1000	0,285	0,027
1500	0,293	0,016
2000	0,303	0,009
3000	0,304	0,006
5000	0,296	0,000

Gewicht	A	B
500	0,286	0,049
1000	0,310	0,016
1500	0,287	0,008
2000	0,271	0,011
3000	0,282	0,005
5000	0,285	0,005

Gewicht	A	B
500	0,300	0,028
1000	0,322	0,009
1500	0,302	0,007
2000	0,273	0,010
3000	0,298	0,001
5000	0,297	-0,003

Tab. 2-2. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 1; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 5 bis 8

T5							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,335	0,356	0,396	0,407	0,427	0,457	0,498
1000	0,288	0,303	0,313	0,324	0,339	0,344	0,349
1500	0,322	0,322	0,322	0,322	0,322	0,355	0,372
2000	0,315	0,315	0,315	0,340	0,347	0,347	0,378
3000	0,340	0,332	0,340	0,349	0,349	0,349	0,366
5000	0,357	0,336	0,336	0,347	0,347	0,341	0,357

$$Y=A+B \cdot X$$

Gewicht	A	B
500	0,308	0,052
1000	0,282	0,021
1500	0,302	0,016
2000	0,296	0,020
3000	0,329	0,009
5000	0,343	0,001

T6							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,305	0,321	0,326	0,346	0,346	0,377	0,397
1000	0,321	0,326	0,326	0,336	0,341	0,346	0,356
1500	0,305	0,305	0,305	0,313	0,322	0,322	0,330
2000	0,293	0,293	0,306	0,319	0,319	0,319	0,331
3000	0,280	0,280	0,289	0,297	0,297	0,306	0,314
5000	0,295	0,282	0,284	0,287	0,290	0,300	0,300

$$Y=A+B \cdot X$$

Gewicht	A	B
500	0,287	0,029
1000	0,313	0,012
1500	0,296	0,009
2000	0,286	0,013
3000	0,272	0,012
5000	0,283	0,004

T7							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,301	0,332	0,332	0,363	0,363	0,415	0,435
1000	0,306	0,306	0,306	0,316	0,316	0,322	0,332
1500	0,270	0,287	0,287	0,304	0,304	0,304	0,304
2000	0,278	0,290	0,290	0,290	0,278	0,278	0,278
3000	0,288	0,288	0,296	0,296	0,288	0,296	0,305
5000	0,316	0,321	0,321	0,321	0,321	0,326	0,331

$$Y=A+B \cdot X$$

Gewicht	A	B
500	0,277	0,043
1000	0,298	0,008
1500	0,273	0,011
2000	0,288	-0,003
3000	0,285	0,004
5000	0,314	0,004

T8							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,354	0,404	0,354	0,253	0,253	0,253	0,303
500	0,264	0,264	0,264	0,275	0,275	0,275	0,285
1000	0,290	0,290	0,290	0,280	0,280	0,280	0,280
1500	0,289	0,289	0,289	0,289	0,280	0,272	0,272
2000	0,293	0,293	0,293	0,280	0,268	0,268	0,268
3000	0,314	0,306	0,306	0,297	0,280	0,280	0,280
5000	0,306	0,286	0,275	0,270	0,260	0,255	0,260

$$Y=A+B \cdot X$$

Gewicht	A	B
500	0,259	0,007
1000	0,293	-0,004
1500	0,296	-0,007
2000	0,302	-0,011
3000	0,320	-0,013
5000	0,304	-0,015

Tab. 2-3. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 1; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 9 bis 11

T9							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,295	0,344	0,393	0,442	0,418	0,418	0,393
500	0,252	0,262	0,252	0,252	0,272	0,272	0,292
1000	0,259	0,254	0,254	0,254	0,249	0,259	0,259
1500	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,272	0,272
2000	0,267	0,241	0,229	0,229	0,216	0,216	0,216
3000	0,255	0,246	0,238	0,229	0,221	0,221	0,212
5000	0,255	0,250	0,235	0,229	0,229	0,229	0,229

Gewicht	A	B
500	0,242	0,012
1000	0,255	0,000
1500	0,247	0,006
2000	0,261	-0,015
3000	0,260	-0,014
5000	0,254	-0,009

T10							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,447	0,447	0,547	0,547	0,547	0,398	0,398
500	0,245	0,255	0,255	0,245	0,245	0,234	0,234
1000	0,260	0,260	0,255	0,245	0,245	0,245	0,245
1500	0,255	0,255	0,255	0,238	0,238	0,238	0,238
2000	0,268	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255
3000	0,238	0,238	0,246	0,246	0,246	0,246	0,246
5000	0,250	0,245	0,245	0,234	0,234	0,234	0,234

Gewicht	A	B
500	0,256	-0,006
1000	0,263	-0,006
1500	0,260	-0,007
2000	0,262	-0,003
3000	0,238	0,003
5000	0,250	-0,005

T11							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,405	0,506	0,608	0,709	0,861	0,962	1,063
500	0,305	0,326	0,336	0,356	0,397	0,407	0,427
1000	0,291	0,306	0,326	0,342	0,367	0,367	0,367
1500	0,272	0,272	0,289	0,306	0,323	0,323	0,340
2000	0,268	0,287	0,293	0,299	0,306	0,319	0,319
3000	0,268	0,268	0,268	0,272	0,272	0,280	0,289
5000	0,280	0,265	0,265	0,255	0,255	0,255	0,255

Gewicht	A	B
500	0,281	0,042
1000	0,282	0,028
1500	0,255	0,024
2000	0,266	0,016
3000	0,260	0,007
5000	0,277	-0,008

Tab. 2-4. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 2; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 1 bis 4

T1							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,273	0,284	0,294	0,314	0,344	0,375	0,395
1000	0,255	0,275	0,285	0,285	0,290	0,306	0,356
1500	0,255	0,255	0,272	0,289	0,306	0,323	0,391
2000	0,242	0,254	0,280	0,293	0,293	0,331	0,394
3000	0,221	0,238	0,238	0,246	0,255	0,272	0,356
5000	0,219	0,229	0,229	0,229	0,229	0,245	0,245

$Y=A+B \cdot X^2$

Gewicht	A	B
500	0,273	0,011
1000	0,259	0,007
1500	0,246	0,011
2000	0,242	0,011
3000	0,214	0,009
5000	0,223	0,002

T2							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,240	0,250	0,250	0,270	0,280	0,330	0,360
1000	0,243	0,228	0,228	0,222	0,243	0,278	0,354
1500	0,220	0,237	0,237	0,237	0,254	0,270	0,321
2000	0,229	0,229	0,241	0,241	0,254	0,254	0,280
3000	0,229	0,229	0,212	0,221	0,221	0,229	0,255
5000	0,214	0,214	0,214	0,219	0,239	0,255	0,260

$Y=A+B \cdot X^2$

Gewicht	A	B
500	0,232	0,010
1000	0,211	0,009
1500	0,217	0,007
2000	0,228	0,004
3000	0,218	0,002
5000	0,208	0,004

T3							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,242	0,262	0,262	0,262	0,292	0,343	0,453
1000	0,223	0,223	0,234	0,244	0,264	0,335	0,386
1500	0,220	0,237	0,254	0,254	0,254	0,288	0,373
2000	0,229	0,229	0,242	0,242	0,268	0,280	0,344
3000	0,221	0,221	0,229	0,229	0,238	0,246	0,306
5000	0,214	0,214	0,214	0,214	0,224	0,240	0,255

$Y=A+B \cdot X^2$

Gewicht	A	B
500	0,224	0,016
1000	0,203	0,014
1500	0,217	0,010
2000	0,218	0,009
3000	0,211	0,006
5000	0,208	0,004

T4							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,212	0,212	0,212	0,212	0,222	0,243	0,273
1000	0,219	0,219	0,219	0,219	0,229	0,254	0,280
1500	0,217	0,217	0,217	0,217	0,224	0,244	0,272
2000	0,214	0,214	0,219	0,229	0,245	0,265	0,280
3000	0,204	0,212	0,212	0,229	0,229	0,255	0,280
5000	0,204	0,209	0,209	0,214	0,229	0,255	0,347

$Y=A+B \cdot X^2$

Gewicht	A	B
500	0,202	0,005
1000	0,208	0,005
1500	0,208	0,004
2000	0,209	0,006
3000	0,202	0,006
5000	0,186	0,010

Tab. 2-5. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 2; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 5 bis 8

T5								
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)							
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	
500	0,213	0,223	0,233	0,243	0,263	0,304	0,365	Y=A+B*X^2
1000	0,214	0,224	0,224	0,244	0,264	0,305	0,346	
1500	0,221	0,238	0,238	0,255	0,272	0,306	0,390	
2000	0,217	0,229	0,242	0,255	0,280	0,331	0,395	
3000	0,212	0,212	0,212	0,212	0,229	0,272	0,331	
5000	0,214	0,214	0,229	0,260	0,280	0,336	0,357	

Gewicht	A	B
500	0,203	0,012
1000	0,205	0,011
1500	0,211	0,013
2000	0,207	0,014
3000	0,192	0,010
5000	0,205	0,013

T6								
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)							
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	
500	0,224	0,255	0,255	0,255	0,255	0,316	0,408	Y=A+B*X^2
1000	0,214	0,219	0,219	0,204	0,219	0,245	0,306	
1500	0,204	0,204	0,204	0,204	0,204	0,221	0,255	
2000	0,217	0,229	0,242	0,255	0,229	0,229	0,229	
3000	0,204	0,195	0,187	0,187	0,195	0,212	0,238	
5000	0,199	0,194	0,194	0,199	0,204	0,214	0,255	

Gewicht	A	B
500	0,217	0,013
1000	0,200	0,007
1500	0,195	0,004
2000	0,233	0,000
3000	0,187	0,003
5000	0,186	0,004

T7								
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)							
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	
500	0,213	0,213	0,213	0,213	0,213	0,233	0,233	Y=A+B*X^2
1000	0,203	0,188	0,178	0,173	0,162	0,178	0,162	
1500	0,203	0,186	0,178	0,170	0,170	0,170	0,170	
2000	0,204	0,191	0,178	0,165	0,165	0,153	0,153	
3000	0,195	0,195	0,195	0,195	0,212	0,212	0,221	
5000	0,209	0,209	0,209	0,224	0,224	0,224	0,234	

Gewicht	A	B
500	0,209	0,002
1000	0,190	-0,002
1500	0,189	-0,002
2000	0,192	-0,004
3000	0,192	0,002
5000	0,209	0,002

T8								
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)							
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	
100	0,302	0,453	0,503	0,503	0,528	0,554	0,453	Y=A+B*X
500	0,274	0,264	0,264	0,264	0,254	0,254	0,254	
1000	0,214	0,209	0,194	0,178	0,178	0,189	0,189	
1500	0,221	0,221	0,187	0,178	0,170	0,170	0,153	
2000	0,229	0,216	0,216	0,204	0,191	0,185	0,178	
3000	0,221	0,212	0,195	0,195	0,178	0,178	0,170	
5000	0,229	0,229	0,219	0,219	0,209	0,204	0,204	

Gewicht	A	B
500	0,274	-0,007
1000	0,212	-0,009
1500	0,232	-0,023
2000	0,237	-0,017
3000	0,227	-0,017
5000	0,236	-0,010

Tab. 2-6. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 2; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 9 bis 11

T9							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,302	0,302	0,302	0,302	0,302	0,327	0,252
500	0,203	0,203	0,193	0,183	0,183	0,173	0,173
1000	0,214	0,209	0,209	0,204	0,199	0,194	0,204
1500	0,221	0,221	0,221	0,221	0,212	0,212	0,204
2000	0,216	0,210	0,204	0,204	0,204	0,204	0,204
3000	0,212	0,204	0,204	0,200	0,195	0,191	0,187
5000	0,204	0,198	0,193	0,188	0,186	0,183	0,186

T10							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,352	0,527	0,527	0,553	0,553	0,502	0,502
500	0,254	0,223	0,213	0,213	0,213	0,213	0,203
1000	0,198	0,198	0,183	0,173	0,173	0,173	0,178
1500	0,204	0,187	0,187	0,187	0,187	0,204	0,237
2000	0,204	0,197	0,191	0,178	0,166	0,166	0,178
3000	0,187	0,178	0,170	0,161	0,153	0,144	0,136
5000	0,188	0,183	0,173	0,168	0,158	0,158	0,158

T11							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,417	0,556	0,603	0,695	0,834	0,927	0,973
500	0,275	0,296	0,316	0,316	0,326	0,331	0,336
1000	0,224	0,224	0,224	0,224	0,203	0,203	0,224
1500	0,221	0,221	0,238	0,255	0,255	0,255	0,255
2000	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,268
3000	0,229	0,229	0,221	0,212	0,204	0,204	0,221
5000	0,214	0,209	0,204	0,209	0,219	0,255	0,280

Y=A+B*X

Y=A+B*X

Y=A+B*X

Gewicht	A	B
500	0,211	-0,012
1000	0,215	-0,005
1500	0,227	-0,005
2000	0,214	-0,004
3000	0,215	-0,008
5000	0,204	-0,006

Gewicht	A	B
500	0,244	-0,012
1000	0,200	-0,009
1500	0,179	0,010
2000	0,207	-0,012
3000	0,195	-0,017
5000	0,192	-0,011

Gewicht	A	B
500	0,276	0,019
1000	0,226	-0,004
1500	0,216	0,013
2000	0,202	0,011
3000	0,230	-0,007
5000	0,183	0,022

Tab. 2-7. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 3; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 1 bis 4

T1							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,331	0,341	0,361	0,371	0,391	0,401	0,421
1000	0,341	0,357	0,367	0,382	0,397	0,408	0,408
1500	0,357	0,374	0,391	0,408	0,408	0,408	0,408
2000	0,357	0,382	0,395	0,395	0,408	0,408	0,408
3000	0,357	0,382	0,391	0,391	0,391	0,399	0,408
5000	0,362	0,387	0,397	0,397	0,403	0,408	0,408

$Y=A+B*\text{Wurzel}(X)$

Koeffiziententabellen

Gewicht	A	B
500	0,268	0,078
1000	0,295	0,062
1500	0,329	0,047
2000	0,335	0,043
3000	0,339	0,036
5000	0,345	0,036

T2							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,407	0,438	0,458	0,479	0,489	0,509	0,519
1000	0,397	0,418	0,433	0,469	0,469	0,469	0,469
1500	0,390	0,407	0,424	0,441	0,441	0,441	0,441
2000	0,382	0,395	0,408	0,421	0,427	0,427	0,433
3000	0,382	0,399	0,408	0,416	0,425	0,416	0,425
5000	0,362	0,382	0,392	0,402	0,407	0,407	0,412

$Y=A+B*\text{Wurzel}(X)$

Gewicht	A	B
500	0,341	0,096
1000	0,353	0,068
1500	0,363	0,047
2000	0,352	0,045
3000	0,363	0,035
5000	0,337	0,043

T3							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,397	0,418	0,448	0,459	0,459	0,489	0,489
1000	0,408	0,433	0,459	0,469	0,479	0,489	0,484
1500	0,408	0,442	0,459	0,476	0,476	0,476	0,484
2000	0,395	0,446	0,459	0,472	0,484	0,484	0,497
3000	0,399	0,433	0,459	0,459	0,476	0,484	0,484
5000	0,398	0,413	0,438	0,438	0,454	0,454	0,454

$Y=A+B*\text{Wurzel}(X)$

Gewicht	A	B
500	0,341	0,081
1000	0,365	0,070
1500	0,376	0,062
2000	0,354	0,079
3000	0,358	0,072
5000	0,365	0,051

T4							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,384	0,394	0,404	0,404	0,414	0,424	0,444
1000	0,397	0,402	0,407	0,412	0,417	0,417	0,422
1500	0,390	0,407	0,424	0,424	0,424	0,424	0,424
2000	0,382	0,408	0,433	0,446	0,446	0,446	0,446
3000	0,425	0,450	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467
5000	0,413	0,423	0,433	0,444	0,454	0,454	0,454

$Y=A+B*\text{Wurzel}(X)$

Gewicht	A	B
500	0,347	0,046
1000	0,381	0,022
1500	0,379	0,028
2000	0,354	0,056
3000	0,414	0,033
5000	0,386	0,039

Tab. 2-8. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 3; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 5 bis 8

T5							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,427	0,448	0,458	0,488	0,499	0,499	0,499
1000	0,394	0,404	0,429	0,429	0,429	0,454	0,480
1500	0,391	0,425	0,433	0,433	0,442	0,442	0,459
2000	0,382	0,408	0,421	0,421	0,421	0,421	0,421
3000	0,391	0,433	0,442	0,442	0,442	0,442	0,442
5000	0,408	0,428	0,433	0,433	0,433	0,433	0,423

T6							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,431	0,461	0,461	0,461	0,471	0,471	0,471
1000	0,431	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457
1500	0,407	0,424	0,440	0,440	0,440	0,440	0,440
2000	0,395	0,408	0,420	0,446	0,459	0,459	0,459
3000	0,416	0,433	0,433	0,442	0,442	0,459	0,459
5000	0,408	0,449	0,459	0,469	0,469	0,469	0,469

T7							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
500	0,401	0,401	0,431	0,431	0,461	0,531	0,531
1000	0,423	0,433	0,433	0,448	0,458	0,458	0,458
1500	0,406	0,423	0,423	0,440	0,440	0,457	0,457
2000	0,408	0,408	0,408	0,408	0,420	0,420	0,420
3000	0,408	0,425	0,425	0,425	0,433	0,433	0,433
5000	0,408	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418

T8							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,654	0,705	0,805	0,805	0,805	0,755	0,755
500	0,407	0,407	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427
1000	0,356	0,356	0,356	0,361	0,371	0,376	0,376
1500	0,372	0,372	0,372	0,355	0,355	0,355	0,355
2000	0,356	0,356	0,356	0,356	0,356	0,356	0,381
3000	0,382	0,357	0,357	0,365	0,357	0,365	0,382
5000	0,335	0,335	0,331	0,326	0,357	0,377	0,382

$Y=A+B\cdot\text{Wurzel}(X)$

$Y=A+B\cdot\text{Wurzel}(X)$

$Y=A+B\cdot\text{Wurzel}(X)$

$Y=A+B\cdot X$

Gewicht	A	B
500	0,381	0,068
1000	0,342	0,066
1500	0,367	0,048
2000	0,374	0,029
3000	0,385	0,036
5000	0,410	0,013

Gewicht	A	B
500	0,421	0,030
1000	0,431	0,016
1500	0,396	0,028
2000	0,349	0,063
3000	0,393	0,035
5000	0,391	0,048

Gewicht	A	B
500	0,289	0,122
1000	0,397	0,035
1500	0,375	0,044
2000	0,394	0,014
3000	0,399	0,020
5000	0,407	0,007

Gewicht	A	B
500	0,407	0,007
1000	0,348	0,008
1500	0,377	-0,007
2000	0,349	0,005
3000	0,364	0,001
5000	0,313	0,018

Tab. 2-9. Gleitreibbeiwerte auf Testoberfläche 3; Näherungsgleichung und Koeffizienten, Testgüter 9 bis 11

T9							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,600	0,600	0,650	0,650	0,650	0,650	0,600
500	0,326	0,315	0,305	0,326	0,336	0,336	0,377
1000	0,337	0,311	0,321	0,311	0,321	0,301	0,301
1500	0,339	0,305	0,322	0,305	0,305	0,305	0,305
2000	0,318	0,306	0,293	0,280	0,274	0,267	0,267
3000	0,323	0,306	0,297	0,289	0,280	0,276	0,276
5000	0,331	0,331	0,326	0,321	0,316	0,316	0,311

$Y=A+B \cdot X$

Gewicht	A	B
500	0,299	0,016
1000	0,333	-0,009
1500	0,329	-0,008
2000	0,322	-0,018
3000	0,323	-0,015
5000	0,336	-0,007

T10							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,467	0,490	0,514	0,514	0,560	0,607	0,607
500	0,306	0,306	0,296	0,296	0,316	0,326	0,306
1000	0,295	0,300	0,305	0,315	0,315	0,321	0,321
1500	0,288	0,288	0,271	0,271	0,255	0,271	0,271
2000	0,267	0,267	0,267	0,261	0,242	0,254	0,254
3000	0,289	0,289	0,272	0,272	0,255	0,255	0,246
5000	0,296	0,291	0,286	0,280	0,275	0,270	0,265

$Y=A+B \cdot X$

Gewicht	A	B
500	0,299	0,004
1000	0,292	0,009
1500	0,288	-0,007
2000	0,272	-0,006
3000	0,298	-0,015
5000	0,301	-0,010

T11							
Gewicht	Geschwindigkeit (m/s)						
	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500
100	0,655	0,655	0,756	0,856	0,856	0,907	0,907
500	0,469	0,469	0,479	0,510	0,540	0,550	0,550
1000	0,458	0,407	0,417	0,417	0,417	0,417	0,427
1500	0,493	0,476	0,476	0,459	0,442	0,442	0,425
2000	0,471	0,471	0,484	0,484	0,484	0,484	0,445
3000	0,449	0,466	0,457	0,449	0,449	0,449	0,449
5000	0,433	0,459	0,459	0,438	0,418	0,408	0,387

$Y=A+B \cdot X$

Gewicht	A	B
500	0,443	0,033
1000	0,433	-0,005
1500	0,503	-0,022
2000	0,482	-0,004
3000	0,459	-0,003
5000	0,469	-0,020

Abb. 2-1. Mittelwerte Schachteln, Testoberfläche 1

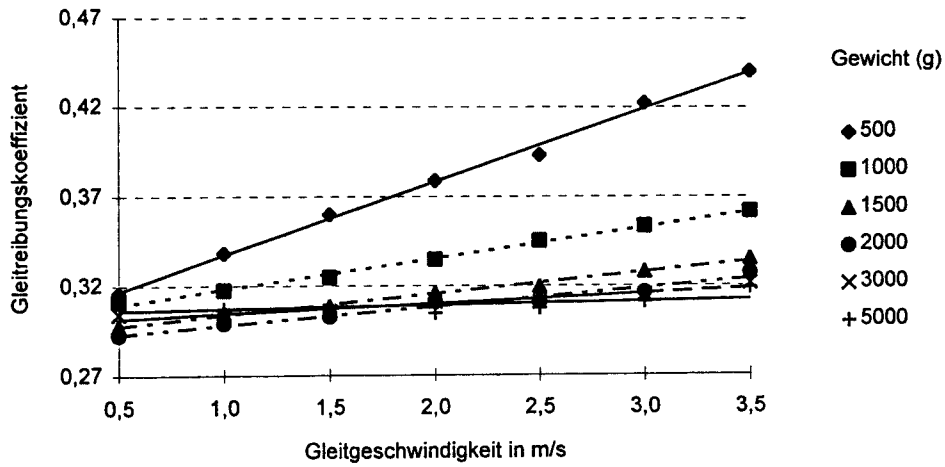


Abb. 2-2. Mittelwerte Faltschachteln, Testoberfläche 1

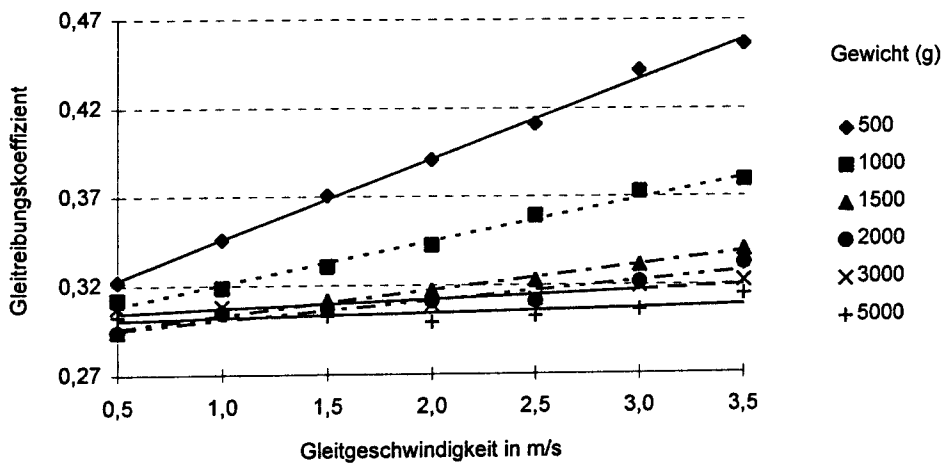


Abb. 2-3. Mittelwerte Schachteln mit glattem Boden, Testoberfläche 1

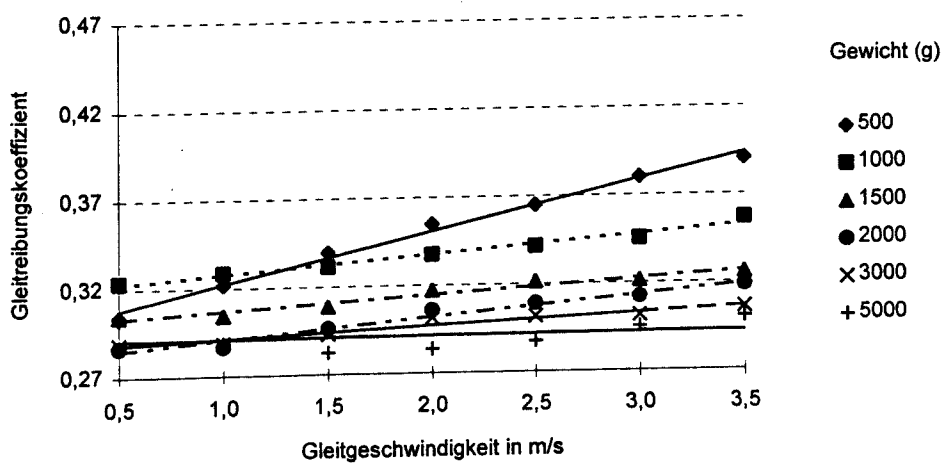


Abb. 2-4. Mittelwerte Beutel, Testoberfläche 1

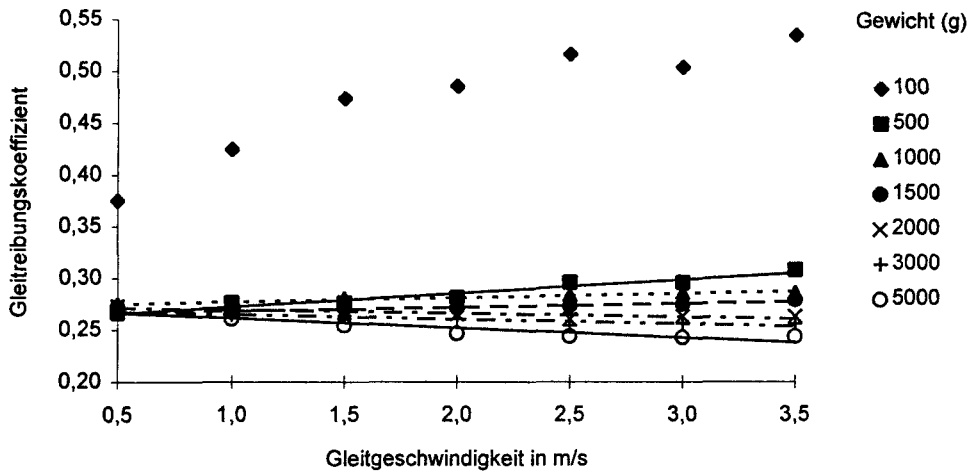


Abb. 2-5. Mittelwerte Polybeutel, Testoberfläche 1

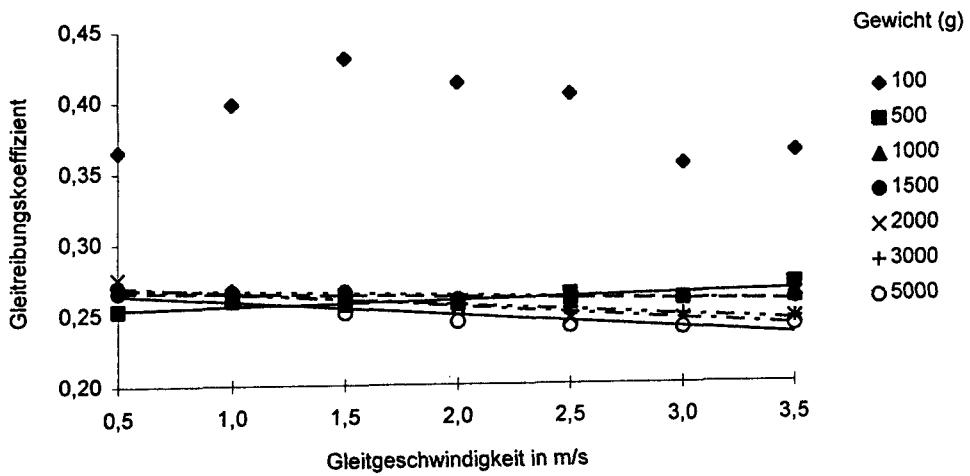


Abb. 2-6. Papierbeutel, Testoberfläche 1

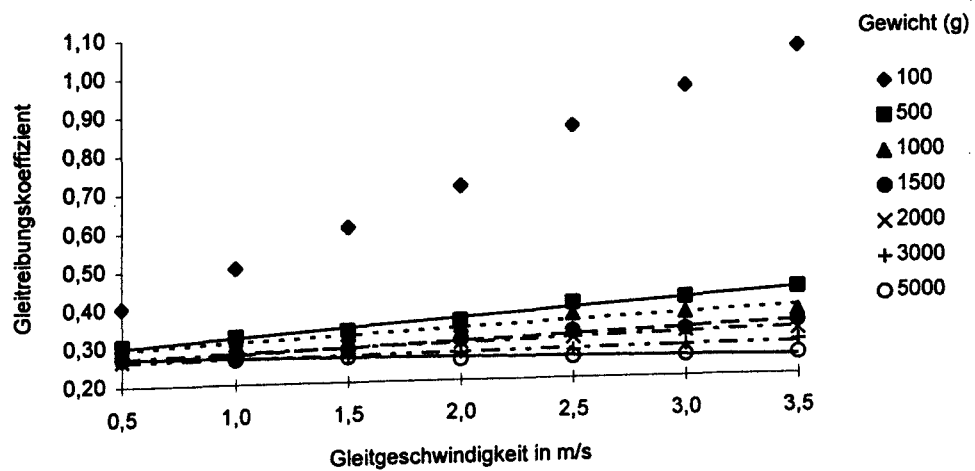


Abb. 2-7. Mittelwerte Schachteln, Testoberfläche 2

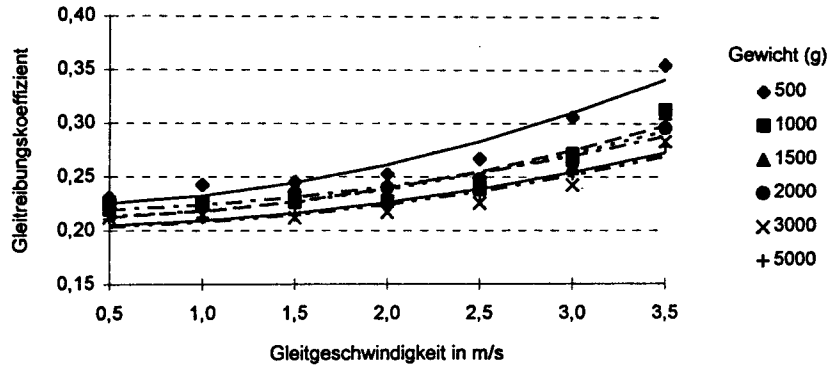


Abb. 2-8. Mittelwerte Faltschachteln, Testoberfläche 2

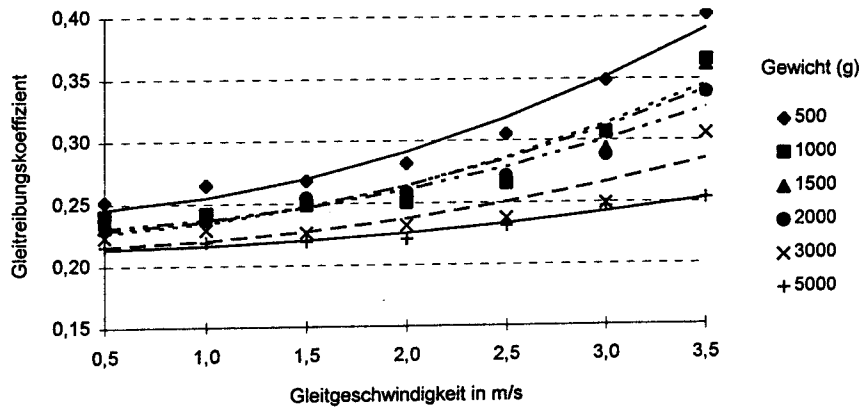


Abb. 2-9. Mittelwerte Schachteln mit glattem Boden, Testoberfläche 2

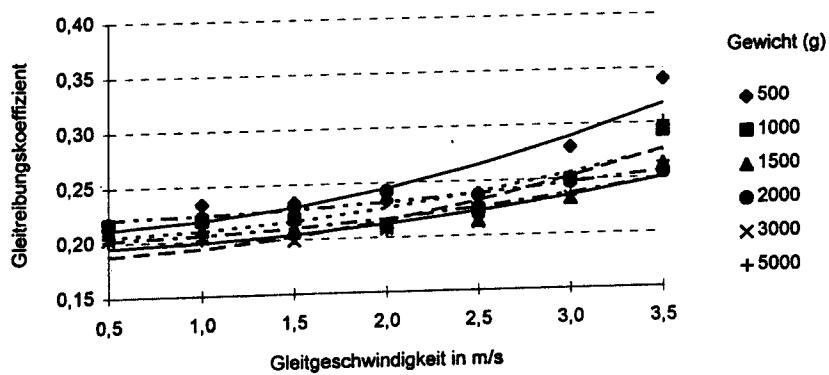


Abb. 2-10. Mittelwerte Beutel, Testoberfläche 2

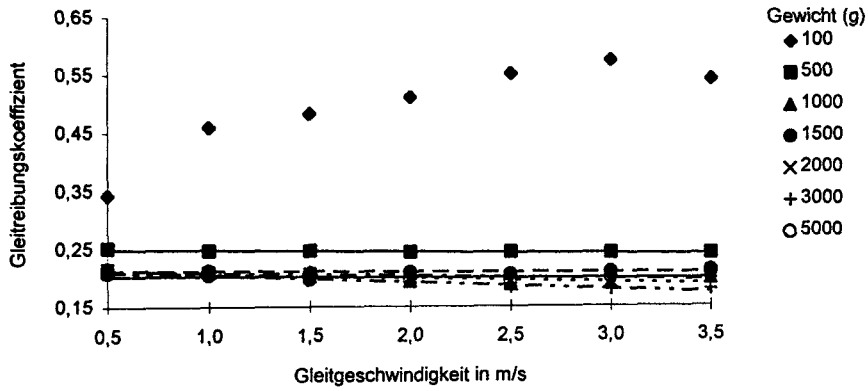


Abb. 2-11. Mittelwerte Polybeutel, Testoberfläche 2

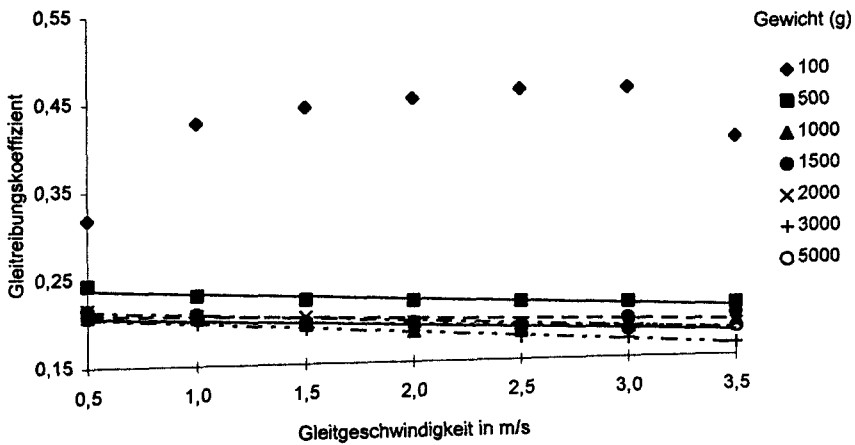


Abb. 2-12. Papierbeutel, Testoberfläche 2

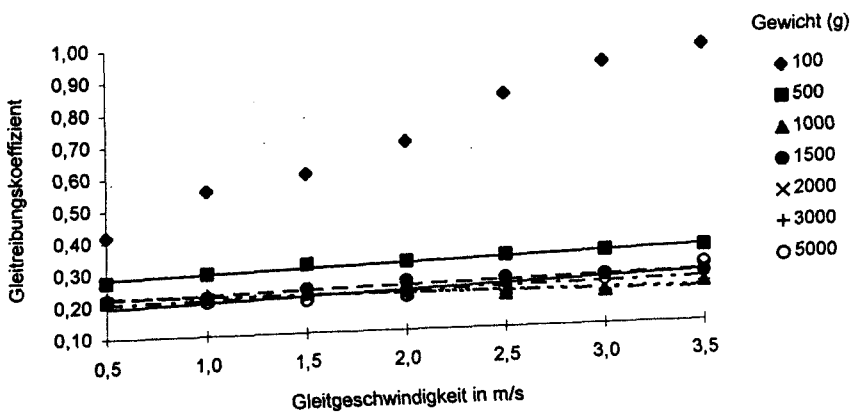


Abb. 2-13. Mittelwerte Schachteln, Testoberfläche 3

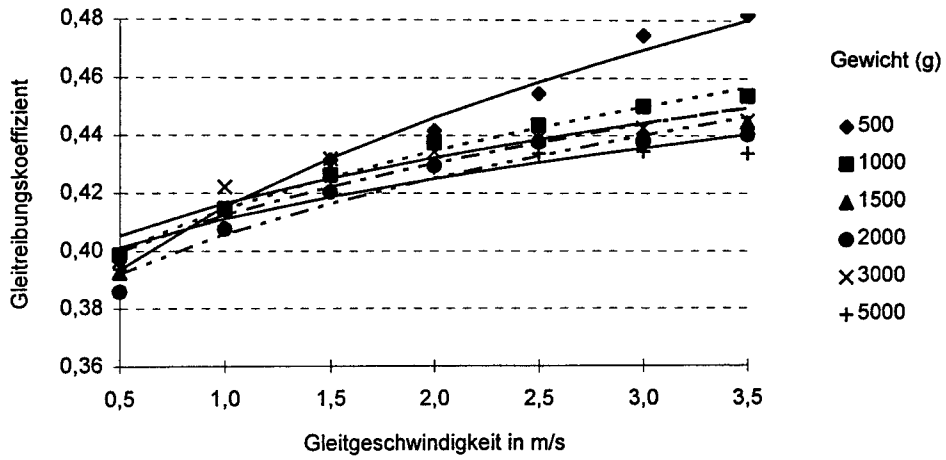


Abb. 2-14. Mittelwerte Faltschachteln, Testoberfläche 3

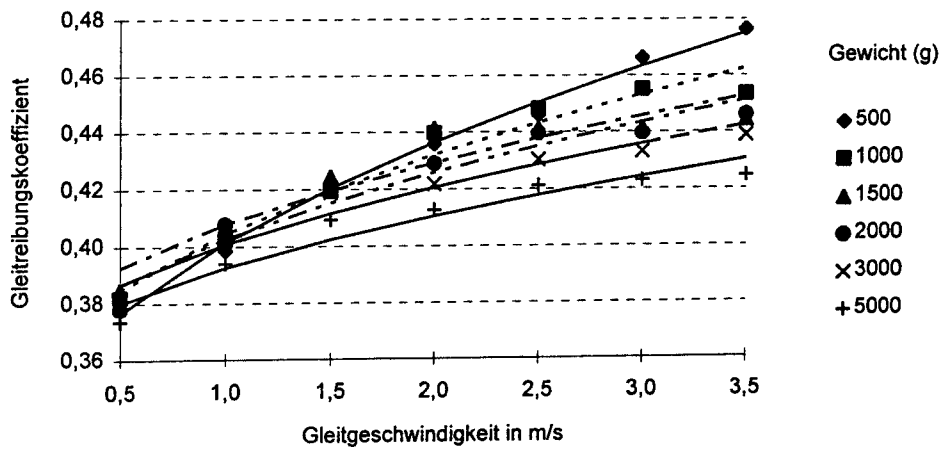


Abb. 2-15. Mittelwerte Schachteln mit glattem Boden, Testoberfläche 3

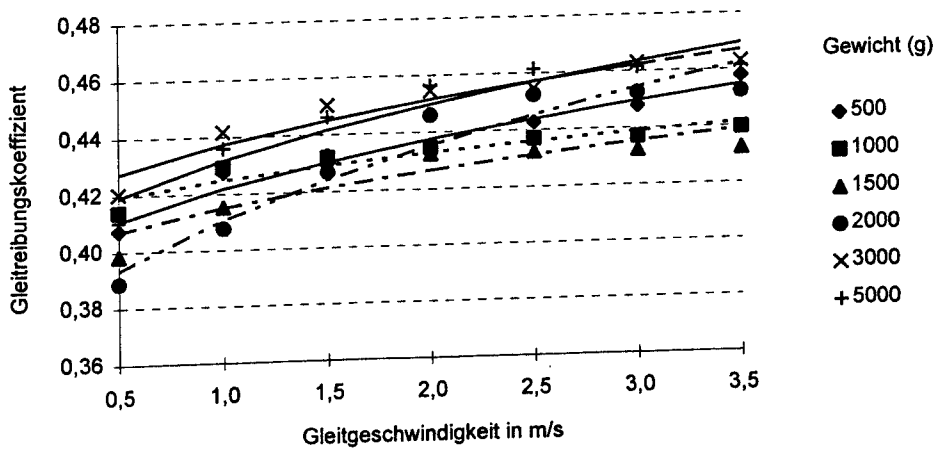


Abb. 2-16. Mittelwerte Beutel, Testoberfläche 3

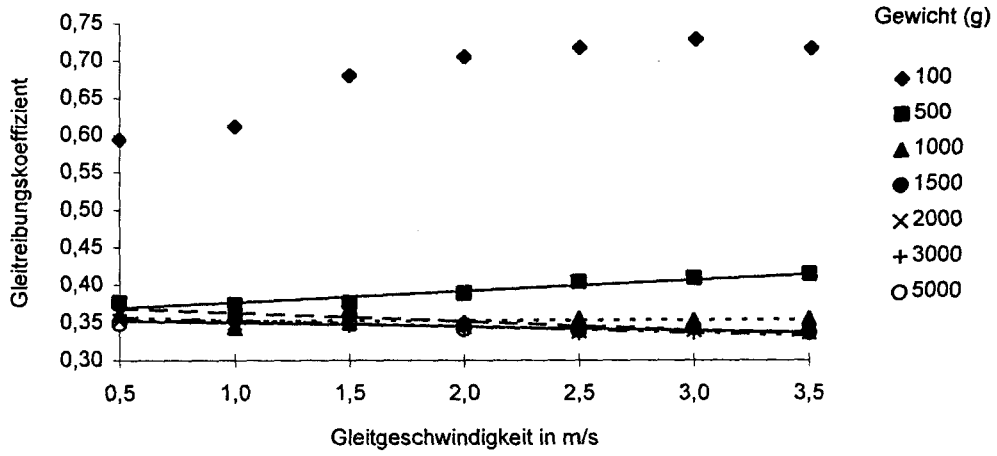


Abb. 2-17. Mittelwerte Polybeutel, Testoberfläche 3

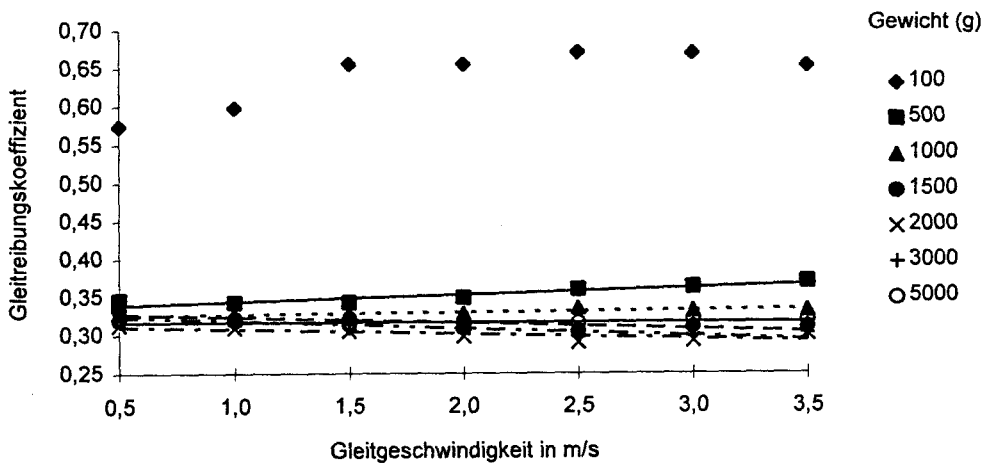
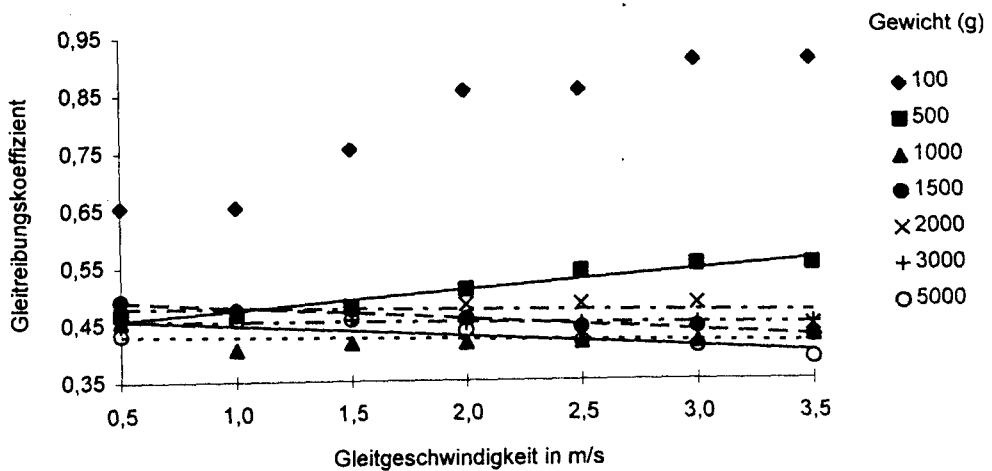


Abb. 2-18. Papierbeutel, Testoberfläche 3



III. 3 Bahnkurven, Messungen ebene Rutsche

Abb. 3-1. Bahnkurven Schachteln; 1,5 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

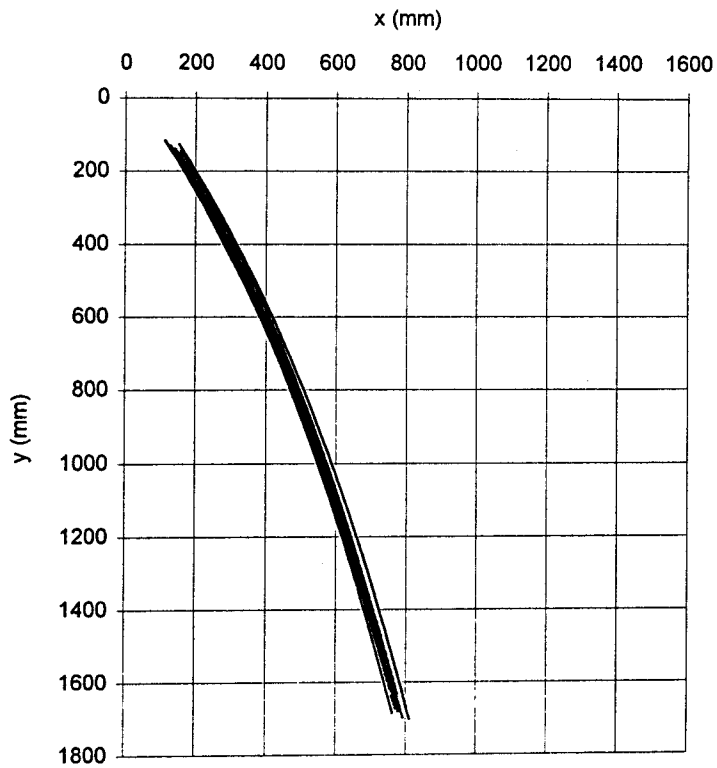


Abb. 3-2. Bahngeschwindigkeiten Schachteln; 1,5 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

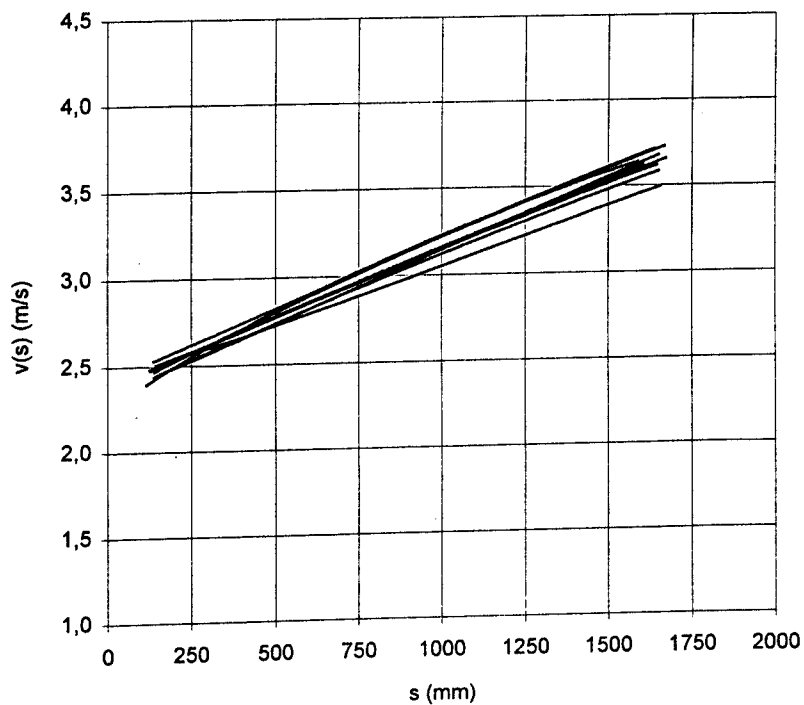


Abb. 3-3. Bahnkurven Beutel; 1,5 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

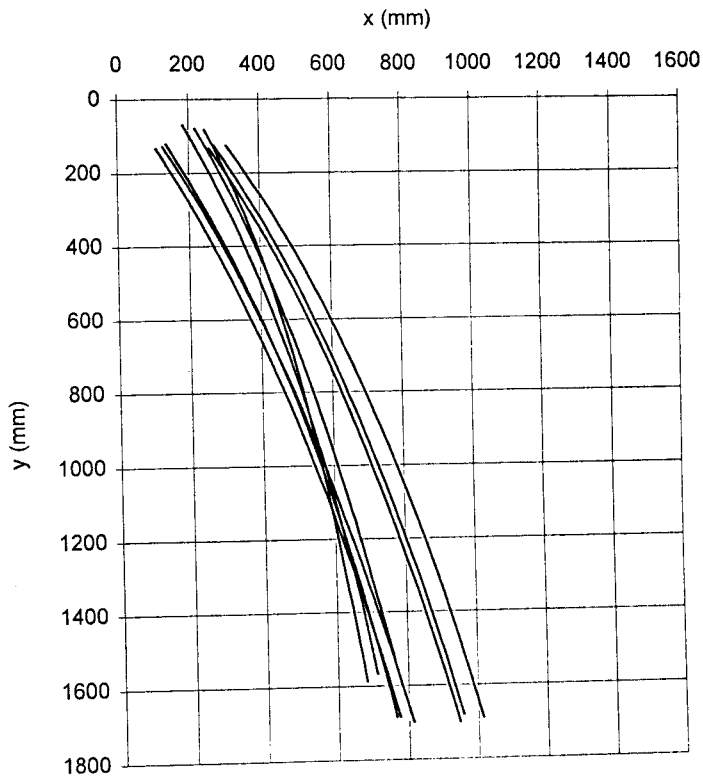


Abb. 3-4. Bahngeschwindigkeiten Beutel; 1,5 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

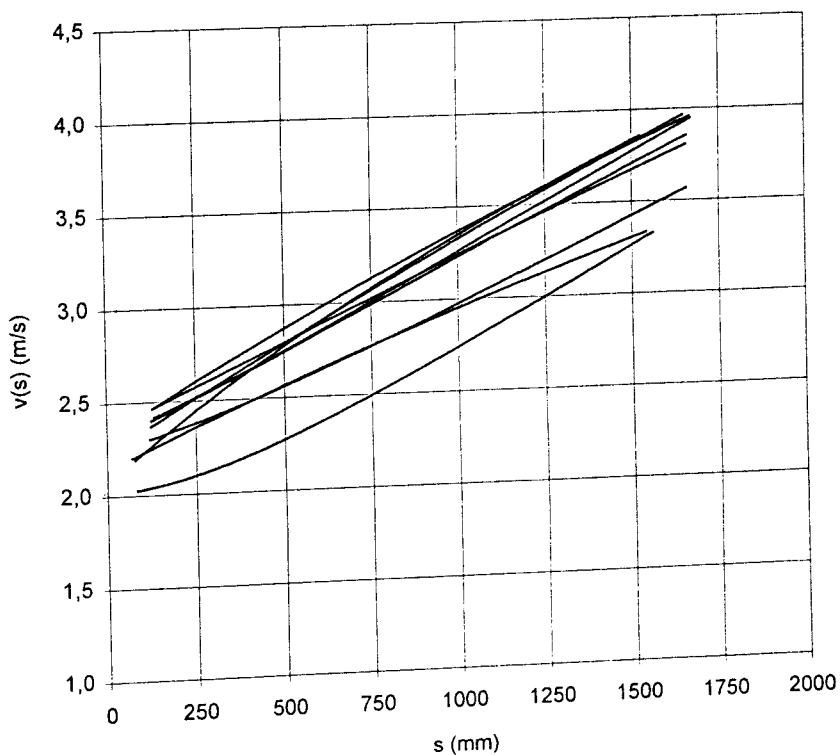


Abb. 3-5. Bahnkurven Schachteln; 1,7 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

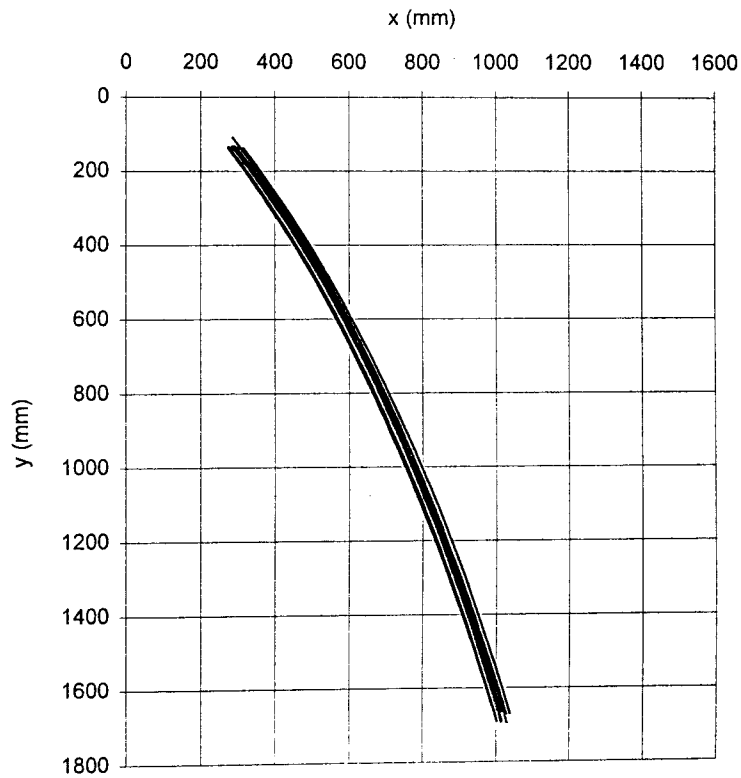


Abb. 3-6. Bahngeschwindigkeiten Schachteln; 1,7 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

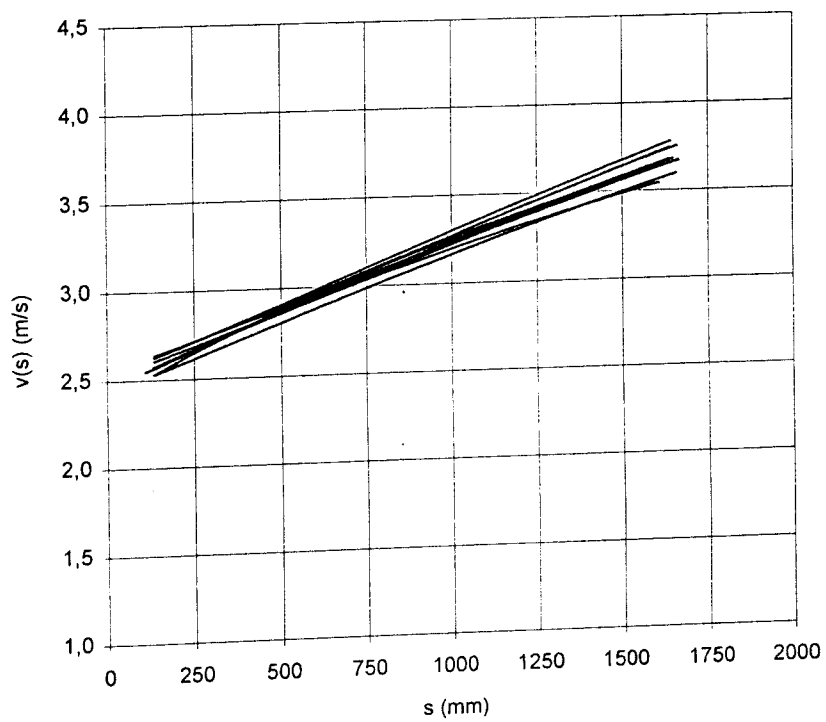


Abb. 3-7. Bahnkurven Beutel; 1,7 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

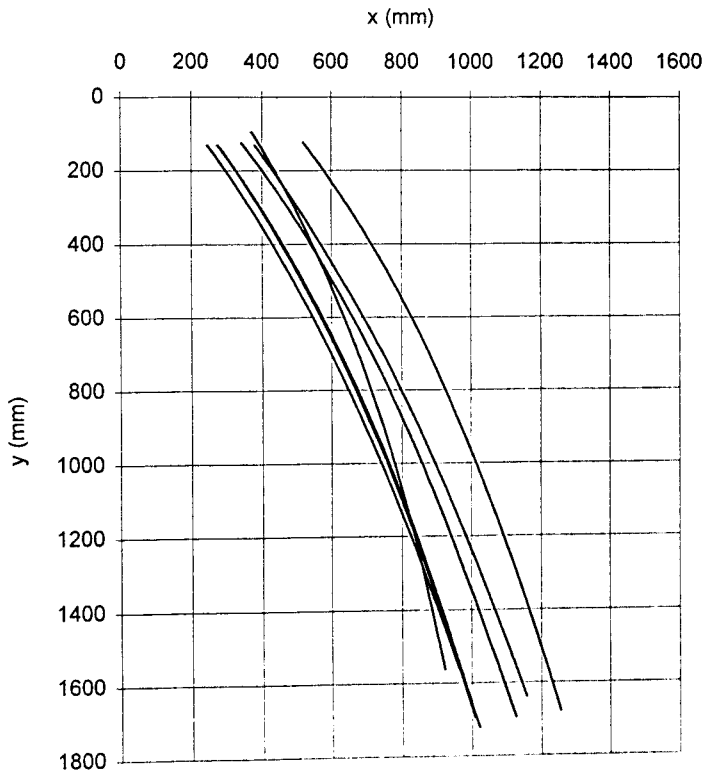


Abb. 3-8. Bahngeschwindigkeiten Beutel; 1,7 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

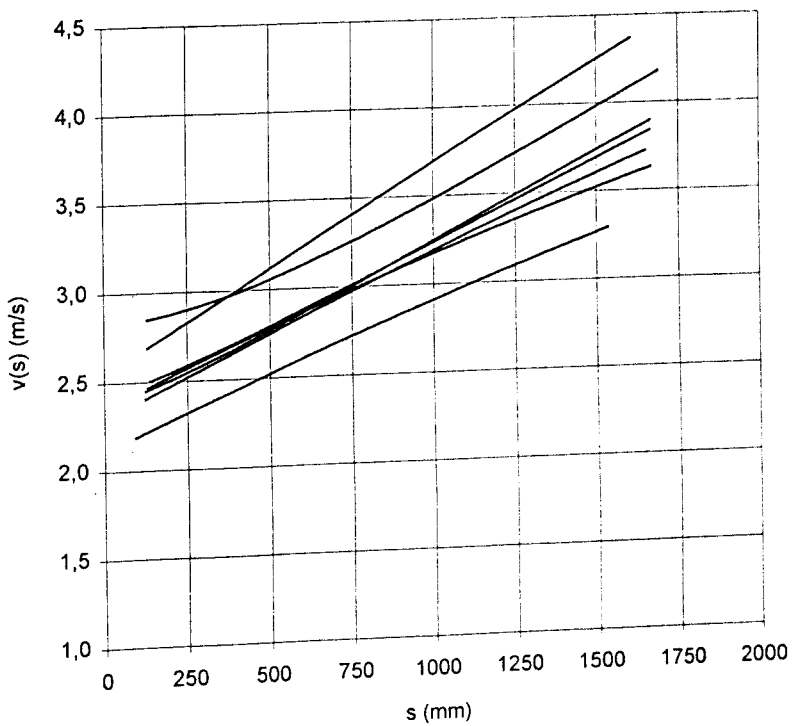


Abb. 3-9. Bahnkurven Schachteln; 1,9 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

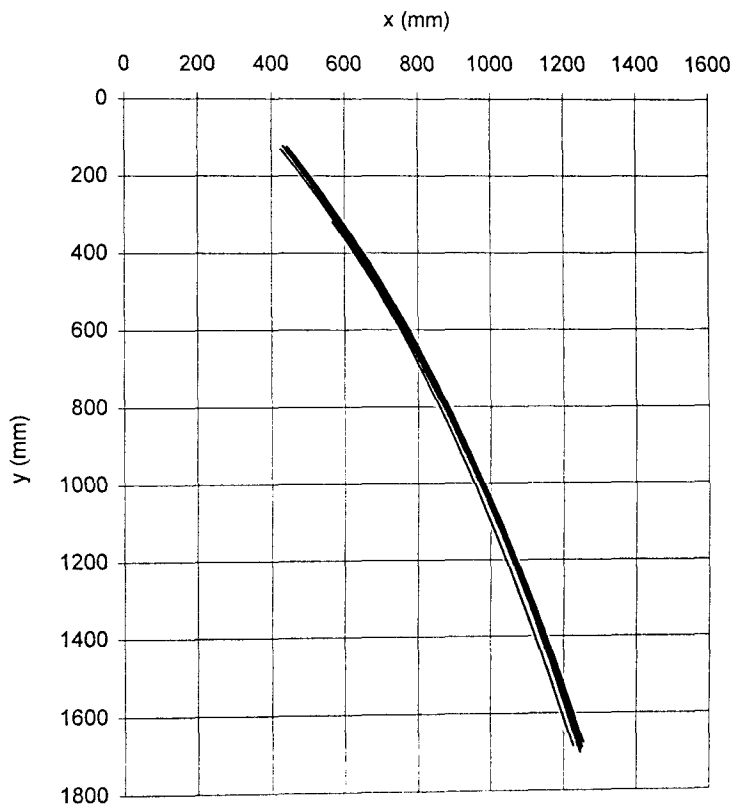


Abb. 3-10. Bahngeschwindigkeiten Schachteln; 1,9 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

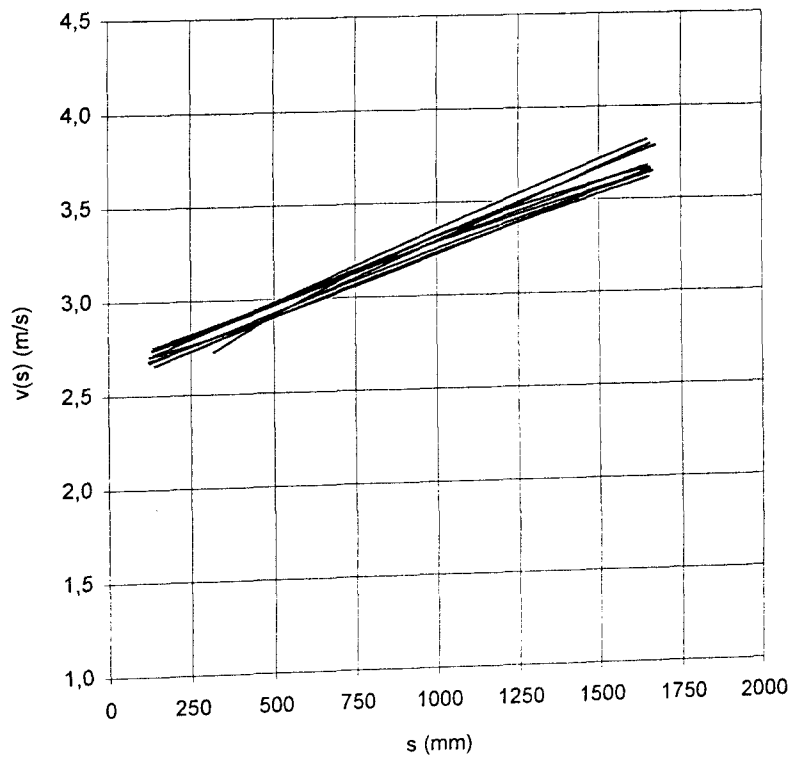


Abb. 3-11. Bahnkurven Beutel; 1,9 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad

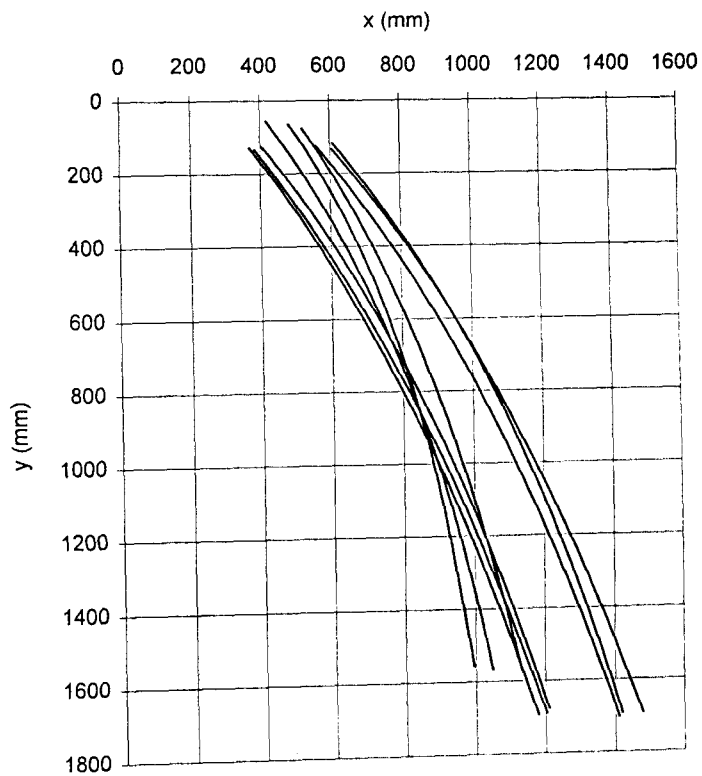
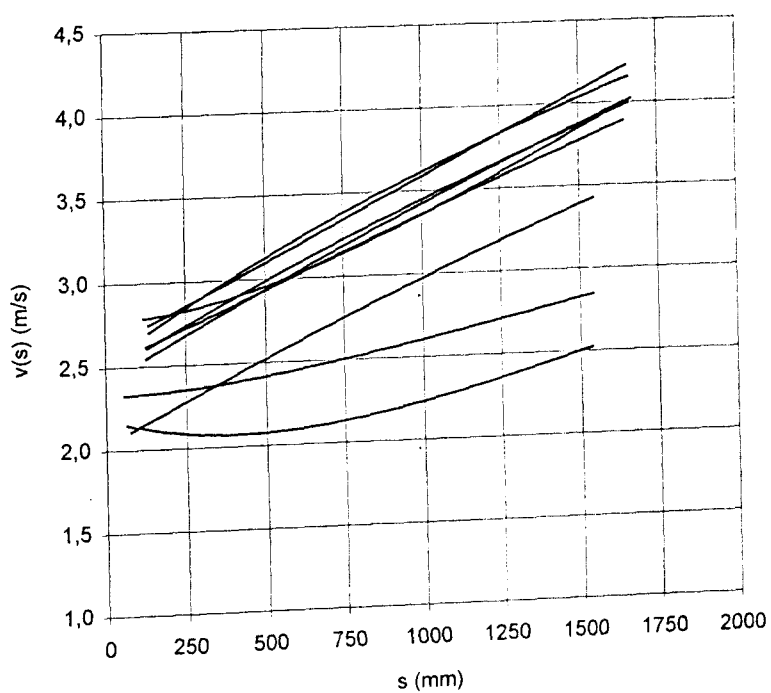


Abb. 3-12. Bahngeschwindigkeiten Beutel; 1,9 m/s, Rutschenneigungswinkel 25 Grad



III. 4 Bahnkurven, Messungen Rutsche mit Überhöhung

Abb. 4-1. Bahnkurven Schachteln; 1,7 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 0°, Begrenzung ab $x = 840$ mm

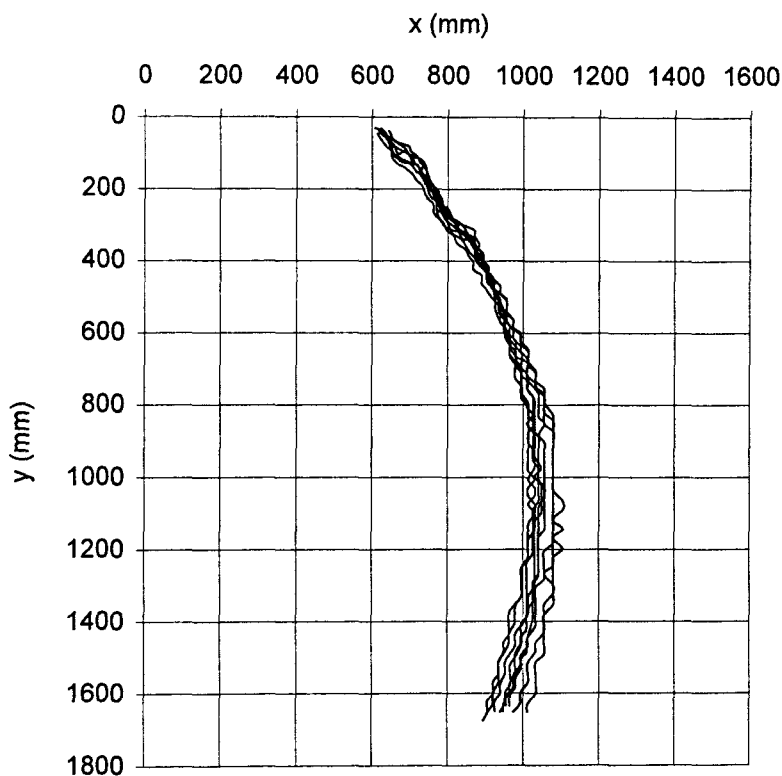


Abb. 4-2. Bahnkurven Schachteln; 1,9 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 0°, Begrenzung ab $x = 840$ mm

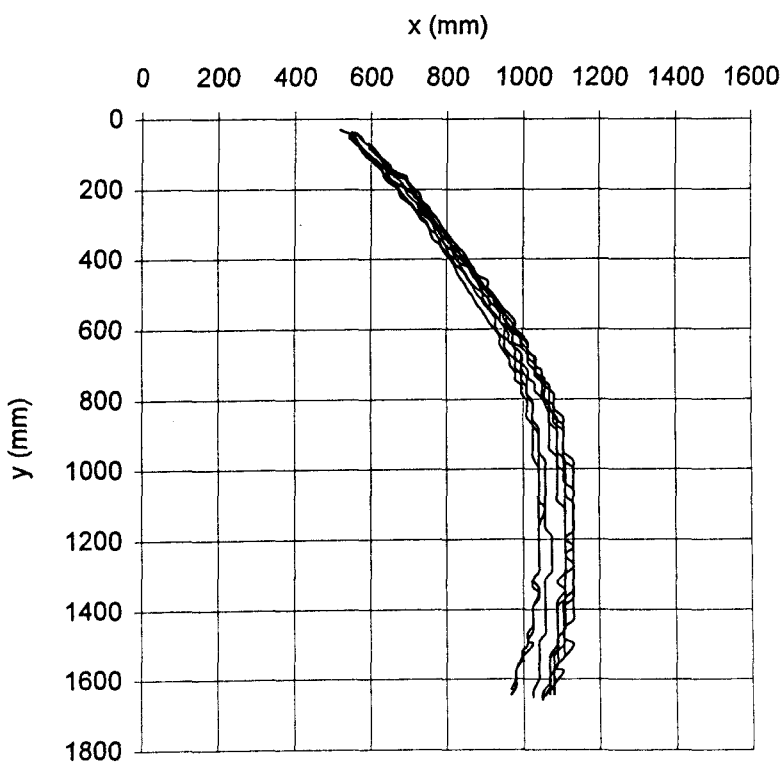


Abb. 4-3. Bahnkurven Schachteln; 2,5 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 0°,
Begrenzung ab x = 840 mm

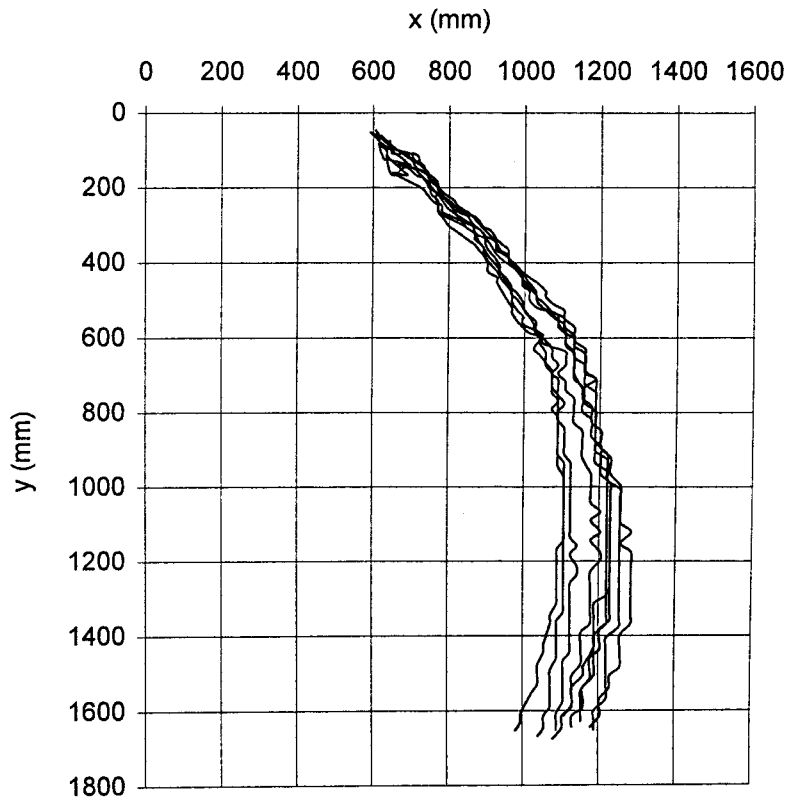


Abb. 4-4. Bahnkurven Beutel; 1,7 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 0°, Begrenzung
ab x = 840 mm

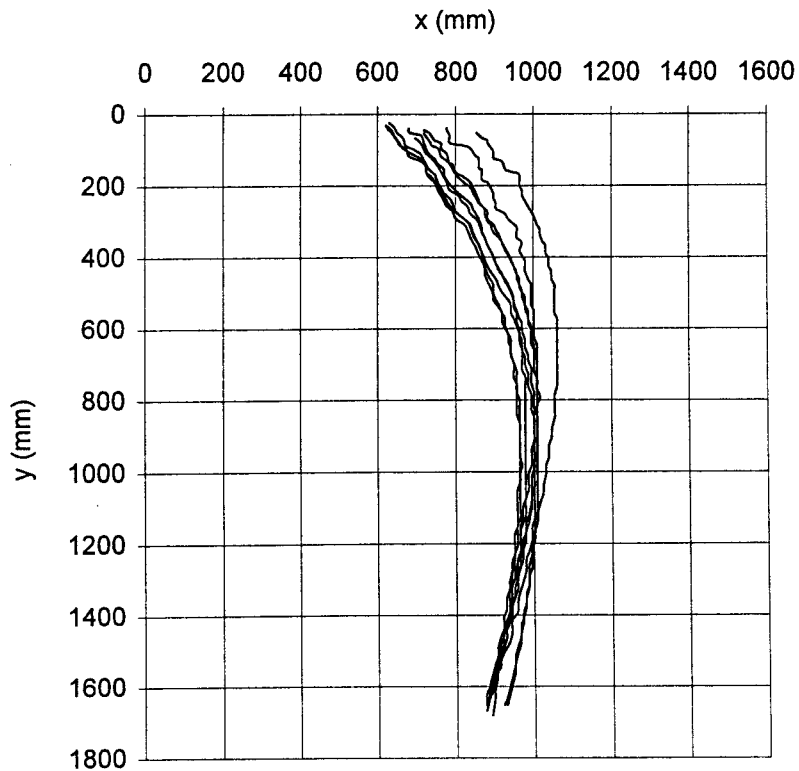


Abb. 4-5. Bahnkurven Beutel; 1,9 m/s, Neigungswinkel 25° , Anstellwinkel 0° , Begrenzung ab $x = 840$ mm

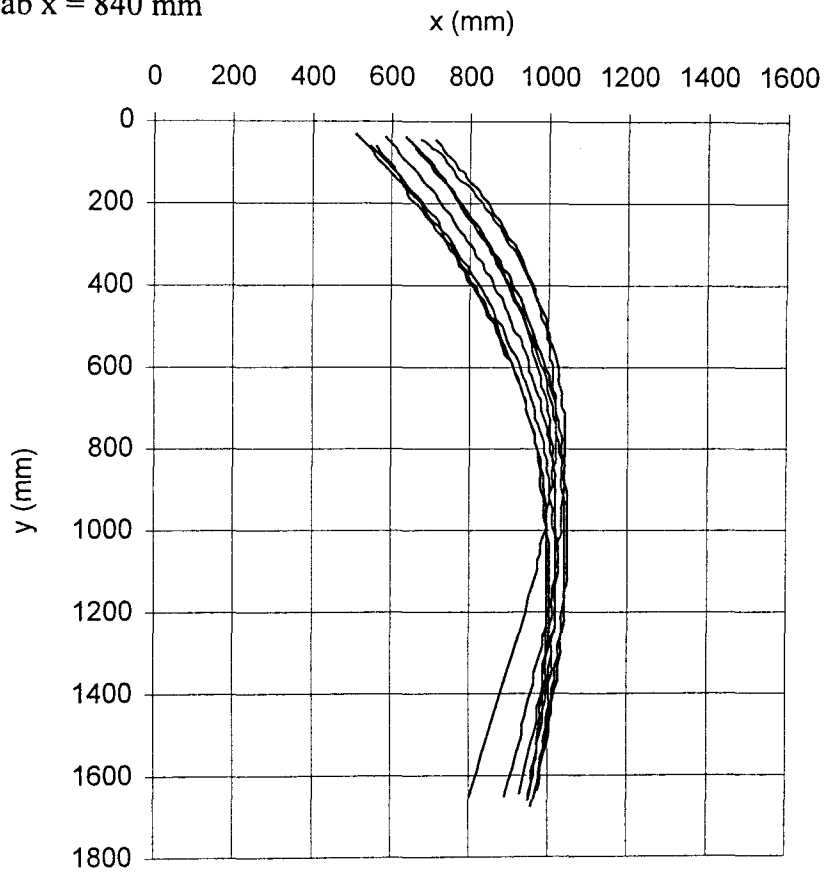


Abb. 4-6. Bahnkurven Beutel; 2,5 m/s, Neigungswinkel 25° , Anstellwinkel 0° , Begrenzung ab $x = 840$ mm

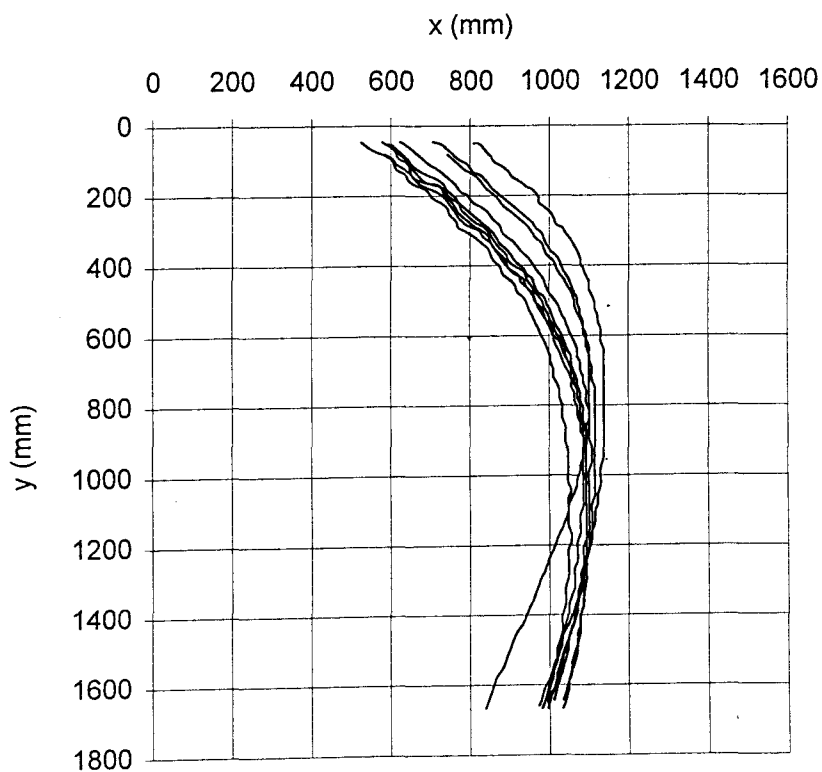


Abb. 4-7. Bahnkurven Schachteln; 1,7 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 15°,
Begrenzung ab $x = (856 + 0,26 \cdot y)$ mm

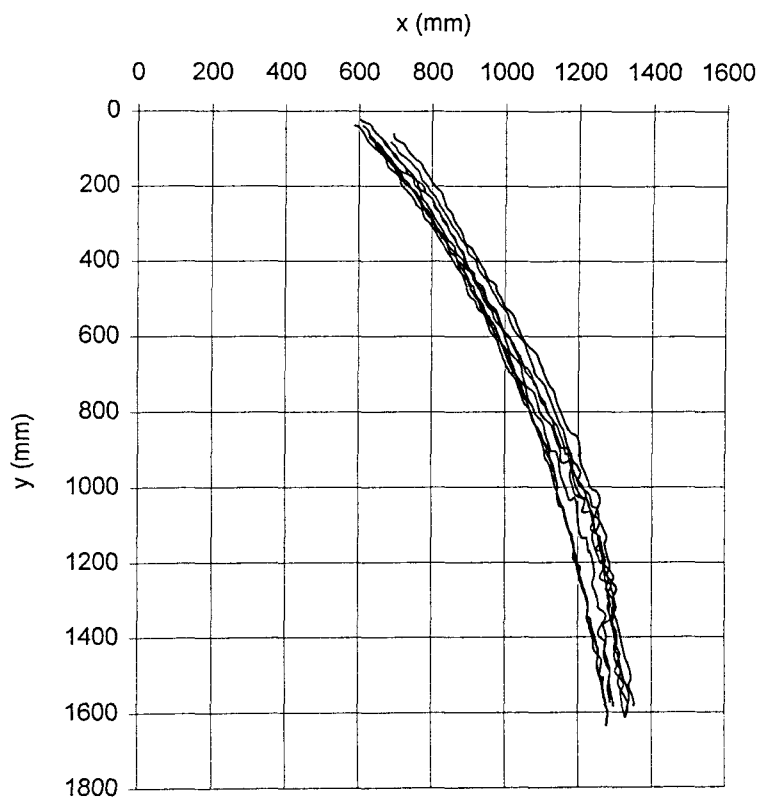


Abb. 4-8. Bahnkurven Schachteln; 1,9 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 15°,
Begrenzung ab $x = (856 + 0,26 \cdot y)$ mm

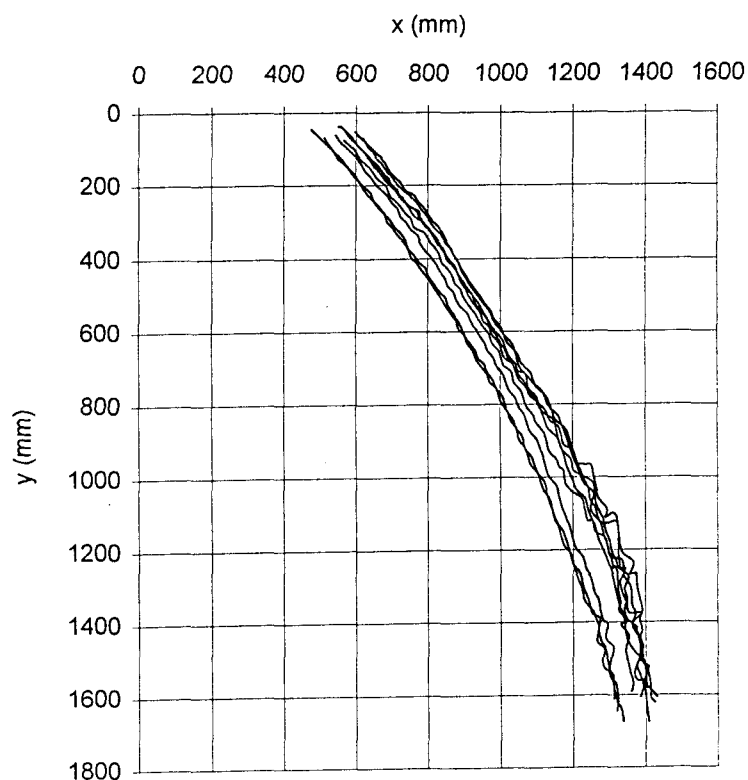


Abb. 4-9. Bahnkurven Schachteln; 2,5 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 15°,
Begrenzung ab $x = (856 + 0,26 \cdot y)$ mm

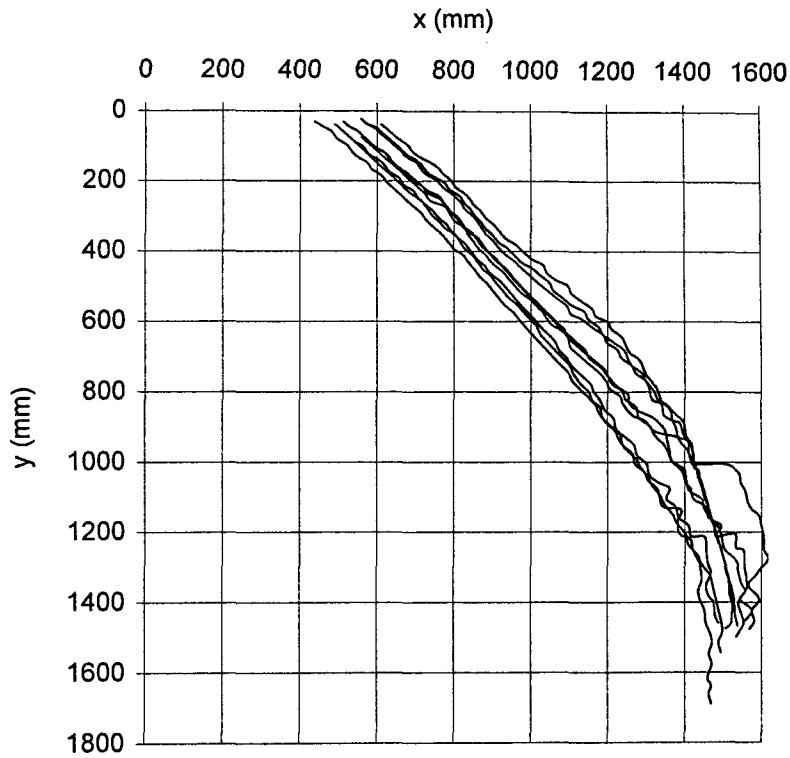


Abb. 4-10. Bahnkurven Beutel; 1,7 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 15°, Begrenzung
ab $x = (856 + 0,26 \cdot y)$ mm

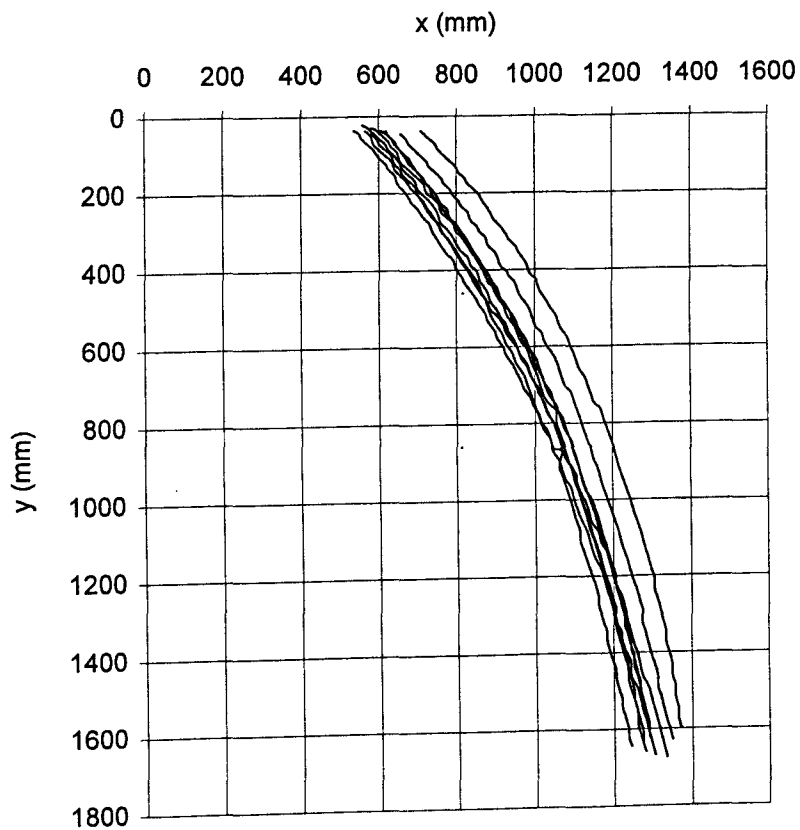


Abb. 4-11. Bahnkurven Beutel; 1,9 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 15°, Begrenzung ab $x = (856 + 0,26 \cdot y)$ mm

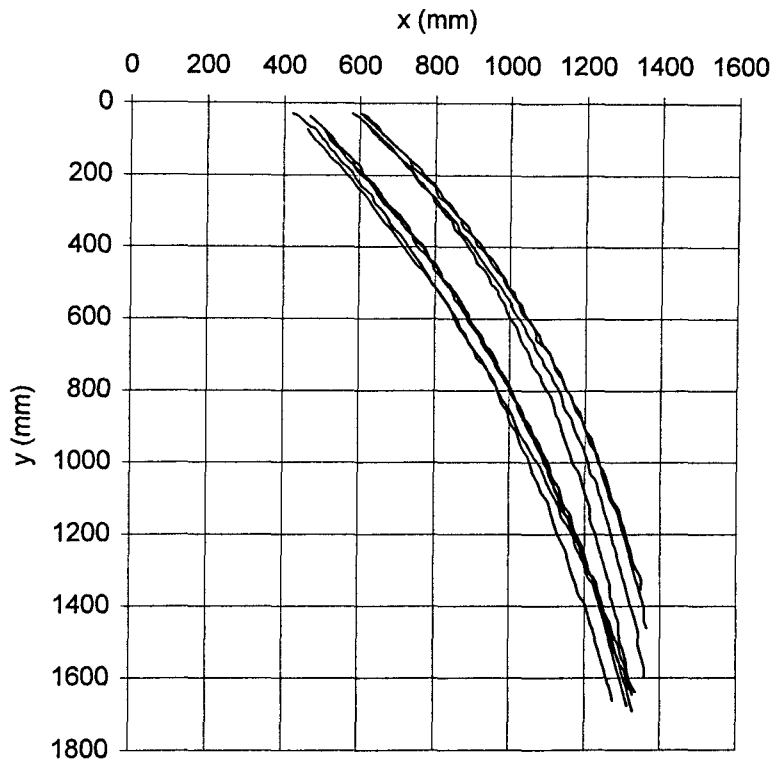
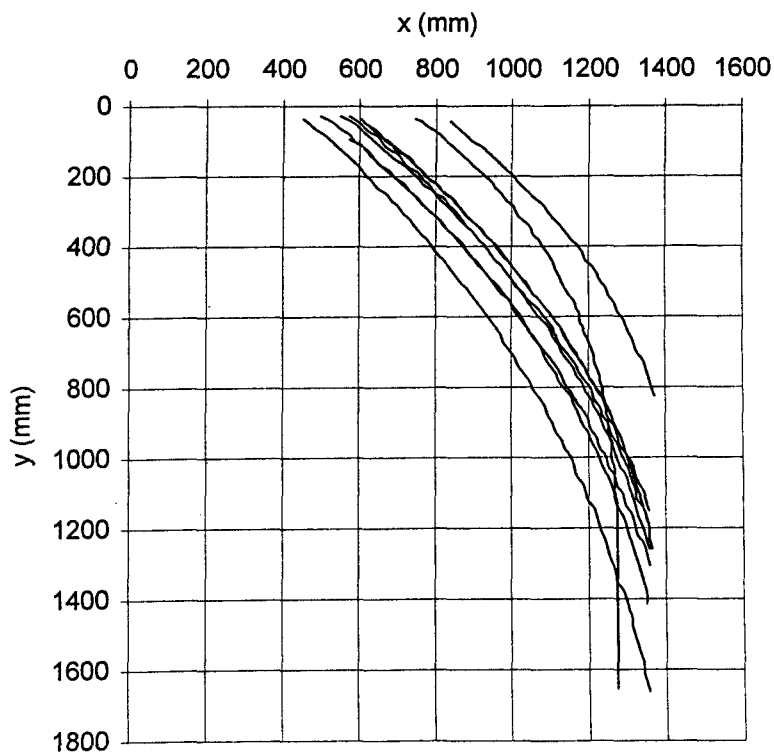


Abb. 4-12. Bahnkurven Beutel; 1,9 m/s, Neigungswinkel 25°, Anstellwinkel 15°, Begrenzung ab $x = (856 + 0,26 \cdot y)$ mm



III. 5 Auslegungsdiagramme für ebene Rutschen

Abb. 5-1. Kennfelder $v(x)$ über x für verschiedene $v(y)$ Anfangsgeschwindigkeiten, $\mu = 0,2$

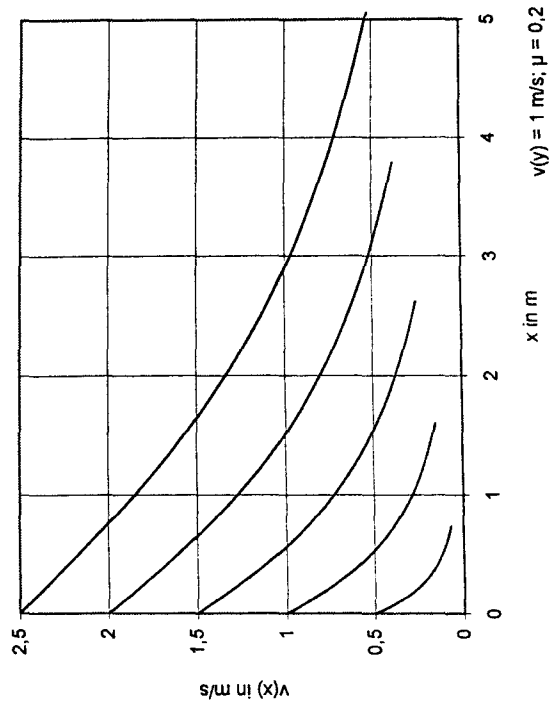
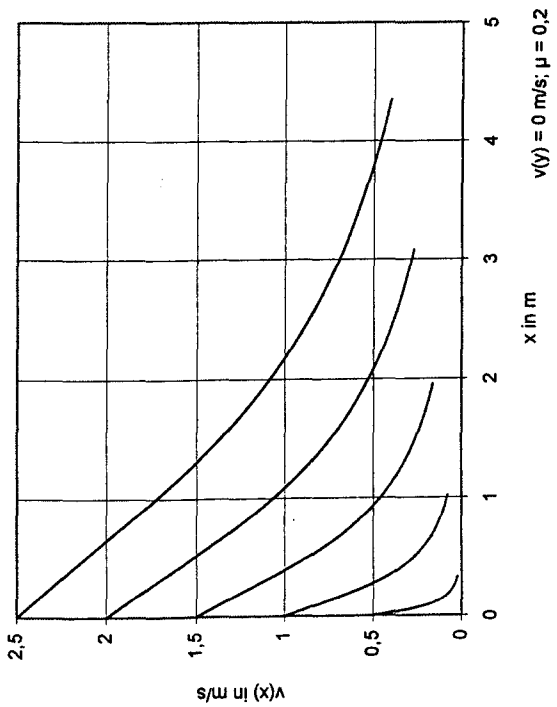
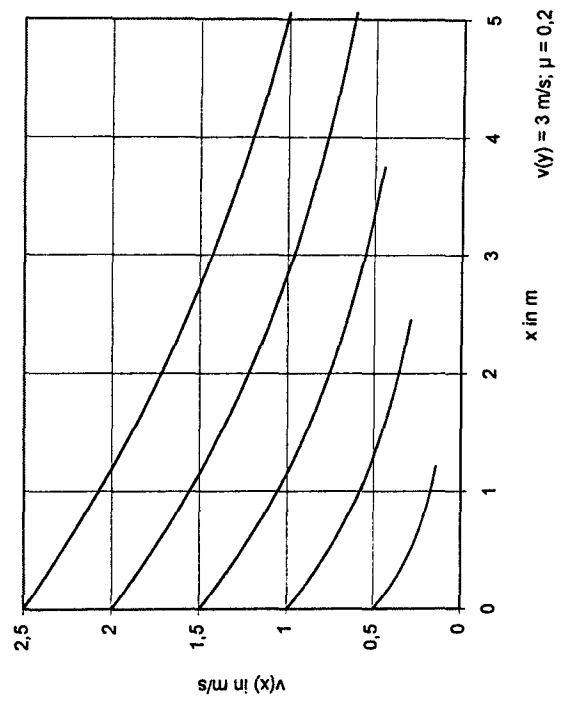
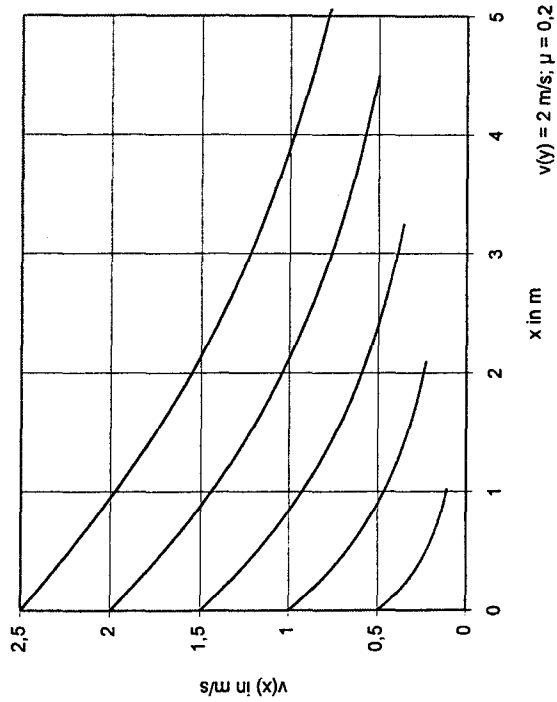


Abb. 5-2. Kennfelder $v(y)$ über $v(x)$ für verschiedene $v(y)$ Anfangsgeschwindig., $\mu = 0,2$

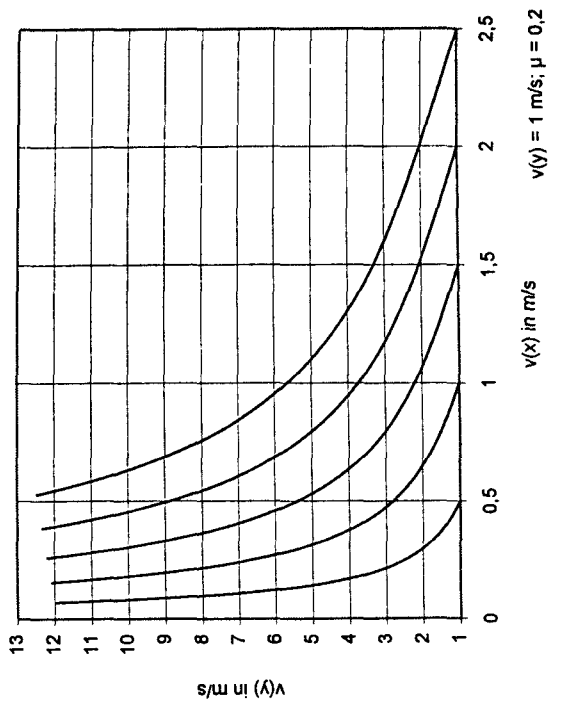
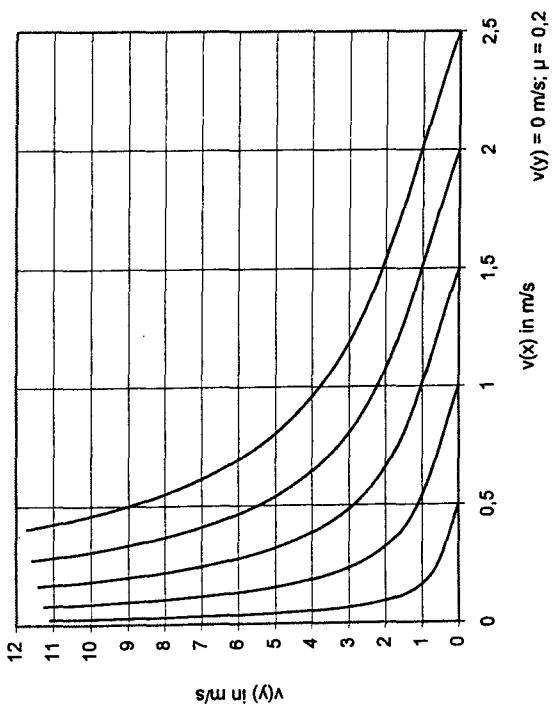
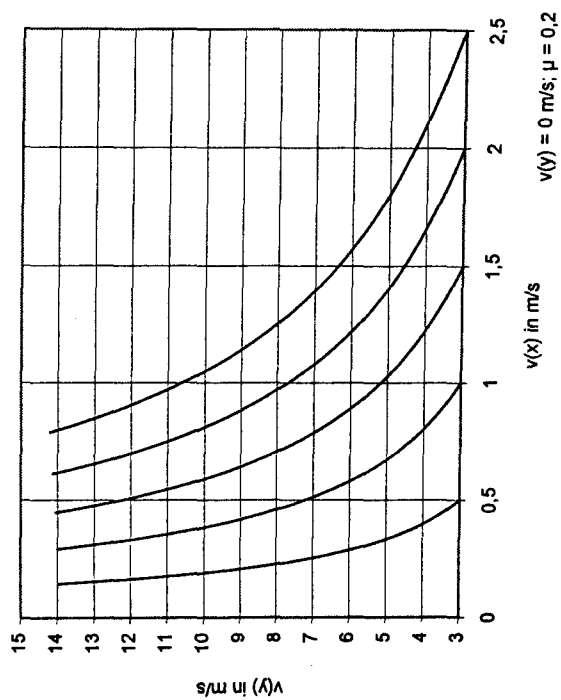
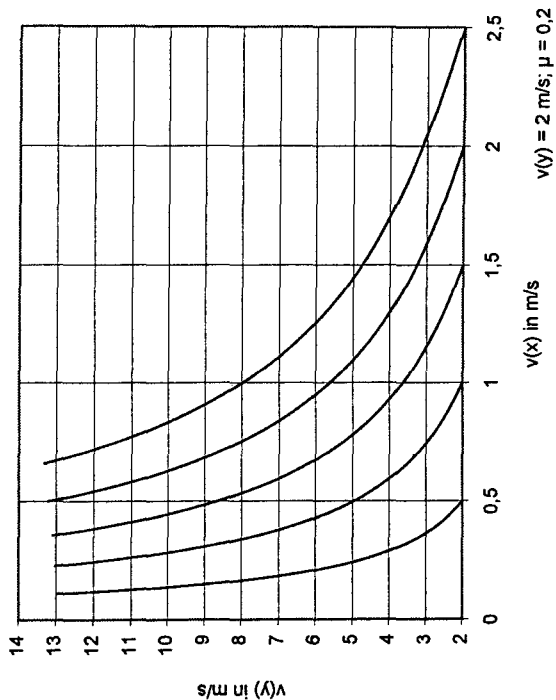


Abb. 5-3. Kennfelder $v(y)$ über y für verschiedene $v(x)$ Anfangsgeschwindigkeiten, $\mu = 0,2$

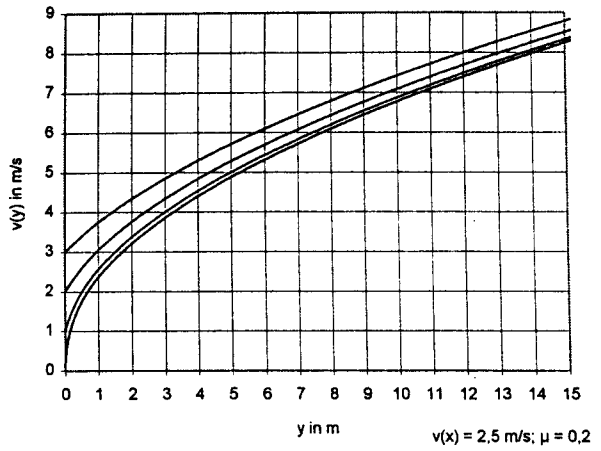
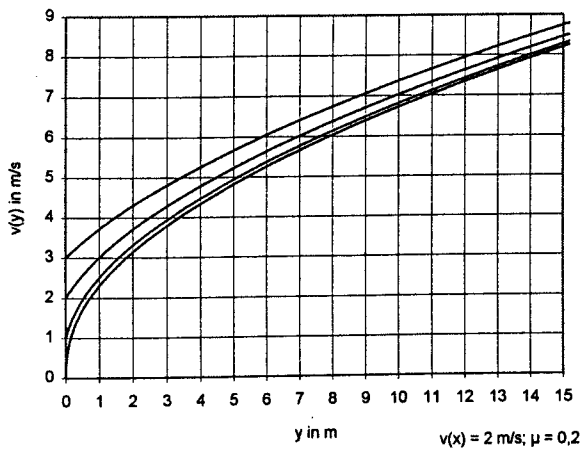
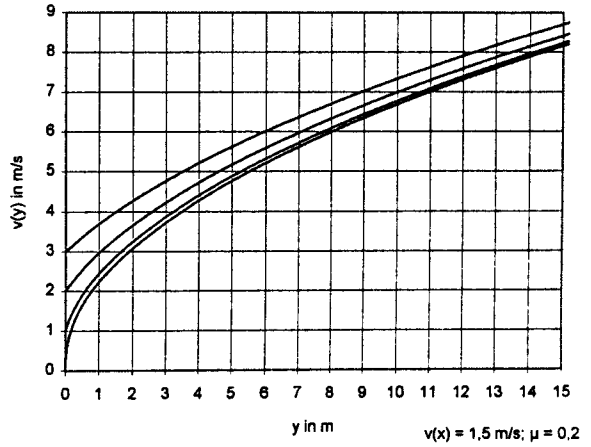
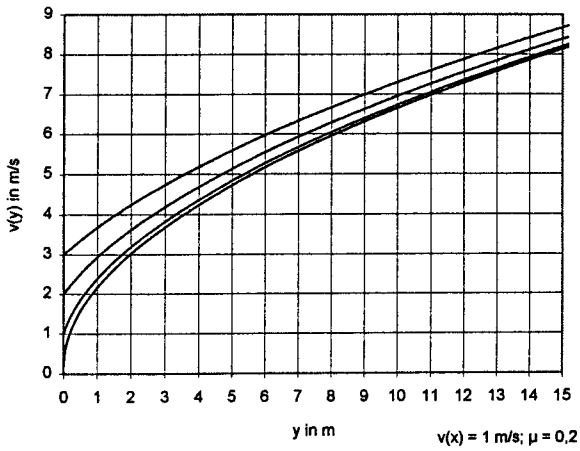
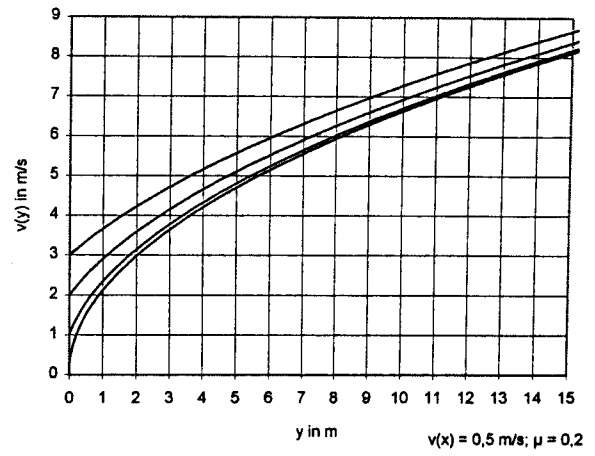
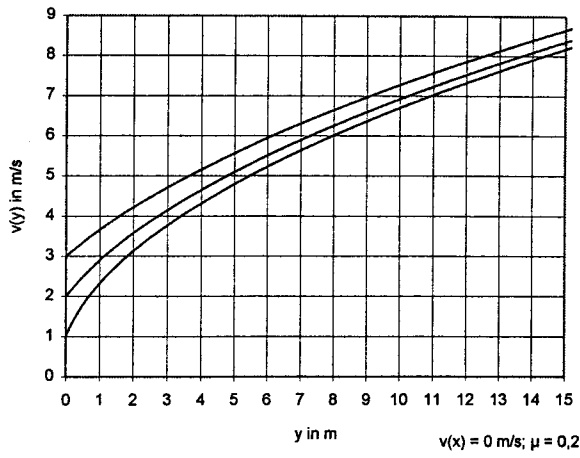


Abb. 5-4. Kennfelder $v(x)$ über x für verschiedene $v(y)$ Anfangsgeschwindigkeiten, $\mu = 0,3$

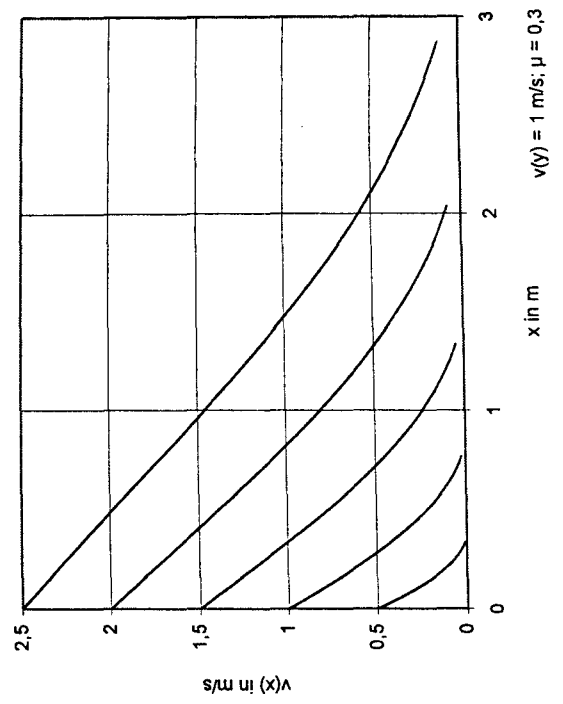
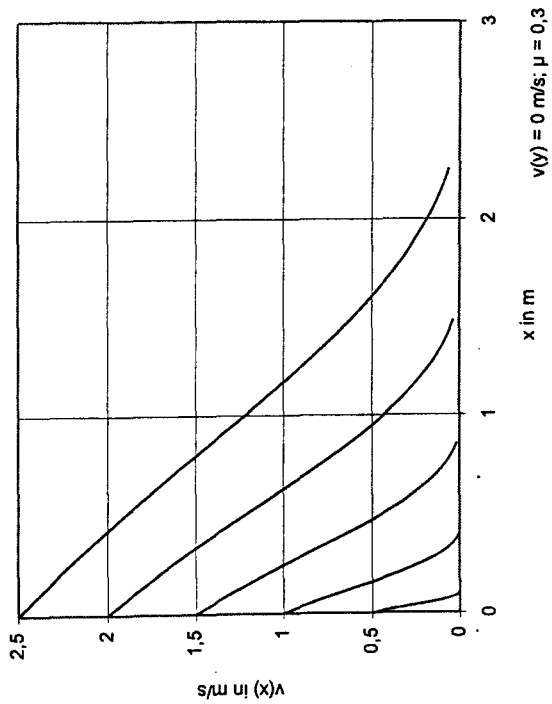
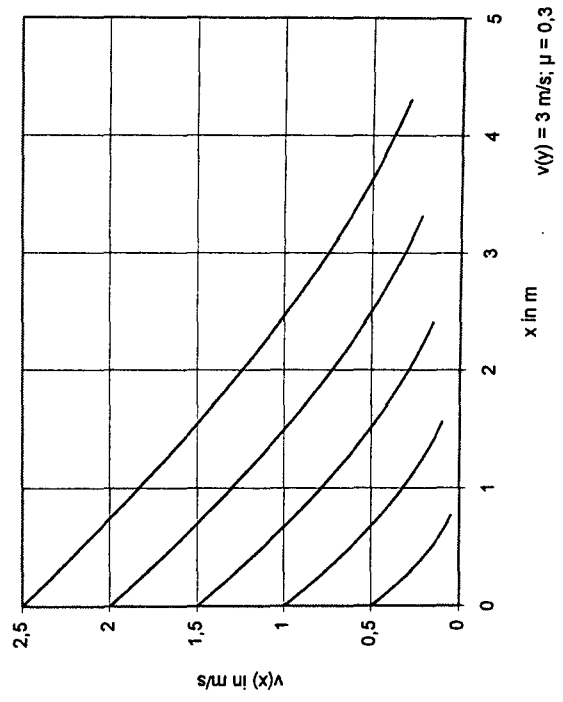
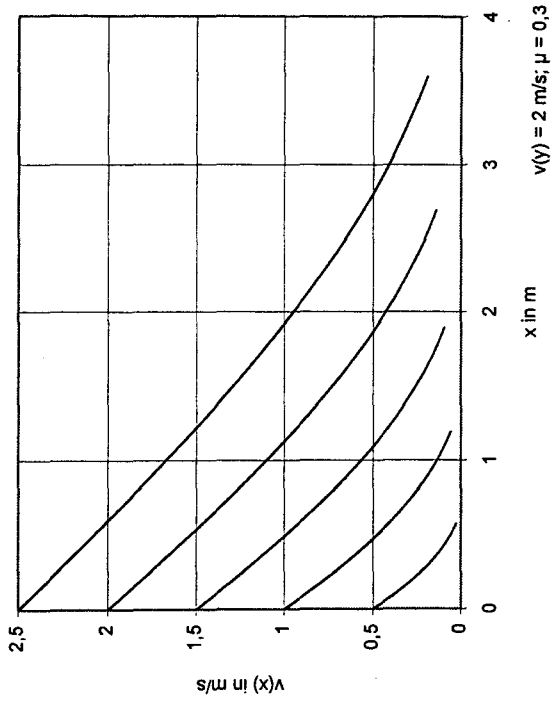


Abb. 5-5. Kennfelder $v(y)$ über $v(x)$ für verschiedene $v(y)$ Anfangsgeschwindig., $\mu = 0,3$

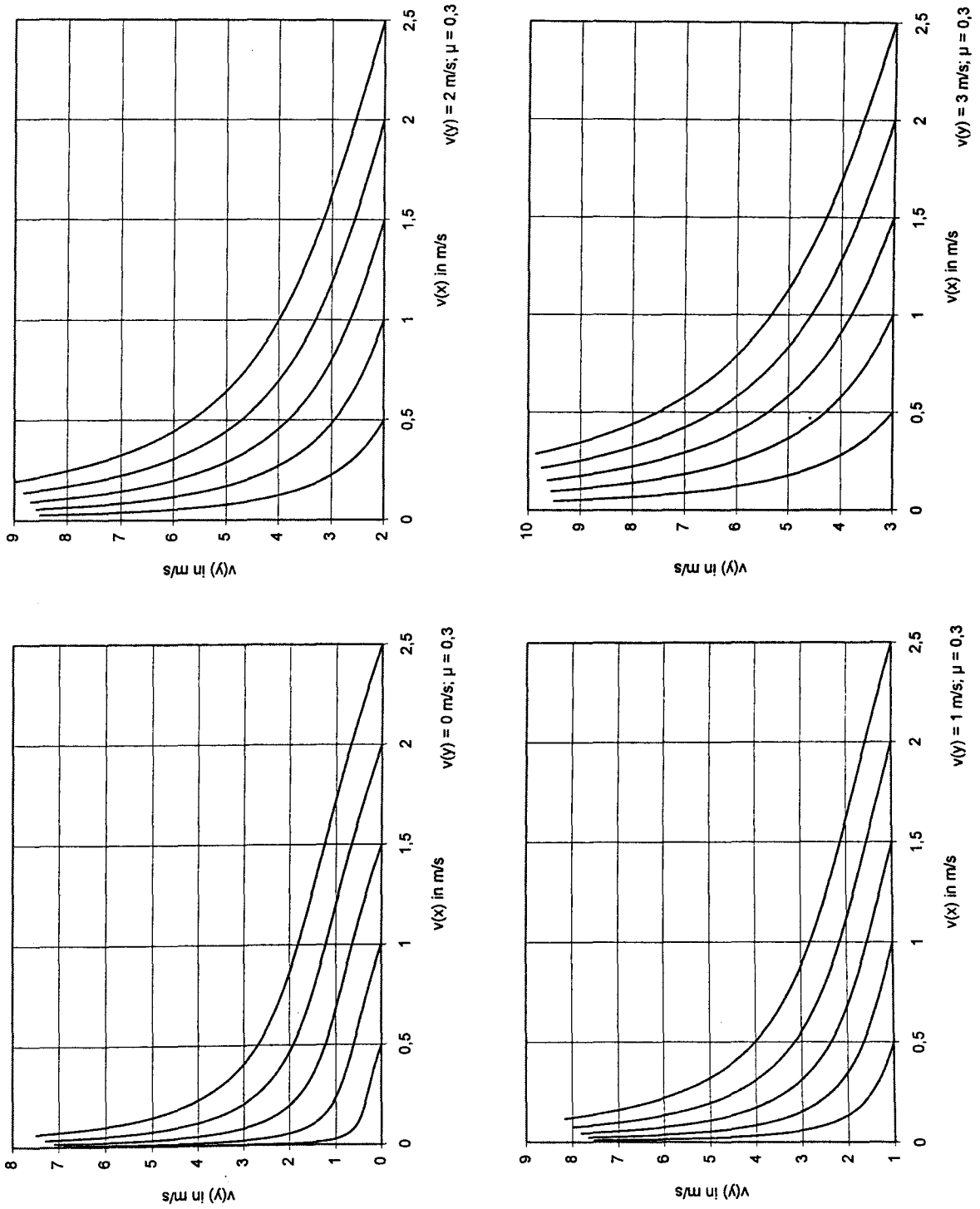


Abb. 5-6. Kennfelder $v(y)$ über y für verschiedene $v(x)$ Anfangsgeschwindigkeiten, $\mu = 0,3$

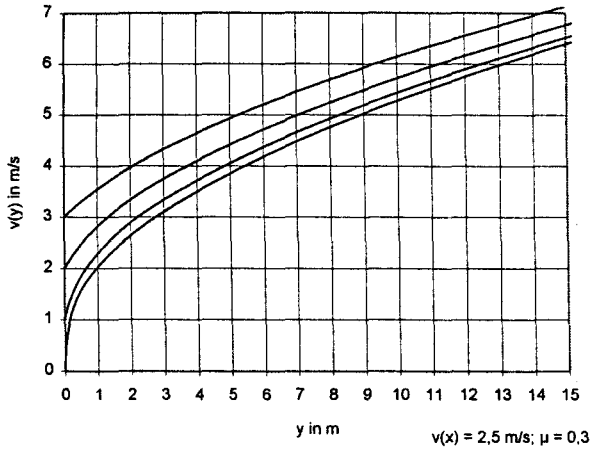
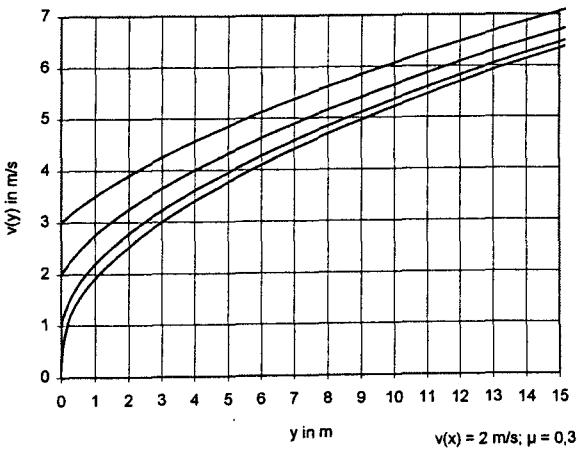
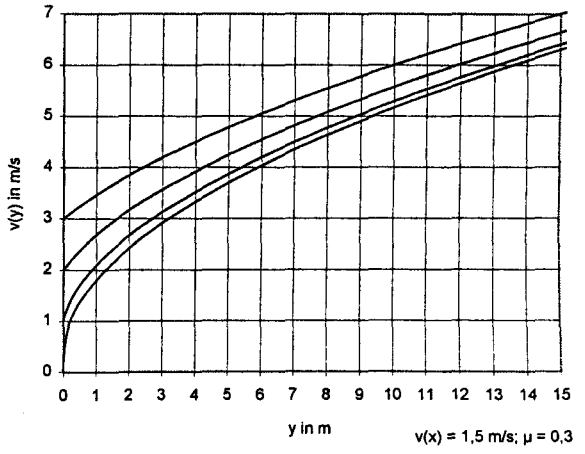
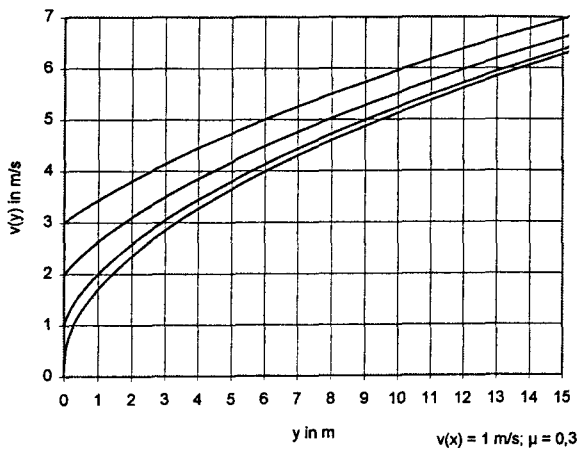
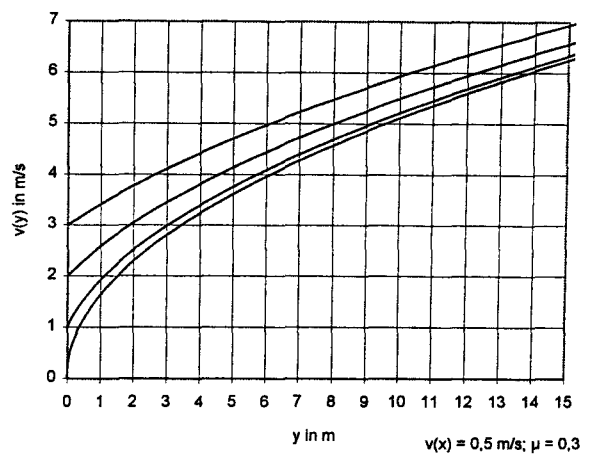
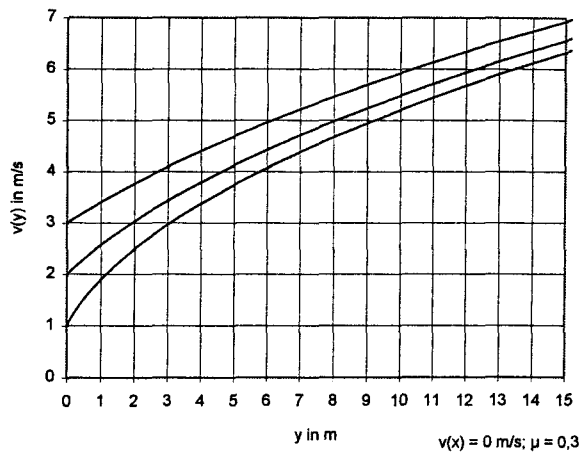


Abb. 5-7. Kennfelder $v(x)$ über x für verschiedene $v(y)$ Anfangsgeschwindigkeiten, $\mu = 0,4$

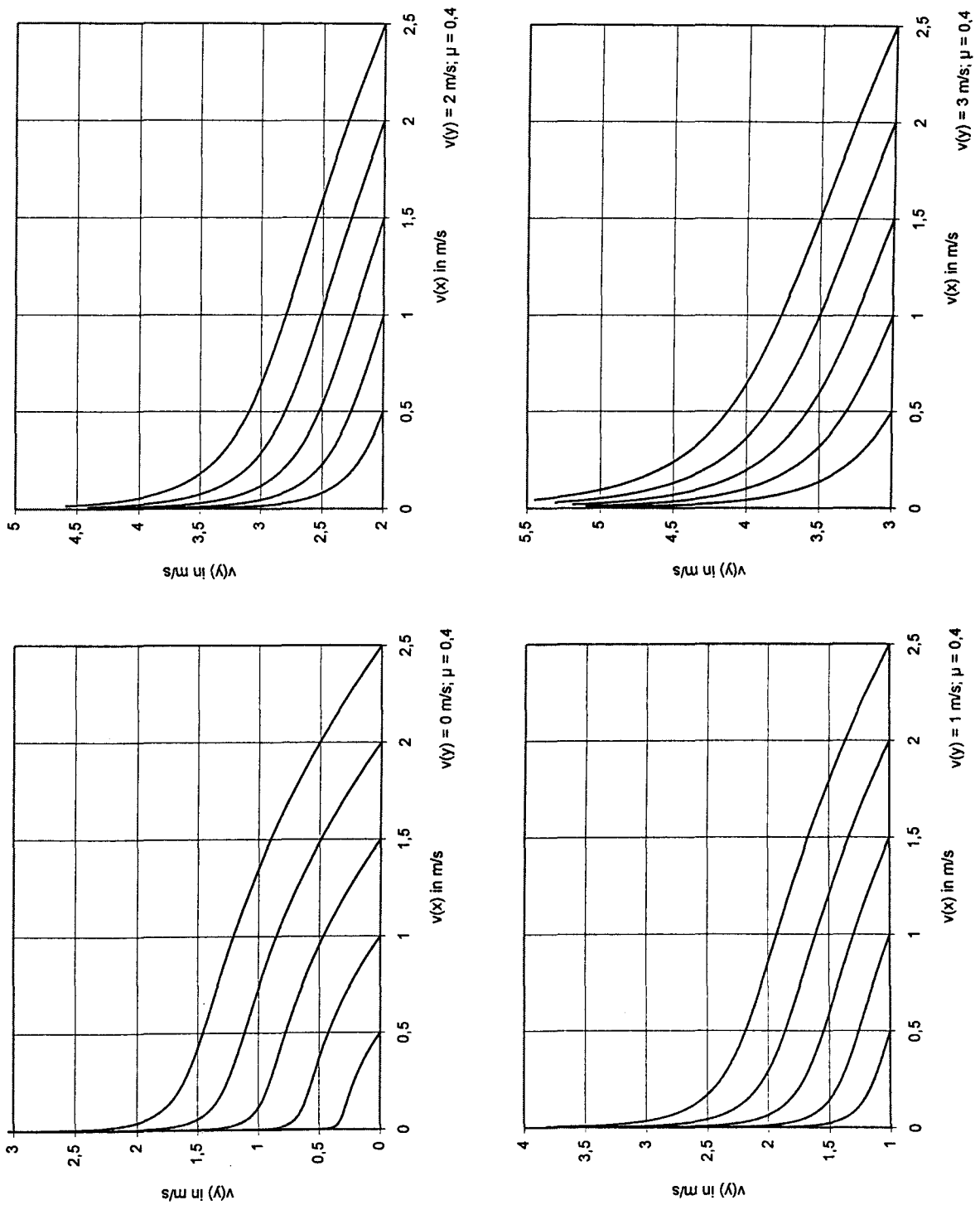


Abb. 5-8. Kennfelder $v(y)$ über $v(x)$ für verschiedene $v(y)$ Anfangsgeschwindigk., $\mu = 0,4$

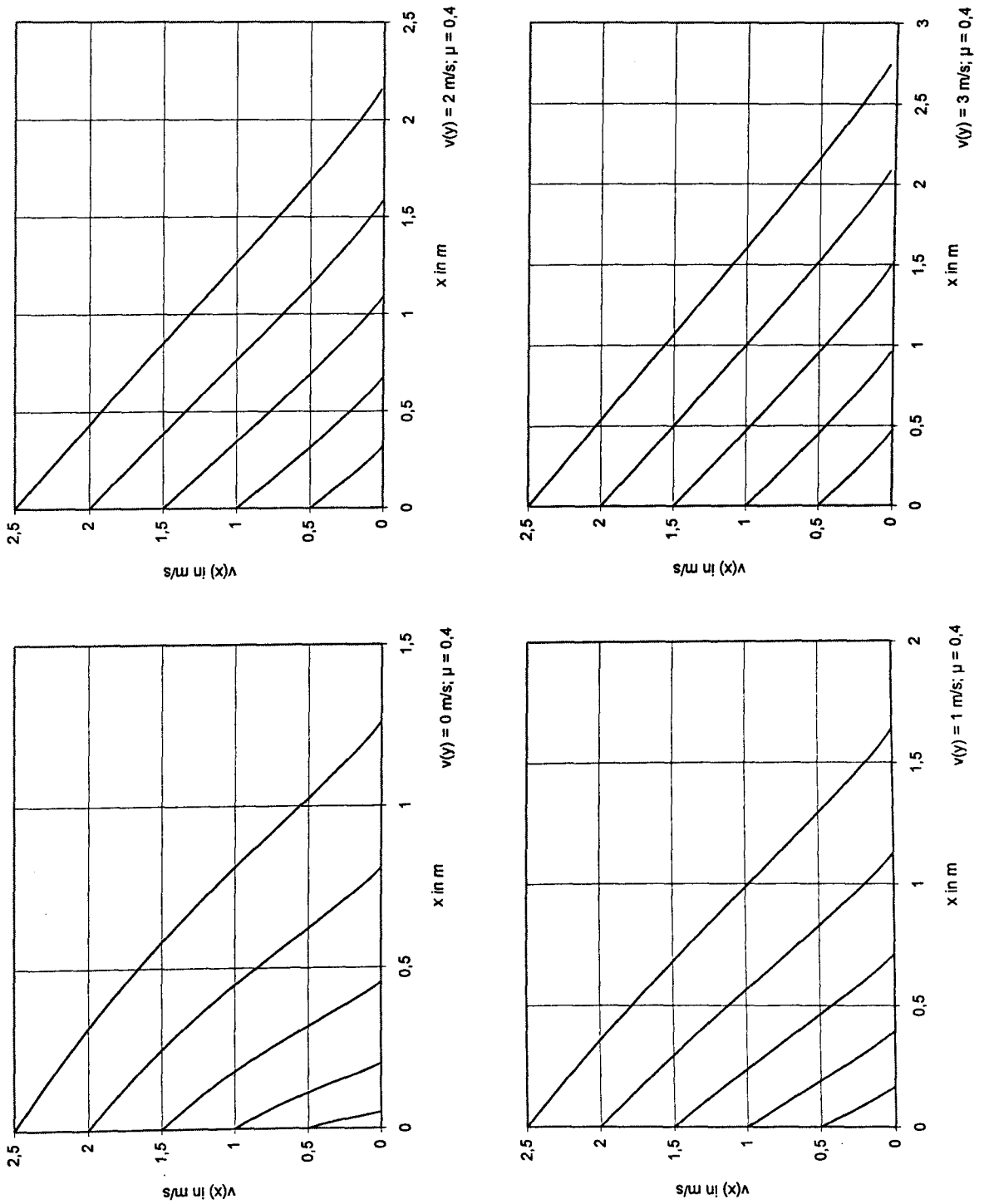
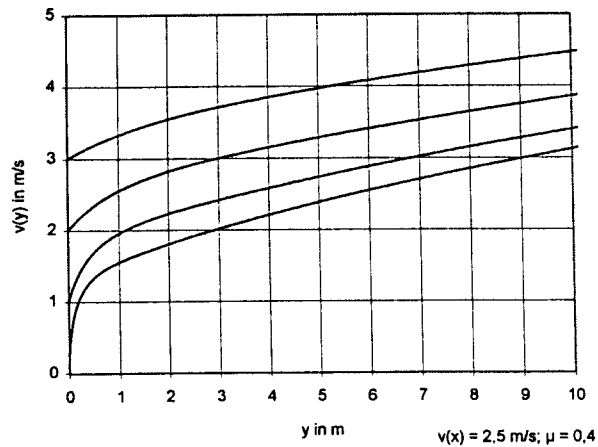
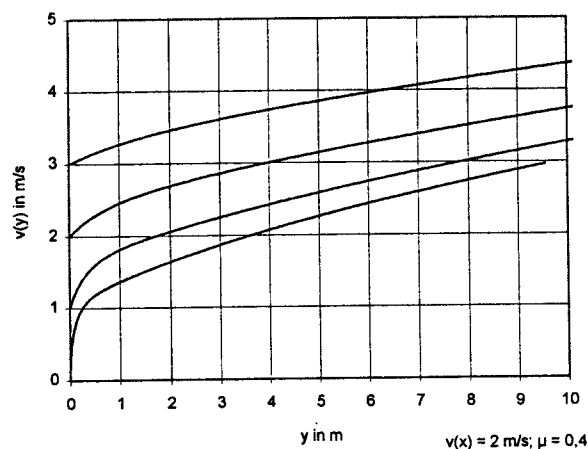
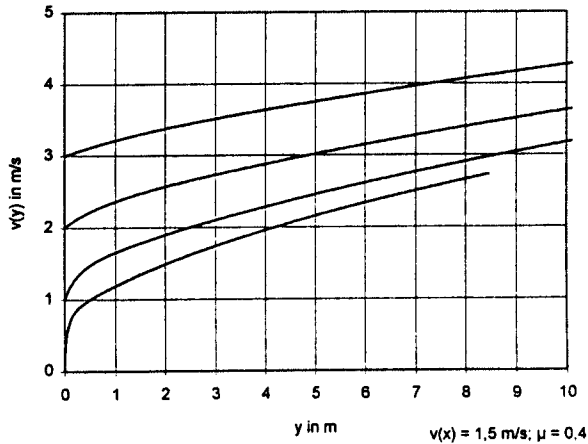
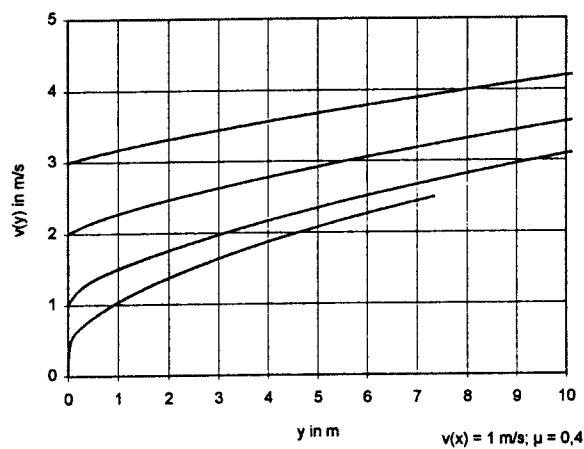
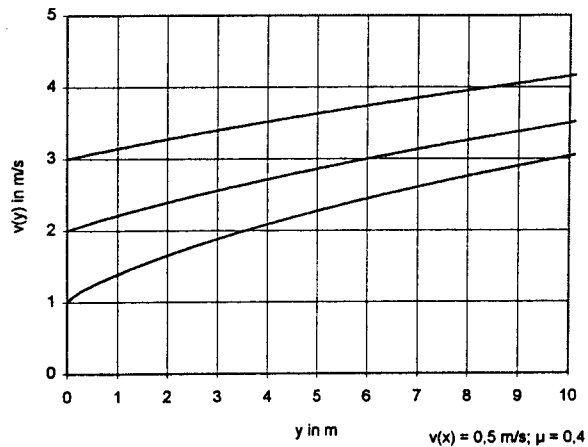
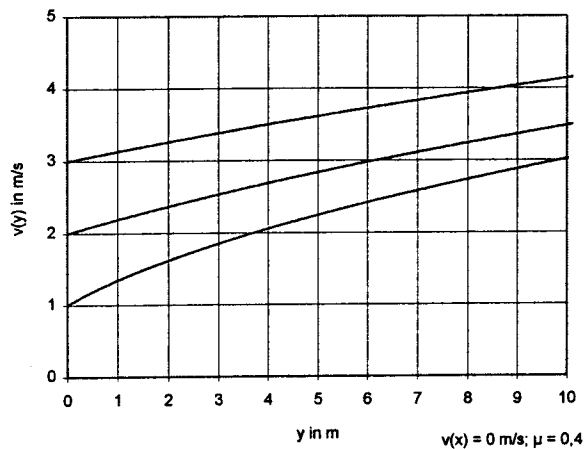


Abb. 5-9. Kennfelder $v(y)$ über y für verschiedene $v(x)$ Anfangsgeschwindigkeiten, $\mu = 0,4$ 

Lebenslauf:

Persönliche Daten:

Geb.-datum, -ort.: 5.4.1962 in Witten, NRW
Familienstand : verheiratet, ein Kind

Schul-Ausbildung und Tätigkeiten vor dem Studium:

September 1968 bis Juli 1972	Ev. Grundschule Ergste
September 1972 bis Mai 1981	Friedrich-Bährens Gymn. in Schwerte, Abitur
Juli 1981 bis Oktober 1982	Zivildienst
Oktober 1982 bis April 1983	Wirtschaftswissenschaften Uni Dortmund
Mai 1983 bis August 1983	Praktikum Maschinenbau Hoesch Hohenlimburg

Studium:

Oktober 1983 bis April 1990	Studium Maschinenbau Uni Dortmund, Abschluß Diplom-Ingenieur Maschinenbau Fachrichtung Materialflußtechnik
April 1986 bis April 1990	Student. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut in Dortmund

Beruf:

April 1990 bis November 1995	Wissenschaftlicher Angestellter am Fraunhofer-Institut für Materialfluß und Logistik in Dortmund
Dezember 1995 bis zur Zeit	Deutsche Postconsult GmbH, Bonn

Erklärung:

Hiermit versichere ich, daß die vorgelegte Arbeit von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, daß ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, durch Zitate als solche kenntlich gemacht habe.

Dortmund, 15. Juli 1996


(Thorsten Böcker)