

Untersuchung zur Mechanik
von Druckentlastungsklappen
und -deckeln beim
Entlastungsvorgang

F-05-9304

Projekt Nr. F-05-9304

Untersuchung zur Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln beim Entlastungsvorgang

Dirk Lorenz
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten
Bereich Prävention, Zentrallabor

Helmut Ott
Diplom-Ingenieur

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten
Bereich Prävention, Zentrallabor

Michael Seithel
Techniker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten
Bereich Prävention, Zentrallabor

Mannheim, Februar 1996

Danksagung

Unser Dank gilt den Kollegen der BGN-Versuchsstelle in Kappelrodeck (Schwarzwald), mit deren Hilfe die durchgeführte Versuchsreihe reibungslos und routiniert abgewickelt werden konnte. Besonders sei Herrn Bernhard Schmäzle für die unablässige Vor- und Nachbereitung der Staubvorratsflaschen gedankt, sowie Herrn Friedrich Kosebau für die Unterstützung bei der Arbeit mit der Messsoftware. Weiterhin sei Frau Melina Weiler unser Dank ausgesprochen für das Korrekturlesen des vorliegenden Textes.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Einleitung	2
1 Theoretische Untersuchungen	3
1.1 Mechanik einer Druckentlastungsklappe	3
1.1.1 Beschleunigung eines Massenelementes der Klappe	3
1.1.2 Radiale Krafteinwirkung auf das Klappengelenk	4
1.1.3 Tangentiale Krafteinwirkung auf das Klappengelenk	5
1.1.4 Bestimmung des Klappenschwerpunktes	6
1.1.5 Bestimmung des Trägheitsmomentes der Klappe	7
1.1.6 Bewegungsgleichung für eine Entlastungsklappe	8
1.1.7 Öffnungszeit einer Entlastungsklappe	9
1.2 Mechanik der Klappenfangvorrichtung	9
1.2.1 Rotationsenergie der Klappe	9
1.2.2 Bremskraft und -energie beim Klappenfangvorgang	10
1.2.3 Bremswinkel beim Klappenfangvorgang	10
1.3 Mechanik eines Druckentlastungsdeckels	11
1.3.1 Bewegungsgleichung eines Entlastungsdeckels	11
1.4 Mechanik der Deckelfangvorrichtung	11
1.4.1 Bewegungsenergie des Deckels	11
1.4.2 Bremskraft und -energie beim Deckelfangvorgang	12
1.4.3 Bremsweg beim Deckelfangvorgang	13
1.5 Theorie des Trümmerfluges	13
1.5.1 Eingangsbetrachtung	13
1.5.2 Idealisierte Flugbahnen	14
1.5.2.1 Schiefer Wurf ohne Reibung	14
1.5.2.2 Schiefer Wurf mit Stokes-Reibung	14

1.5.3	Numerische Lösung der Bewegungsgleichung für den schiefen Wurf mit Newton-Reibung	15
1.5.3.1	Schiefer Wurf mit Newton-Reibung ohne Luftbewegung	15
1.5.3.2	Schiefer Wurf mit Newton-Reibung und Luftbewegung	17
1.5.3.3	Schiefer Wurf mit Newton-Reibung und Luftbewegung für nicht kugelsymmetrische Körper	17
2	Experimentelle Untersuchungen	19
2.1	Eigenschaften der Druckentlastungsklappe	19
2.1.1	Bestimmung des Schwerpunktes	19
2.1.1.1	Messprinzip und Versuchsaufbau	19
2.1.1.2	Versuchsergebnisse und Auswertung	19
2.1.2	Bestimmung des Trägheitsmomentes	20
2.1.2.1	Versuchsaufbau	21
2.1.2.2	Versuchsergebnisse	22
2.1.2.3	Auswertung	22
2.2	Untersuchung am 9,4 Kubikmeter-Behälter	23
2.2.1	Messprinzip	23
2.2.2	Versuchsaufbau	24
2.2.2.1	Druckmessung	24
2.2.2.2	Winkel- und Beschleunigungsmessung	25
2.2.3	Versuchsdurchführung	25
2.2.4	Versuchsergebnisse	27
2.2.5	Auswertung	31
2.2.5.1	Kraftverhältnisse an der Entlastungsklappe	31
2.2.5.2	Rotationsenergie	38
2.2.5.3	Kraftverhältnisse am Bremsmechanismus	39
2.2.5.4	Entlastungsfähigkeit	43
2.2.6	Übertragung der Versuchsergebnisse auf Entlastungsdeckel	48
2.2.6.1	Deckelbeschleunigung	48
2.2.6.2	Kinetische Energie eines Druckentlastungsdeckels	48
2.2.6.3	Bremsweg eines Entlastungsdeckels	48
2.2.6.4	Maximale Kraft auf ein Fangseil eines Entlastungsdeckels	49
2.2.6.5	Ergebnisse der Abschätzung	49

3	Modellrechnung	51
3.1	Entlastungsklappendynamik	51
3.1.1	Klappenbeschleunigung	51
3.1.1.1	Beschleunigung einer runden Entlastungsklappe	51
3.1.1.2	Beschleunigung einer rechteckigen Entlastungsklappe	55
3.1.2	Scharnier- und Normalkraft	56
3.1.3	Rotationsenergie	57
3.1.4	Bremskraft und -drehmoment	57
3.1.5	Klappenflug	57
3.2	Entlastungsdeckeldynamik	58
3.2.1	Deckelbeschleunigung	58
3.2.1.1	Beschleunigung eines runden Entlastungsdeckels	58
3.2.1.2	Beschleunigung eines rechteckigen Entlastungsdeckels	60
3.2.2	Normalkraft	60
3.2.3	Bewegungsenergie	61
3.2.4	Bremskraft	61
3.2.5	Deckelflug	63
3.3	Zeitlicher Druckverlauf in druckentlasteten Behältern	64
4	Berechnungen und Zahlen	68
4.1	Berechnungen	68
4.1.1	Berechnung des Entlastungsklappenschwerpunktes	68
4.1.1.1	Klappenteile 1 und 2	68
4.1.1.2	Klappenteil 3	69
4.1.1.3	Klappenteile 4 und 5	70
4.1.1.4	Klappenteile 6 und 7	70
4.1.1.5	Klappenteil 8	70
4.1.1.6	Klappenteile 9 und 10	71
4.1.1.7	Klappenteil 11	72
4.1.1.8	Klappenteil 12	72
4.1.1.9	Klappenteile 13 bis 18	73
4.1.1.10	Klappenteile 19 und 20	73
4.1.2	Berechnung des Trägheitsmomentes der Klappe	75
4.1.2.1	Klappenteile 1 und 2	75
4.1.2.2	Klappenteil 3	76
4.1.2.3	Klappenteile 4 und 5	77
4.1.2.4	Klappenteile 6 und 7	77

4.1.2.5	Klappenteil 8	78
4.1.2.6	Klappenteile 9 und 10	79
4.1.2.7	Klappenteil 11	79
4.1.2.8	Klappenteil 12	80
4.1.2.9	Klappenteile 13 bis 18	80
4.1.2.10	Klappenteile 19 und 20	80
4.2	Zahlen, Maße und Rechenergebnisse	80
4.2.1	Abmessungen des Druckentlastungsdeckels	80
4.2.2	Physikalische Eigenschaften der Entlastungsklappe	81
5	Schalt- und Konstruktionspläne	82
6	Programme	86
	Literaturverzeichnis	127

Liste der Symbole

\vec{a}, a	Vektor und Betrag der linearen Beschleunigung, Variable oder Abmessung einer Seite einer rechteckigen Entlastungsklappe
\vec{a}_r, a_r	Vektor und Betrag der radialen Beschleunigung bei einer Kreisbewegung
\vec{a}_t, a_t	Vektor und Betrag der tangentialen Beschleunigung bei einer Kreisbewegung
a_E	Seite einer rechteckigen Entlastungsöffnung
A	Fläche bzw. Querschnittsfläche oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Entlastungsklappe
A_x	Kleinste Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
A_y	Größte Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
A_E	Entlastungsfläche
A_{EK}	Entlastungsfläche mit Berstfolie, die bei sonst gleichen Bedingungen den gleichen reduzierten Überdruck hervorruft, wie eine Entlastungsfläche mit Klappe
A_K	Fläche des kreisförmigen Teiles der im Versuch verwendeten Entlastungsklappe
A_S	Querschnittsfläche eines Drahtseiles
A_{EK}	Freigegebene Entlastungsfläche einer sich öffnenden Entlastungsklappe in Abhängigkeit der Zeit
A_{ED}	Freigegebene Entlastungsfläche eines sich öffnenden Entlastungsdeckels in Abhängigkeit der Zeit
b	Variable oder Abmessung einer Seite einer rechteckigen Entlastungsklappe
b_E	Seite einer rechteckigen Entlastungsöffnung
B	Abmessung an der im Versuch verwendeten Entlastungsklappe
c	Variable oder Proportionalitätskonstante
c_n	Reibungskoeffizient bei der Newton-Reibung
c_s	Reibungskoeffizient bei der Stokes-Reibung oder Staubkonzentration
c_x	Reibungskoeffizient der kleinsten Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
c_y	Reibungskoeffizient der größten Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
C	Integrationskonstante oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Klappe
\vec{D}, D	Vektor und Betrag des Drehmomentes oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Entlastungsklappe
D_b	Bremsendes Drehmoment auf eine Entlastungsklappe
D_g	Drehmoment aufgrund der Gleitreibungskraft im Entlastungsklappenscharnier
D_D	Durchmesser eines kreisförmigen Druckentlastungsdeckels
D_K	Durchmesser einer kreisförmigen Druckentlastungsklappe
D_S	Betrag des Entlastungsklappendrehmomentes bezüglich des Klappenscharniers
\vec{D}_{Ex}, D_{Ex}	Vektor und Betrag des Klappendrehmomentes aufgrund der Explosionswirkung

$D_{\text{Ex}}^{\text{dru}}$	Betrag des Klappendrehmomentes aufgrund der Druckwirkung einer Explosion innerhalb eines Silos
$D_{\text{Ex}}^{\text{rei}}$	Betrag des Klappendrehmomentes aufgrund der Reibungswirkung der durch eine Explosion aus einem Silo gepressten Gas/Staub-Gemisches
$\vec{D}_{\text{Gr}}, D_{\text{Gr}}$	Vektor und Betrag des Klappendrehmomentes aufgrund der Gravitation
$\vec{D}_{\text{LR}}, D_{\text{LR}}$	Vektor und Betrag des Klappendrehmomentes aufgrund des Luftwiderstandes
$\vec{D}_{\text{SR}}, D_{\text{SR}}$	Vektor und Betrag des Klappendrehmomentes aufgrund der Scharnierreibung
\vec{e}_r	Einheitsvektor in radialer Richtung bei der Kreisbewegung
\vec{e}_t	Einheitsvektor in tangentialer Richtung bei der Kreisbewegung
\vec{e}_x	Einheitsvektor in Richtung der x -Achse
\vec{e}_y	Einheitsvektor in Richtung der y -Achse
E	Elastizitätsmodul oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
E_{rot}	Rotationsenergie einer Druckentlastungsklappe
$E_{\text{b}}^{\text{rot}}$	Bremsarbeit beim Abfangen einer Entlastungsklappe
E_{kin}	Translationsenergie eines Druckentlastungsdeckels
$E_{\text{b}}^{\text{kin}}$	Bremsarbeit beim Abfangen eines Entlastungsdeckels
E_{rotmax}	Maximale Rotationsenergie einer Entlastungsklappe
EF	Entlastungsfähigkeit einer Druckentlastungsklappe relativ zu einer Berstfolie
f	Funktion oder geometrische Größe an der Entlastungsklappe
f_{p}	Quotient aus dem reduzierten Überdruck bei Anwesenheit einer Berstfolie und dem reduzierten Überdruck bei Anwesenheit einer Entlastungsklappe
f_x	Funktion, die sich auf die x -Komponente einer Differentialgleichung bezieht
f_y	Funktion, die sich auf die y -Komponente einer Differentialgleichung bezieht
f_{x_i}	Berechnungsfunktion der x -Komponente des vorläufigen i -ten Funktionswertes einer Differentialgleichung an einer gewissen Stelle nach Runge-Kutta
f_{y_i}	Berechnungsfunktion der y -Komponente des vorläufigen i -ten Funktionswertes einer Differentialgleichung an einer gewissen Stelle nach Runge-Kutta
\vec{F}, F	Vektor und Betrag der Kraft, relative Luftfeuchtigkeit oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Klappe
F_{g}	Betrag der am Klappenscharnier angreifenden resultierenden Kraft
F_{h}	Betrag der Kraft, die im Abstand h (Hebel) vom Klappenscharnier an einer Druckentlastungsklappe angreift
F_{r}	Betrag der radial auf ein Entlastungsklappenscharnier wirkenden Kraft
F_{t}	Betrag der tangential auf ein Entlastungsklappenscharnier wirkenden Kraft
$F_{\text{b}}^{\text{rot}}$	Betrag der Bremskraft beim Abfangen einer Druckentlastungsklappe
$F_{\text{b}}^{\text{kin}}$	Betrag der Bremskraft beim Abfangen eines Druckentlastungsdeckels
F_{B}	Betrag der Stoßkraft auf einen Klappenfangbügel beim Drehimpulsübertrag von einer Entlastungsklappe auf einen Klappenfangbügel
$\vec{F}_{\text{D}}, F_{\text{D}}$	Vektor und Betrag der resultierenden Kraft auf einen Entlastungsdeckel
F_{K}	Betrag der Reaktionskraft auf eine Entlastungsklappe beim Drehimpulsübertrag von einem Klappenfangbügel auf eine Entlastungsklappe
$\vec{F}_{\text{R}}, F_{\text{R}}$	Vektor und Betrag einer Reibungskraft
$\vec{F}_{\text{S}}, F_{\text{S}}$	Vektor und Betrag der resultierenden Kraft auf den Schwerpunkt einer Druckentlastungsklappe
$\vec{F}_{\text{Ex}}, F_{\text{Ex}}$	Vektor und Betrag der Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe bzw. eines Entlastungsdeckels aufgrund der Explosionswirkung
$\vec{F}_{\text{Gr}}, F_{\text{Gr}}$	Vektor und Betrag der Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe bzw.

	des Entlastungsdeckels aufgrund der Gravitation
\vec{F}_{LR}, F_{LR}	Vektor und Betrag der Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe bzw. des Entlastungsdeckel aufgrund des Luftwiderstandes
\vec{F}_{SR}, F_{SR}	Vektor und Betrag der Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe aufgrund der Scharnierreibung
$F_{N_{\max}}$	Betrag der maximalen Kraft, die in Richtung der Klappennormalen wirkt
$F_{S_{\max}}$	Betrag der maximalen Kraft, ausgeübt von der Klappe auf das Scharnier
\vec{F}_{Z_r}, F_{Z_r}	Vektor und Betrag der radialen Zwangskraft auf eine Entlastungsklappe
\vec{F}_{Z_t}, F_{Z_t}	Vektor und Betrag der tangentialen Zwangskraft auf eine Entlastungsklappe
g	Beschleunigung des Erdgravitationsfeldes
G	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
h	Diskretisierungsabstand beim Runge-Kutta-Lösungsverfahren, Stärke einer Druckentlastungsklappe, Länge eines Hebels oder Höhe über dem Erdboden
h_b	Hebel beim Abbremsen einer Druckentlastungsklappe
H	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
i	Index oder Parameter
I	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
j	Index
J	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
k	Federkonstante
k°	Winkelrichtgröße
k_x	Nach dem Runge-Kutta-Verfahren berechnete x -Komponente des Funktionswertes einer Differentialgleichung an einer bestimmten Stelle
k_y	Nach dem Runge-Kutta-Verfahren berechnete y -Komponente des Funktionswertes einer Differentialgleichung an einer bestimmten Stelle
k_{x_i}	x -Komponente des vorläufigen i -ten Funktionswertes einer Differentialgleichung an einer gewissen Stelle, berechnet nach dem Runge-Kutta-Verfahren
k_{y_i}	y -Komponente des vorläufigen i -ten Funktionswertes einer Differentialgleichung an einer gewissen Stelle, berechnet nach dem Runge-Kutta-Verfahren
K	Höhe einer Klappenkrempe oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
K_{St}	Staubspezifische Kenngröße zur Charakterisierung des maximalen Druckanstieges bei einer Staubexplosion in einem geschlossenen, kubischen Behälter
K_{St}^*	Simulierter K_{St} -Wert mittels einer experimentell ermittelten Zündverzögerungszeit
Kr	Breite des Randes einer Entlastungsklappe bzw. eines Entlastungsdeckels
l	Seillänge oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
l_b	Seildehnung beim Abfangen von Entlastungsdeckeln
\vec{L}, L	Vektor und Betrag des Drehimpulses
L_i	Betrag des Drehimpulses eines rotierenden Körpers i
m	Masse
m_i	i -tes Massenelement einer Massenverteilung
m_g	Gesamtmasse einer Entlastungsklappe plus deren Fangbügel
m_0	Masse im Silo nach Staubeintrag und vor Beginn des Ausströmvorganges
M	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
n	Elementanzahl einer Menge oder Abfangseilanzahl eines Entlastungsdeckels
N	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
\hat{N}	Tensor zur Beschreibung von Querschnittsflächen und Reibungskoeffizienten in Richtung der Koordinatenachsen bei einem frei fliegenden Körper

\vec{p}, p	Vektor und Betrag des linearen Impulses oder Druck
p_{dyn}	Dynamischer Ansprechdruck einer Druckentlastungseinrichtung
p_{max}	Maximaler Überdruck einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter
p_{red}	Maximaler Überdruck bei einer berstfolientlasteten Staubexplosion
p_{stat}	Statischer Ansprechdruck einer Druckentlastungseinrichtung
p_{redK}	Maximaler Überdruck bei einer klappenentlasteten Staubexplosion
p_{redmax}	Maximaler Überdruck einer entlasteten Staubexplosion bei optimalem Staub/Luft-Gemisch
$\left. \frac{dp}{dt} \right _{\text{max}}$	Maximaler zeitlicher Druckanstieg einer Staubexplosion bei optimalem Staub/Luft-Gemisch
P	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
P_a	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
P_e	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
Q	Widerstand einer Druckentlastungsklappe oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
\vec{r}, r	Ortsvektors und dessen Betrag
\vec{r}_S	Ortsvektor des Schwerpunktes einer Entlastungsklappe
\vec{r}_{S_i}, \vec{r}_i	Ortsvektor des Schwerpunktes eines i -ten Körpers
R	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe oder Wurzel des Korrelationskoeffizienten
R_k	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
R_K	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
S	Abstand zwischen Rotationsachse und Schwerpunkt bei einer Entlastungsklappe
t	Zeit
t_a	Zeitpunkt des Abfangbeginns eines Druckentlastungsdeckels bzw. einer Druckentlastungsklappe
t_f	Zeitpunkt des Klappenabrisses
t_0	Zeitpunkt des Beginns eines Vorgangens
T	Schwingungsperiode oder Temperatur
T_i	Dauer von i Schwingungen
U	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
\vec{v}, v	Vektor und Betrag der Geschwindigkeit
v_{Ex}	Anfangsgeschwindigkeit beim schiefen Wurf
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zwischen einer Entlastungsklappe bzw. eines Entlastungsdeckels und der aus dem Silo ausströmenden Materie
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit in horizontaler Richtung
V	Volumen
W	Flugweite beim schiefen Wurf
x, \dot{x}, \ddot{x}	x -Komponente des Ortsvektors, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung
x_0, \dot{x}_0	x -Komponente des Ortsvektors und der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$.
$x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$	x -Komponente der Anfangsbedingung vom Ortsvektor, von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung beim i -ten Rechnungsschritt zur numerischen Lösung einer Differentialgleichung nach Runge-Kutta
y, \dot{y}, \ddot{y}	y -Komponente des Ortsvektors, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung
y_0, \dot{y}_0	y -Komponente des Ortsvektors und der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$.
$y_i, \dot{y}_i, \ddot{y}_i$	y -Komponente der Anfangsbedingung vom Ortsvektor, von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung beim i -ten Rechnungsschritt zur numerischen Lösung einer Differentialgleichung nach Runge-Kutta
z, \dot{z}, \ddot{z}	z -Komponente des Ortsvektors, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung

α	Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
β	Winkel zwischen der großen Fläche einer frei fliegenden Platte und der Horizontalen oder Dämpfungskonstante bei der Schwingung
δ	Phasenverschiebung bei der Schwingung
$\vec{\varepsilon}, \varepsilon$	Vektor und Betrag der Winkelbeschleunigung
ζ	Integrationsvariable
η	Viskosität
λ	Proportionalitätskonstante oder Abklingkonstante bei der gedämpften Schwingung
ξ	Integrationsvariable oder Geschwindigkeitsbeiwert
π	Die Zahl 3,141592...
ρ	Dichte
ρ_1	Dichte der Luft
ρ_s	Materiedichte im Silo
ρ_0	Materiedichte im Silo am Zündzeitpunkt
σ	Standardabweichung
$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$	Klappenöffnungswinkel, -winkelgeschwindigkeit und -winkelbeschleunigung oder Startwinkel beim Trümmerflug
φ_0	Amplitude der ungedämpften Schwingung
φ_a	Klappenöffnungswinkel beim Aufschlag einer Entlastungsklappe auf einen Klappenfangbügel
φ_b	Klappenöffnungswinkel beim Abfangvorgang einer Entlastungsklappe
$\varphi_{b_{\max}}$	Maximaler Klappenöffnungswinkel beim Klappenabfangvorgang
χ	Seitenverhältnis einer rechteckigen Druckentlastungskappe
$\vec{\omega}, \omega$	Vektor und Betrag der Klappenwinkelgeschwindigkeit
Δ	Schwankungsbreite einer Größe
Θ	Trägheitsmoment
Θ_g	Gesamtes Trägheitsmoment mehrerer Klappenfangbügel bei am Bügelrand liegender Rotationsachse
Θ_B	Trägheitsmoment eines Entlastungsklappenfangbügels bei am Bügelrand liegender Rotationsachse
Θ_K	Trägheitsmoment einer Entlastungsklappe bei am Klappenrand liegender Rotationsachse
Θ_S	Trägheitsmoment einer Entlastungsklappe bei durch den Schwerpunkt laufender Rotationsachse

Zusammenfassung

Gepriift an experimentellen Daten¹ wird eine Modellrechnung hergeleitet, die vor allem der Abschätzung von Lager- bzw. Halterungskraften an Druckentlastungsklappen bzw. -deckeln im Explosionsfall dient. Dabei wird aus grundlegenden physikalischen Eigenschaften der verwendeten Entlastungsklappe (Trägheitsmoment, Klappenfläche, Klappenschwerpunkt) bzw. des verwendeten Entlastungsdeckels (Deckelfläche, Deckelmasse) und weiteren Randbedingungen wie Silovolumen, staubspezifische Konstante, statischer Ansprechdruck des Entlastungselementes und Fläche der Entlastungsöffnung zunächst der erwartete reduzierte Überdruck im Silo und der zeitliche Druckanstieg abgeschätzt. Damit wird der zeitliche Druckverlauf $p(t)$ einer entsprechenden Staubexplosion im Silo simuliert. Mit der Funktion $p(t)$ wird die Bewegungsgleichung einer sich öffnenden Entlastungsklappe bzw. eines sich öffnenden Entlastungsdeckels numerisch gelöst, d. h. Winkelbeschleunigung $\ddot{\varphi}(t)$, -geschwindigkeit $\dot{\varphi}(t)$ und Klappenöffnungswinkel $\varphi(t)$ bzw. Deckelbeschleunigung $\ddot{r}(t)$, -geschwindigkeit $\dot{r}(t)$ und Deckelort $r(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t errechnet. Aus diesen Funktionen werden alle sicherheitstechnisch relevanten Kräfte bei der Druckentlastung über Klappen bzw. Deckel abgeleitet.

Abhängig von den Randbedingungen und Eigenschaften der Entlastungsklappen bzw. -deckel bietet eingangs beschriebene Berechnungsmethode eine Entscheidungsmöglichkeit dafür, ob die vorhandenen Sicherungsmaßnahmen gegen Abriss der Entlastungselemente ausreichend sind. Im Falle abreißender Klappen- bzw. Deckel liefert die Rechnung die Anfangsbedingungen (Startwinkel, Startgeschwindigkeit) für eine ebenfalls numerische Berechnung von Flugbahnen abgerissener Entlastungselemente. Das für diese Zwecke entwickelte Rechner-Programm ist in Kapitel 6 komplett abgedruckt.

Mit der oben erwähnten Abschätzung des zu erwartenden reduzierten Explosionüberdruckes in Anwesenheit einer Entlastungsklappe bzw. eines -deckels wird eine Vorausberechnung von Klappen- und Deckelentlastungsfähigkeiten möglich. Eine Berechnungsmethode auf der Grundlage der VDI-Richtlinie 3673 wird dargestellt. Eine ausführliche Diskussion dieser Methode schließt sich an, da die Resultate der Abschätzung zum Teil im Widerspruch mit den Ergebnissen von [7] stehen, sich aber andererseits mit den Ergebnissen von [6], [8] und [15] decken.

Abschließend wird eine, voraussichtlich schnell öffnende Entlastungskonstruktionen vorgestellt, wobei die gezeigte Abbildung keine Konstruktionszeichnung im eigentlichen Sinne, sondern eine schematisierte Rechner-Grafik ist.

¹Diese Daten wurden einerseits durch gezielte Experimente im Zusammenhang mit dieser Untersuchung auf dem BGN-Versuchsgelände in Kappelrodeck (Schwarzwald) und andererseits im Laufe der letzten Jahre während diverser Entlastungsklappenprüfungen ebendort gewonnen.

Einleitung

Um zerstörerische Druckanstiege in Silos und ähnlichen Behältern im Falle einer Staubexplosion zu vermeiden, werden in diese Druckentlastungsbereiche eingebaut. Das sind Aussparungen in der Behälterwand, die mit geeigneten Vorrichtungen verschlossen werden und sich nur im Fall des Überschreitens eines bestimmten Druckwertes innerhalb des Behälters öffnen, um dem weiteren Druckanstieg entgegenzuwirken.

In der Praxis werden teilweise konstruktiv sehr einfache Druckentlastungsvorrichtungen verwendet, die in der Regel zwar den Behälter zu schützen vermögen, nicht jedoch die nähere Umgebung des Behälters. Häufig werden solche Druckentlastungseinrichtungen durch eine oder mehrere Metall- oder Betonplatten verwirklicht, die mit Seilen oder Ketten am Behälter verankert sind. Weil diese Seile bzw. Ketten bezüglich ihrer Belastbarkeit oft unterdimensioniert sind, besteht im Explosionsfall die Gefahr von reißenden Deckelverankerungen und dadurch fortgeschleuderten Entlastungsdeckeln.

Ein schweres Unglück dieser Art aus der jüngeren Vergangenheit war der Anlass dafür, die im Entlastungsfall auftretenden Kräfte in den Verankerungen der Druckentlastungsdeckel experimentell zu untersuchen. Auf dem Versuchsgelände der BGN in Kappelrodeck (Schwarzwald) wurde ein Forschungsprojekt [1] durchgeführt, dessen Gegenstand die Absprengung von Druckentlastungsdeckeln von Silo-Behältern unter verschiedenen Bedingungen war. Die Entlastungsdeckel wurden dazu mit Stahlseilen über Kraftmessdosen am Silo verankert, so dass die von den Sicherungsseilen auf den Deckel ausgeübte Bremskraft nach der Deckelabsprengung direkt als Funktion der Zeit gemessen werden konnte. Dabei wurden Kräfte bis zu einigen 100 kN gemessen, was zur Folge hatte, dass die verwendete Mechanik und Messtechnik am Rande oder über dem oberen Grenzbereich ihrer Belastbarkeit arbeitete. Deshalb mussten neue Wege der experimentellen Untersuchung gesucht werden, um verlässliche und möglichst allgemein gültige Informationen über die Dimensionierung von Klappen- und Deckelhalterungen gewinnen zu können. Als Folge daraus wurde das Konzept des Forschungsprojektes überarbeitet und die Fragestellung erweitert. Das Ergebnis ist diese Studie, die sich theoretisch und experimentell mit der Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln auseinandersetzt. Klappen sind dabei einseitig durch ein Scharnier, Deckel durch mehrere Seile am zu entlastenden Behälter befestigt. Mit dem Begriff Mechanik sind hier im wesentlichen die zeitlichen Kraftverläufe an den Klappen- und Deckelverankerungen gemeint.

Die wichtigste Erweiterung der Fragestellung des ursprünglichen Forschungsprojektes [1] war die Frage nach den erreichbaren Flugweiten fortgeschleudelter Entlastungsklappen, Entlastungsdeckel und Trümmerteile aufgrund von Staubexplosionen in Silo-Behältern. Dieser Teilaspekt konnte nur mit Hilfe numerischer Simulationsrechnungen untersucht werden, da die Möglichkeiten großräumiger Trümmerflugexperimente auf dem BGN-Versuchsfeld nicht gegeben sind.

Kapitel 1

Theoretische Untersuchungen

1.1 Mechanik einer Druckentlastungsklappe

Liegt eine Metallplatte auf der Druckentlastungsöffnung eines beliebigen Behälters und ist diese einseitig mittels eines Gelenkes am Behälter fixiert, so wird ein schneller, ausreichend heftiger Druckanstieg ein Aufschlagen der Klappe bewirken. Ist das Führungsgelenk der auftretenden Belastung gewachsen, so wird die Bewegung aller infinitesimalen Massenelemente dm der Klappe ein Ausschnitt einer Kreisbahn sein. Im allgemeinen ist die Kreisbewegung nicht gleichförmig, so dass tangentielle und radiale Beschleunigungen auftreten. In Abbildung 1.1 ist der Öffnungsvorgang der Klappe schematisch dargestellt. Ist die Funktion $\varphi(t)$ bekannt, so können alle auftretenden Klappenkräfte als Funktion der Zeit berechnet werden.

1.1.1 Beschleunigung eines Massenelementes der Klappe

Wie aus Abbildung 1.1 zu ersehen ist, gelten für die Koordinaten eines Massenelementes dm die Beziehungen (in Zylinderkoordinaten)

$$x(t) = r \cdot \cos \varphi(t) \quad y(t) = r \cdot \sin \varphi(t) \quad z(t) = z \quad (1.1)$$

Um die Beschleunigung eines beliebigen Massenelementes der Entlastungsklappe zu berechnen, muss die zweite zeitliche Ableitung des Ortsvektors

$$\vec{r}(t) = (r \cdot \cos \varphi(t), r \cdot \sin \varphi(t), z) \quad (1.2)$$

vom Massenelement dm gebildet werden. Es ergibt sich folglich

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r \cdot (\cos \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) + \sin \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t)) \\ -r \cdot (\sin \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) - \cos \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t)) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Um die tangentielle und radiale Komponente dieser Beschleunigung zu berechnen, muss \vec{a} mit den Einheitsvektoren in diese Richtungen skalar multipliziert werden. Es ergibt sich für die radiale Komponente

$$a_r(t) = \vec{a}(t) \cdot \vec{e}_r(t) = \begin{pmatrix} -r \cdot (\cos \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) + \sin \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t)), \\ -r \cdot (\sin \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) - \cos \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t)) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot (\cos \varphi(t), \sin \varphi(t)) \\
& = -r \cdot \cos^2 \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) - r \cdot \sin \varphi(t) \cdot \cos \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t) \\
& \quad - r \cdot \sin^2 \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) + r \cdot \cos \varphi(t) \cdot \sin \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t) \\
& = -r \cdot \dot{\varphi}^2(t) \cdot (\cos^2 \varphi(t) + \sin^2 \varphi(t)) \\
a_r(t) & = -r \cdot \dot{\varphi}^2(t) = -r \cdot \omega^2(t) \\
\Rightarrow \vec{a}_r(t) & = \left(-r \cdot \omega^2(t) \cdot \cos \varphi(t), -r \cdot \omega^2(t) \cdot \sin \varphi(t) \right) \tag{1.4}
\end{aligned}$$

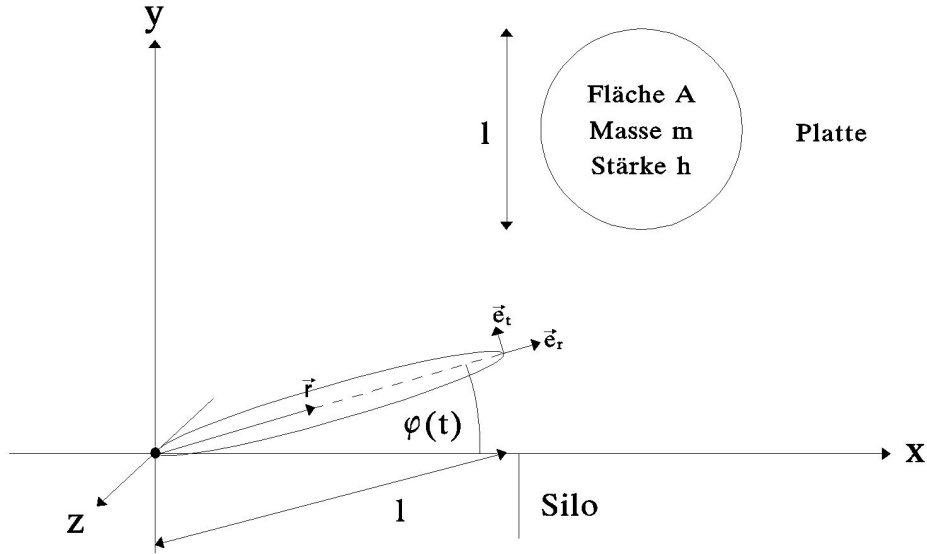


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung einer Druckentlastungsklappe.

Für die tangentielle Komponente errechnet sich

$$\begin{aligned}
a_t(t) = \vec{a}(t) \cdot \vec{e}_t(t) & = \left(-r \cdot (\cos \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) + \sin \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t)), \right. \\
& \quad \left. -r \cdot (\sin \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) - \cos \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t)) \right) \\
& \quad \cdot (-\sin \varphi(t), \cos \varphi(t)) \\
& = r \cdot \sin \varphi(t) \cdot \cos \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) + r \cdot \sin^2 \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t) \\
& \quad - r \cdot \cos \varphi(t) \cdot \sin \varphi(t) \cdot \dot{\varphi}^2(t) + r \cdot \cos^2 \varphi(t) \cdot \ddot{\varphi}(t) \\
& = r \cdot \ddot{\varphi}(t) \cdot (\cos^2 \varphi(t) + \sin^2 \varphi(t)) \\
a_t(t) & = r \cdot \ddot{\varphi}(t) = r \cdot \varepsilon(t) \\
\Rightarrow \vec{a}_t(t) & = (-r \cdot \varepsilon(t) \cdot \sin \varphi(t), r \cdot \varepsilon(t) \cdot \cos \varphi(t)) \tag{1.5}
\end{aligned}$$

1.1.2 Radiale Krafteinwirkung auf das Klappengelenk

Die radiale Kraft auf das Klappenscharnier ist dem Betrag nach gleich der Zentripetalkraft, die alle Massenelemente der Klappe auf eine Kreisbahn zwingt (radiale Zwangskraft). Die Zentripetalkraft ist für ein Massenelement gegeben durch

$$d\vec{F}_{Z_r}(r, t) = \vec{a}_r(r, t) \cdot dm = \vec{a}_r(r, t) \cdot \rho(r) \cdot dV \tag{1.6}$$

mit $\rho(r)$ als die im allgemeinen ortsabhängigen Dichte der Klappe. Der Vektor der radialen Zwangskraft, welche das Klappenscharnier auf die Klappe ausübt, ergibt sich nun aus (1.6), indem für $\vec{a}_r(r, t)$ die radiale Beschleunigung aus (1.4) eingesetzt und anschließend über das Volumen der Klappe integriert wird. Die Durchführung der Integration liefert als Zentripetalkraft des Scharnieres auf die Klappe

$$\vec{F}_{Z_r}(t) = \left(-m \cdot S \cdot \omega^2(t) \cdot \cos \varphi(t), -m \cdot S \cdot \omega^2(t) \cdot \sin \varphi(t) \right) \quad (1.7)$$

mit m als Klappenmasse, $\omega(t)$ als zeitabhängige Winkelgeschwindigkeit und S als dem Abstand zwischen Drehachse und Schwerpunkt der Klappe. Aus (1.7) folgt als Betrag für die radiale Kraft auf das Scharnier

$$F_r(t) = m \cdot S \cdot \omega^2(t) \quad (1.8)$$

Zur Veranschaulichung des Vektors der radialen Scharnierkraft siehe Abbildung 1.4. Die Bestimmung des Klappenschwerpunktes S ist in den Abschnitten 1.1.4 und 2.1.1 dargestellt.

1.1.3 Tangentiale Krafteinwirkung auf das Klappengelenk

Zur Berechnung der tangentialen Zwangskraft auf das Klappenscharnier wird zunächst der Ausdruck für das Drehmoment eines Massenelementes dm der Entlastungsklappe integriert, wobei sich das Integral wieder über das Klappenvolumen erstreckt.

$$D_S(t) = \int a_t(t) \cdot \rho \cdot r \, dV = \varepsilon(t) \cdot \int \rho \cdot r^2 \, dV = \Theta_K \cdot \varepsilon(t) \quad (1.9)$$

Hier ist Θ_K das Trägheitsmoment der Klappe bezüglich der Scharnierachse. Die Lösung des Integrals in (1.9) ergibt sich aus (1.19). Mit Hilfe des aus der Mechanik der starren Körper bekannten Zusammenhangs

$$\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F} = \Theta \cdot \vec{\varepsilon} \quad (1.10)$$

folgt aus (1.9) für den Betrag der Winkelbeschleunigung der Entlastungsklappe

$$\varepsilon(t) = \frac{D_S(t)}{\Theta_K} = \frac{F_S(t) \cdot S}{\Theta_K} \quad (1.11)$$

F_S ist die im Klappenschwerpunkt angreifende Normalkraft. Andererseits ergibt sich aus dem schwerpunktbezogenen Drehmoment, welches die gesuchte tangentielle Zwangskraft ausübt, die Winkelbeschleunigung

$$\varepsilon(t) = \frac{F_{Z_t}(t) \cdot S}{\Theta_S} \quad (1.12)$$

Da die Winkelbeschleunigung $\varepsilon(t)$ in den Gleichungen (1.11) und (1.12) gleich sein muss, folgt durch Gleichsetzen beider Gleichungen die gesuchte tangentielle Zwangskraft.

$$\frac{F_{Z_t}(t) \cdot S}{\Theta_S} = \frac{F_S(t) \cdot S}{\Theta_K} \quad \Rightarrow \quad F_{Z_t}(t) = \frac{\Theta_S}{\Theta_K} \cdot F_S(t) \quad (1.13)$$

Damit ergibt sich für den Vektor der tangentialen Zwangskraft

$$\vec{F}_{Z_t} = \left(\frac{\Theta_S}{\Theta_K} \cdot F_S(t) \cdot \sin \varphi(t), -\frac{\Theta_S}{\Theta_K} \cdot F_S(t) \cdot \cos \varphi(t) \right) \quad (1.14)$$

Die tangentielle Kraft auf das Klappenscharnier ist dem Betrag nach gleich der tangentialen Zwangskraft, somit also

$$F_t(t) = \frac{\Theta_S}{\Theta_K} \cdot F_S(t) = \frac{\Theta_S}{S} \cdot \varepsilon(t) \quad (1.15)$$

Zur Veranschaulichung des Vektors der tangentialen Scharnierkraft siehe Abbildung 1.4. Die Bestimmung der Klappenträgheitsmomente ist in den Abschnitten 1.1.5 und 2.1.2 dargestellt.

1.1.4 Bestimmung des Klappenschwerpunktes

Um die Lagerkräfte mit Hilfe von (1.8) und (1.15) berechnen zu können, müssen die Koordinaten des Schwerpunktes der verwendeten Druckentlastungsklappe bestimmt werden.

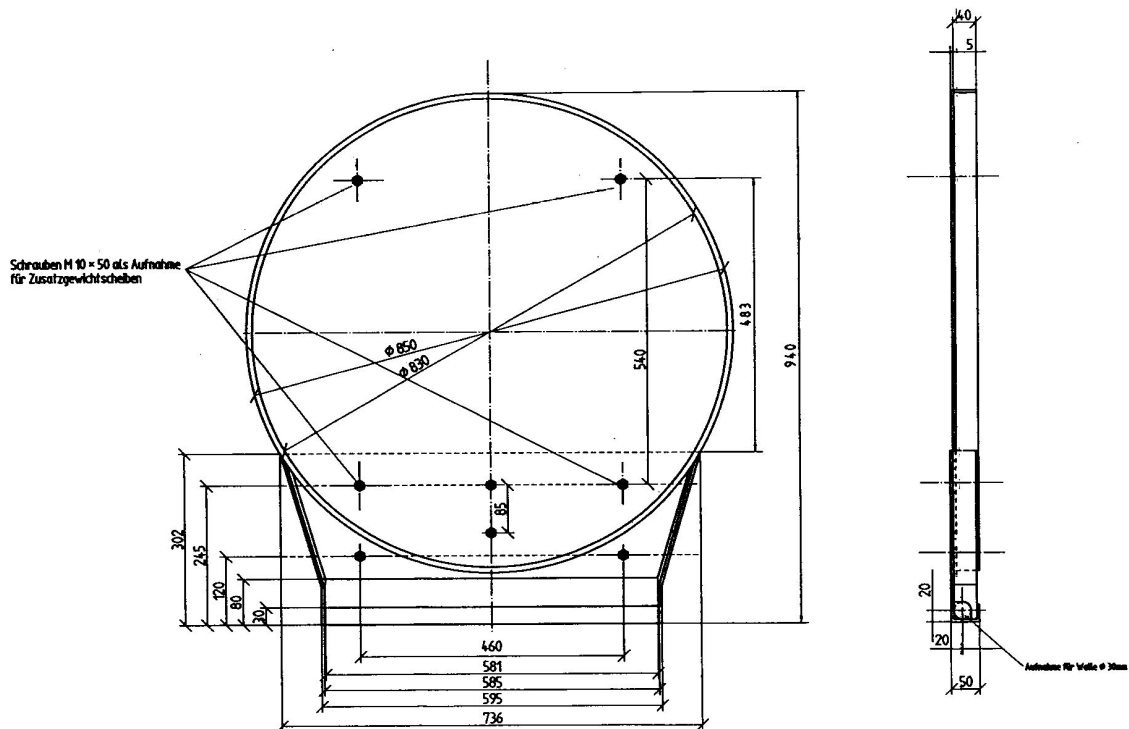


Abbildung 1.2: Konstruktionszeichnung [Firma Silo-Thorwesten] der von uns verwendeten Druckentlastungsklappe. Die Frontalansicht zeigt die Unterseite der Klappe; bei der Seitenansicht ist rechts die Unterseite.

Form und Aufbau der von uns verwendeten Druckentlastungsklappe können aus Abbildung 1.2 entnommen werden. Um die Schwerpunktskoordinaten zu berechnen, müssen die Integrale über das Klappenvolumen

$$\vec{r}_S = \frac{\int \rho \cdot \vec{r} dV}{\int \rho dV} \quad (1.16)$$

in (1.16) gelöst werden. Das geschieht am einfachsten in der Weise, dass die Entlastungsklappe in n einfachere geometrische Körper zerlegt und anschließend der Ort des Schwerpunktes \vec{r}_S gemäß

$$\vec{r}_S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_{S_i}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1.17)$$

berechnet wird. Die m_i bzw. die \vec{r}_{S_i} sind dabei die Massen bzw. die Schwerpunktskoordinaten der Einzelkörper.

Die Durchführung dieser sehr umfangreichen Berechnungen, die in Abschnitt 4.1.1 detailliert dargestellt sind, liefert als Ort des Schwerpunktes (Angaben in mm)

$$\vec{r}_S = \begin{pmatrix} 389,7 \\ 7,5 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

Das S in (1.8) und (1.15) nimmt daher den Wert $S = \sqrt{389,7^2 + 7,5^2} = 389,8 \approx 390$ mm an. Diese Koordinaten und Zahlenangaben beziehen auf das in Abbildung 1.3 gezeigte Koordinatensystem, in dem die Drehachse mit der z -Achse zusammenfällt.

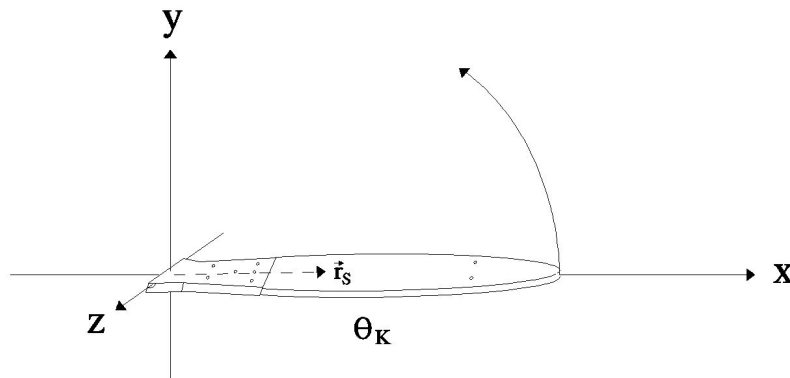


Abbildung 1.3: Skizze der Entlastungsklappe im Koordinatensystem, in welchem auch die Drehbewegung beschrieben wird. \vec{r}_S und Θ_K sind der Ort des Schwerpunktes und das Trägheitsmoment der Klappe bezüglich der Drehachse.

1.1.5 Bestimmung des Trägheitsmomentes der Klappe

Eine Schwierigkeit beim praktischen Umgang mit (1.10) liegt in der Bestimmung von Θ . Ähnlich wie bei der Berechnung des Klappenschwerpunktes hat man es mit mehr oder weniger komplizierten Integralen über das Klappenvolumen zu tun.

$$\Theta = \int \rho \cdot r^2 dV \quad (1.19)$$

Analog zur Berechnung des Klappenschwerpunktes kann das Trägheitsmoment der Klappe bestimmt werden, indem die Klappe in geometrisch einfachere Körper zerlegt und anschließend über die berechneten Einzelmomente summiert wird.

$$\Theta_K = \sum_{i=1}^n \Theta_i \quad (1.20)$$

Die ebenfalls in Kapitel 4 ausgeführte Berechnung liefert für das Trägheitsmoment der Entlastungsklappe den Wert

$$\Theta_K = 3,325 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (1.21)$$

1.1.6 Bewegungsgleichung für eine Entlastungsklappe

Das resultierende Drehmoment auf eine Druckentlastungsklappe während des Entlastungsvorganges setzt sich aus den vier nicht vernachlässigbaren Drehmomenten aufgrund der Explosionsüberdruckkraft $\vec{D}_{\text{Ex}}(t)$, des Luftreibungswiderstandes $\vec{D}_{\text{LR}}(t)$, der Reibungskraft im Scharnier \vec{D}_{SR} und der Gravitationskraft $\vec{D}_{\text{Gr}}(t)$ zusammen. Wenn die Scharnier-Drehachse der Entlastungsklappe parallel zur Richtung der Erdgravitation ausgerichtet ist, so entfällt das Gravitationsdrehmoment.

Für den Fall, dass Klappe und Gelenkachse senkrecht zur Richtung der Schwerkraft positioniert sind, werden die Verhältnisse relativ einfach, wie Abbildung 1.4 demonstriert. Die das Drehmoment der Klappe verursachenden Kräfte sollen gemäß Abbildung 1.4 am Ort des Schwerpunktes angreifen, womit sich als Hebel der Vektor \vec{r}_S ergibt. Es folgt für die Bewegungsgleichung der Entlastungsklappe

$$\begin{aligned} \vec{D}(t) &= \vec{D}_{\text{Ex}}(t) + \vec{D}_{\text{Gr}}(t) + \vec{D}_{\text{LR}}(t) + \vec{D}_{\text{SR}} \\ \Rightarrow \varepsilon(t) &= \frac{1}{\Theta_K} \cdot \left(D_{\text{Ex}}(t) + D_{\text{Gr}}(t) + D_{\text{LR}}(t) + D_{\text{SR}} \right) \\ \Rightarrow \varepsilon(t) &= \frac{S}{\Theta_K} \cdot \left((F_{\text{Ex}}(t) + F_{\text{Gr}}) \cdot \cos \varphi(t) + F_{\text{LR}}(t) + F_{\text{SR}} \right) = \frac{S}{\Theta_K} \cdot F_N(t) \quad (1.22) \end{aligned}$$

Wie die Kräfte in (1.22) im einzelnen aussehen, ist in Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Die Bestimmung der Scharnierreibungskraft F_{SR} geschieht experimentell, indem für die frei zufallende Klappe die Funktion $\varphi(t)$ aufgenommen wird. Ein Vergleich mit theoretisch berechneten $\varphi(t)$ -Funktionen liefert dann F_{SR} .

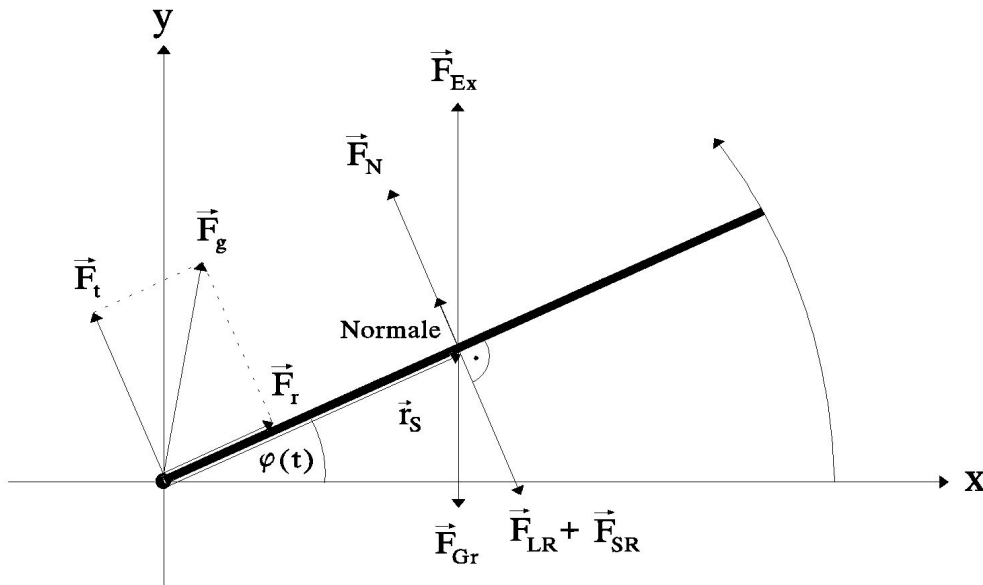


Abbildung 1.4: Skizze der an Schwerpunkt und Scharnier einer Druckentlastungsklappe angreifenden Kräfte während des Öffnungsvorganges. Die Rotationsachse steht senkrecht zur Richtung der Gravitation. Die Normalkraft $\vec{F}_N(t)$ ist die Resultierende in Normalenrichtung.

1.1.7 Öffnungszeit einer Entlastungsklappe

Um eine gute Druckentlastung im Explosionsfall zu erreichen, muss sich die Entlastungsklappe möglichst schnell nach Beginn des Druckanstieges öffnen. Diese Forderung ist äquivalent mit der durch konstruktive Maßnahmen erzielte Maximierung der Winkelbeschleunigung $\varepsilon(t)$. Aus (1.11) geht hervor, dass bei gegebener Kraft $\varepsilon(t) \propto S$ und $\varepsilon(t) \propto \Theta_K^{-1}$ ist. Weil Θ_K quadratisch, S aber nur linear mit zunehmender Klappenabmessung von der Drehachse wächst, wird die Abhängigkeit zwischen $\varepsilon(t)$ und der maximalen Klappenabmessung von der Drehachse durch eine Hyperbel beschrieben. Abbildung 1.5 demonstriert diesen Sachverhalt am Beispiel einer rechteckigen Druckentlastungsklappe.

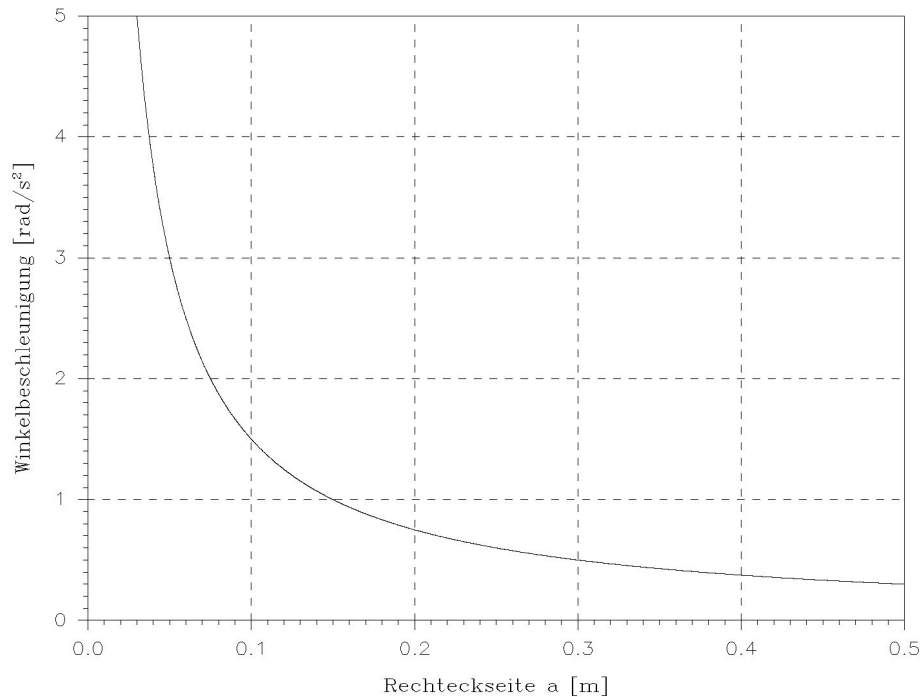


Abbildung 1.5: $\varepsilon(t)$ als Funktion der Seite a (a steht senkrecht auf der Drehachse) einer rechteckigen Entlastungsklappe der Fläche $A_E = a \cdot b$ bei konstanter angreifender Kraft. Aus $\Theta_K = \frac{m \cdot a^2}{3}$, $S = \frac{a}{2}$ und (1.11) folgt $\varepsilon(t) = \frac{3}{2 \cdot m \cdot a}$. Die Klappenmasse ist hier mit $m = 10$ kg angesetzt.

1.2 Mechanik der Klappenfangvorrichtung

1.2.1 Rotationsenergie der Klappe

Ganz analog zur Definition der kinetischen Energie des Massenpunktes ergibt sich die Rotationsenergie der sich öffnenden Druckentlastungsklappe zu

$$E_{\text{rot}}(t) = \frac{1}{2} \cdot \Theta_K \cdot \omega^2(t) \quad (1.23)$$

Diese Energie muss durch eine geeignete Vorrichtung dissipiert werden, damit an Klappen- und Silokonstruktion, sowie in deren näherer Umgebung kein größerer Schaden entstehen kann.

1.2.2 Bremskraft und -energie beim Klappenfangvorgang

Die Rotationsenergie der Entlastungsklappe muss durch eine gleichgroße Bremsarbeit dissipiert werden. Weil diese Arbeit das Integral über das Produkt aus Winkelrichtgröße k° und Bremswinkel $\varphi_b(t)$ ist, folgt, dass das Bremsdrehmoment umso größer sein muss je kleiner der maximale Bremswinkel $\varphi_{b\max}$ ist und umgekehrt. In der Praxis wird die Klappenbremsung oft durch Konstruktionen mit Federn bewirkt. In Abbildung 1.6 ist solch ein Abbremsungsvorgang schematisiert dargestellt.

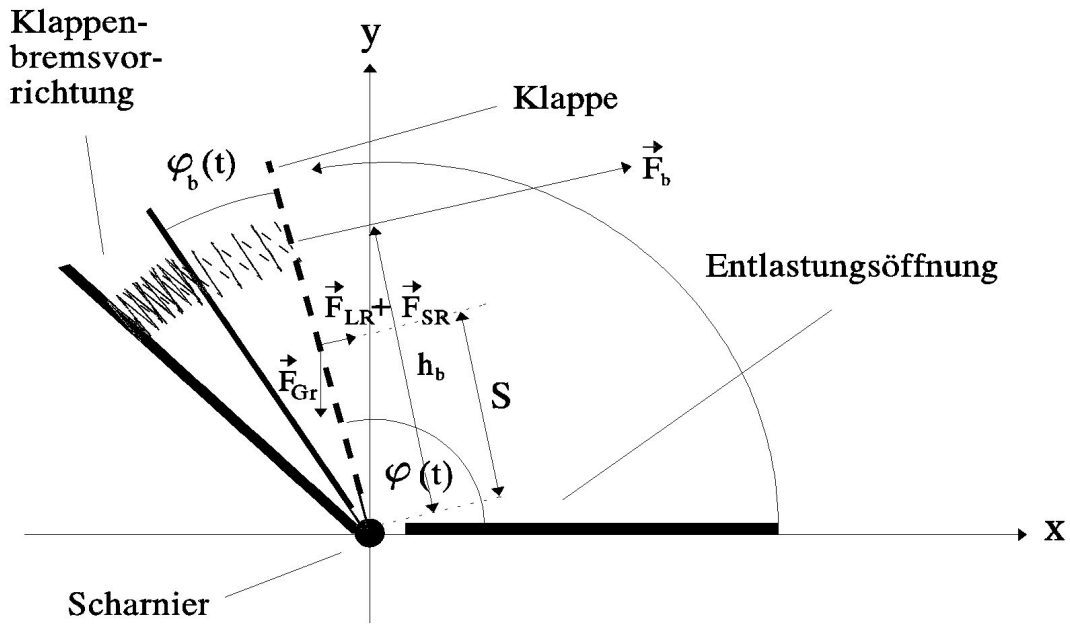


Abbildung 1.6: Skizze des Fangvorganges einer Entlastungsklappe mittels Metallplatte und Feder. Die Klappe wird im Abstand h_b vom Scharnier durch eine Feder mit der Konstanten k , also mit der linearen Bremskraft $F_b^{\text{rot}} = k^\circ \cdot \varphi_b(t) \cdot h_b^{-1}$ abgebrems.

Aus der Definition des Drehmomentes (1.10) folgt für die Federbremskraft

$$F_b^{\text{rot}}(t) = \frac{k^\circ \cdot \varphi_b(t)}{h_b} \quad (1.24)$$

wobei h_b der wirksame Hebel des Bremsmomentes ist. Das Integral des Bremsmomentes über den Bremswinkel $\varphi_b(t)$ liefert die Bremsarbeit.

$$E_b^{\text{rot}} = \int_0^{\varphi_{b\max}} k^\circ \cdot \varphi_b \, d\varphi_b = \frac{1}{2} \cdot k^\circ \cdot \varphi_{b\max}^2 \quad (1.25)$$

1.2.3 Bremswinkel beim Klappenfangvorgang

In dem Augenblick, in dem die Klappe durch die Bremswirkung von Feder und Hebel zum Stillstand kommt, ist die Rotationsenergie der Klappe bei Bremsbeginn gleich der maximalen Bremsarbeit. Es gilt also

$$E_{\text{rot}}(t_a) = \frac{1}{2} \cdot \Theta_K \cdot \omega^2(t_a) = \frac{1}{2} \cdot k^\circ \cdot \varphi_{\text{bmax}}^2 = E_{\text{b}}^{\text{rot}} \quad (1.26)$$

wobei die Zeit t_a den Zeitpunkt des Aufpralles der Klappe auf der Feder markiert. Auflösen von (1.26) nach φ_{bmax} liefert

$$\varphi_{\text{bmax}} = \sqrt{\frac{\Theta_K \cdot \omega^2(t_a)}{k^\circ}} \quad (1.27)$$

Damit die Druckentlastungsklappe durch die potentielle Energie in der Bremsfeder nach dem Bremsvorgang nicht wieder in entgegengesetzte Richtung beschleunigt wird und zuschlägt, muss die durch die Klappenbremsung gespannte Feder durch eine geeignete Mechanik in ihrer weiteren freien Bewegung behindert werden.

1.3 Mechanik eines Druckentlastungsdeckels

1.3.1 Bewegungsgleichung eines Entlastungsdeckels

Druckentlastungsdeckel werden im Entlastungsfall von der Entlastungsöffnung abgesprengt. Weil keine Führung über beispielsweise ein Scharnier erfolgt, ist die Bewegung eines Entlastungsdeckels keine Drehbewegung wie bei einer Entlastungsklappe, sondern eine lineare Bewegung. Auf den Entlastungsdeckel wirken im Explosionsfall die beschleunigende Kraft aufgrund des Überdruckes im Silobehälter $F_{\text{Ex}}(t)$, die Luftreibungskraft $F_{\text{LR}}(t)$ und die Gravitationskraft $F_{\text{Gr}}(t)$. Es gilt

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m(t)} \cdot \left(F_{\text{Ex}}(t) - F_{\text{Gr}}(t) - F_{\text{LR}}(t) \right) \quad (1.28)$$

Die beschleunigte Gesamtmasse $m(t)$ ist zeitabhängig, weil sich mit zunehmender Deckelsteighöhe die Länge der zu beschleunigenden Halteseile und damit die Seilmasse zunimmt. Wie diese Kräfte im einzelnen aussehen ist in Kapitel 3.2 dargestellt.

1.4 Mechanik der Deckelfangvorrichtung

1.4.1 Bewegungsenergie des Deckels

Bis der Entlastungsdeckel nach der Absprengung vom Silo den Abstand von der Entlastungsöffnung erreicht, der der Länge der Abfangseile entspricht, wirkt eine resultierende Kraft $\vec{F}_{\text{D}}(t)$ auf den Deckel. Diese Resultierende setzt sich aus der Explosionsdruckkraft $\vec{F}_{\text{Ex}}(t)$, der Gravitationskraft $\vec{F}_{\text{Gr}}(t)$ und der Luftwiderstandskraft $\vec{F}_{\text{LR}}(t)$ zusammen, wie man leicht Abbildung 1.7 entnehmen kann. Mit dieser Überlegung ergibt sich die zeitabhängige kinetische Energie des Deckels aus

$$E_{\text{kin}}(t) = \frac{1}{2} \cdot m(t) \cdot v^2(t) = \frac{\left(\int_0^t (\dot{m}(\xi) \cdot v(\xi) + m(\xi) \cdot \dot{v}(\xi)) d\xi \right)^2}{2 \cdot m(t)} = \frac{\left(\int_0^t F_{\text{D}}(\xi) d\xi \right)^2}{2 \cdot m(t)} \quad (1.29)$$

1.4.2 Bremskraft und -energie beim Deckelfangvorgang

Wie bei der Entlastungsklappe muss die vom Deckel während des Öffnungsvorganges aufgenommene kinetische Energie durch die Bremswirkung von Fangseilen oder -ketten dissipiert werden. Der Unterschied zum Fall der Explosionsklappe ist neben der Geradlinigkeit der Bewegung, dass sich der Entlastungsdeckel während des Bremsvorganges noch immer im Gasstrom aus der Entlastungsöffnung befindet. Die Abfangeile müssen also nicht nur die Bewegungsenergie des Deckels aufnehmen, sondern zusätzlich der Kraft auf den Deckel standhalten, die durch das gegen den Deckel anströmende Verbrennungsprodukt verursacht wird.

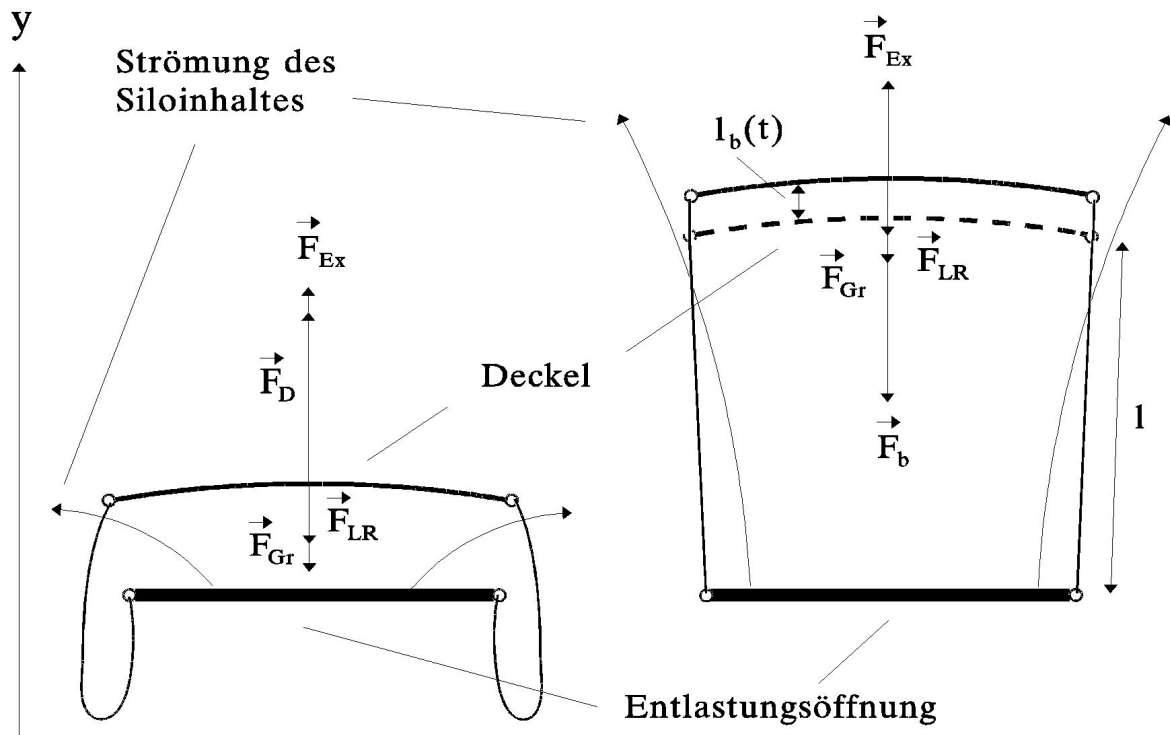


Abbildung 1.7: Skizze des Fangvorganges eines Entlastungsdeckels über mehrere Fangseile. Die Seile der Länge l werden während des Deckelbremsvorganges um $l_b(t)$ gedehnt.

Setzt man für die Bremskraft der n Deckelhalteseile das Hook'sche Gesetz an, so folgt für die Bremskraft

$$F_b^{\text{kin}}(t) = n \cdot E \cdot A_S \cdot \frac{l_b(t)}{l} \quad (1.30)$$

mit A_S als Querschnittsfläche eines Halteseiles, l als Länge des unbelasteten Seiles, E als Elastizitätsmodul und $l_b(t)$ als Seildehnung beim Bremsvorgang. Das Integral der Bremskraft über den Bremsweg $l_b(t)$ liefert die Bremsarbeit.

$$E_b^{\text{kin}} = \int_0^{l_{b\text{max}}} n \cdot E \cdot A_S \cdot \frac{l_b}{l} dl_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{n \cdot E \cdot A_S}{l} \cdot l_{b\text{max}}^2 \quad (1.31)$$

1.4.3 Bremsweg beim Deckelfangvorgang

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 1.4.2 muss im Augenblick der vollständigen Entlastungsdeckelabbremmung

$$\frac{1}{2} \cdot m(t_a) \cdot v^2(t_a) + \int_0^{l_{b_{\max}}} F_D(y) dy = \frac{n \cdot E \cdot A_S \cdot l_{b_{\max}}^2}{2 \cdot l} \quad (1.32)$$

gelten. Der erste Term stellt die von Deckel und Halteseilen aufgenommene Bewegungsenergie im Augenblick t_a des Bremsbeginns dar. Der Integralterm ist die Arbeit, die durch die Kraftsumme $F_D(y(t)) = F_{Ex}(y(t)) + F_{Gr}(y(t)) + F_{LR}(y(t))$ auf dem Bremsweg am Entlastungsdeckel geleistet wird. Die Summe beider Terme muss bei vollständiger Deckelabbremmung gleich der maximalen Bremsarbeit sein, welche rechts vom Gleichheitszeichen in (1.32) steht. Aufgelöst nach $l_{b_{\max}}$ ergibt sich für die Länge des Bremsweges

$$l_{b_{\max}} = \sqrt{\frac{l \cdot m(t_a) \cdot v^2(t_a) + 2 \cdot l \cdot \int_0^{l_{b_{\max}}} F_D(y) dy}{n \cdot E \cdot A_S}} \quad (1.33)$$

Falls die in (1.33) auftauchenden Messgrößen $v(t_a)$ oder $F_D(y)$ nicht bekannt sind, kann eine einfache Abschätzung durchgeführt werden, wie sie in Kapitel 2.2.6 beschrieben ist. Dort werden die benötigten funktionellen Zusammenhänge aus den Messungen an Entlastungsklappen näherungsweise abgeleitet.

1.5 Theorie des Trümmerfluges

Angesichts zunehmender Gebäudedichte in Industrieanlagen muss bei der Risikoanalyse bezüglich Explosionsunfällen auch der mögliche Schaden an Gebäuden berücksichtigt werden, den das Phänomen des Trümmerfluges hervorrufen kann. In dieser Untersuchung wurde ein Versuch unternommen, diesen Trümmerflug mit theoretischen Mitteln möglichst realitätsnah zu beschreiben.

1.5.1 Eingangsbetrachtung

Das Problem des schnellen Fluges kugelsymmetrischer Körper durch das Medium Luft kann allgemein als schiefer Wurf mit Newton-Reibung

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1.34)$$

aufgefasst werden, also mit einer Reibungskraft $\propto v^2$. In (1.34) bedeuten A die Querschnittsfläche, v die Geschwindigkeit und c_n den Reibungskoeffizienten des Körpers; ρ ist die Dichte des Mediums, also der Luft. Das Problem des schiefen Wurfs mit Newton-Reibung führt auf die Differentialgleichung

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}(t) = -\frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) - m \cdot g \cdot \vec{e}_y \quad (1.35)$$

mit den Anfangsbedingungen

$$\vec{r}(0) = (0, h) \quad \vec{v}(0) = \vec{v}_{Ex} = (v_{Ex} \cdot \cos \varphi, v_{Ex} \cdot \sin \varphi) \quad (1.36)$$

Die Bewegungsgleichung (1.35) ist nicht separabel und zerfällt in

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{x}(t) &= 0 \\ m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \end{aligned} \quad (1.37)$$

also in ein System von gekoppelten, nichtlinearen Differentialgleichungen. Solche sind in den allermeisten Fällen nicht analytisch lösbar und man ist auf numerische Näherungsverfahren angewiesen (z. B. das Verfahren von Runge und Kutta).

1.5.2 Idealisierte Flugbahnen

1.5.2.1 Schiefer Wurf ohne Reibung

Eine sehr grobe, aber einfache Abschätzung der Trümmerflugbahnen liefert die Bewegungsgleichung für den schiefen Wurf ohne Luft-Reibung. Als Lösung dieser Differentialgleichung ergibt sich bekanntlich

$$\vec{r}(t) = v_{\text{Ex}} \cdot t \cdot \vec{e}_x \cdot \cos \varphi + \left(v_{\text{Ex}} \cdot t \cdot \sin \varphi - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + h \right) \cdot \vec{e}_y \quad (1.38)$$

wenn der Startort des Flugkörpers bei $r(0) = (0, h)$, also in der Höhe h über dem Erdboden liegt. Setzt man die y -Komponente dieser Bewegung gleich Null (entspricht dem Aufschlag auf dem Boden), löst nach der Zeit t auf und setzt den gewonnenen Ausdruck für t in die x -Komponente ein, so erhält man die Flugweite der Trümmer. Es ergibt sich

$$W(v_{\text{Ex}}, \varphi, h) = \frac{v_{\text{Ex}}^2 \cdot \sin(2 \cdot \varphi)}{2 \cdot g} + v_{\text{Ex}} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{\left(\frac{v_{\text{Ex}} \cdot \sin \varphi}{g} \right)^2 + \frac{2 \cdot h}{g}} \quad (1.39)$$

Wie aus (1.39) entnommen werden kann, hängt die Flugweite von den drei Variablen Anfangsgeschwindigkeit v_{Ex} , Startwinkel φ zur Horizontalen und Starthöhe h über dem Erdboden ab. g ist die Erdbeschleunigung.

In diese Betrachtung gehen keine aerodynamischen Eigenschaften (Reibung, Auftrieb durch günstige Körperform) der Trümmer ein. Deshalb liefert diese einfache Berechnungsmethode nur brauchbare Werte für schwere Körper, deren Oberflächenbeschaffenheit und -form eine geringe Luft-Reibung erfährt.

1.5.2.2 Schiefer Wurf mit Stokes-Reibung

Eine bessere Näherung an die reale Flugbahn von nahezu kugelsymmetrischen Trümmern stellt der Ansatz des schiefen Wurfes mit Stokes-Reibung dar. An nicht zu schnell fliegenden Körpern greift eine Reibungskraft an, die proportional zur Fluggeschwindigkeit ist. Diese wird mit dem allgemeinen Ansatz

$$F_{\text{R}} = c_s \cdot \eta \cdot v \quad (1.40)$$

beschrieben, wobei c_s ein Reibungskoeffizient, v die Körpergeschwindigkeit und η die Viskosität des Mediums ist. Luft hat unter Normbedingungen den Viskositätswert $\eta = 1,74 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$. Mit (1.40) ergibt sich die Bewegungsgleichung

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}(t) = -c_s \cdot \eta \cdot \dot{\vec{r}}(t) - m \cdot g \cdot \vec{e}_y \quad (1.41)$$

Eine längere und umständliche Rechenprozedur liefert als Ergebnis für (1.41)

$$\begin{aligned} \vec{r}(t) = & \frac{m}{c_s \cdot \eta} \cdot v_{\text{Ex}} \cdot \cos \varphi \cdot \left(1 - e^{-\frac{c_s \cdot \eta}{m} \cdot t}\right) \cdot \vec{e}_x \\ & + \left[-\frac{m \cdot g}{c_s \cdot \eta} \cdot t + \frac{m}{c_s \cdot \eta} \cdot \left(v_{\text{Ex}} \cdot \sin \varphi + \frac{m \cdot g}{c_s \cdot \eta} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{c_s \cdot \eta}{m} \cdot t}\right) \right] \cdot \vec{e}_y \end{aligned} \quad (1.42)$$

Diese Gleichung beschreibt den Trümmerflug nicht ganz korrekt, da die Trümmergeschwindigkeiten zu hoch sind. Wenn aber auf eine aufwendige numerische Berechnung verzichtet werden soll, liefert (1.42) in jedem Fall genauere Ergebnisse als (1.38).

1.5.3 Numerische Lösung der Bewegungsgleichung für den schiefen Wurf mit Newton-Reibung

1.5.3.1 Schiefer Wurf mit Newton-Reibung ohne Luftbewegung

Zur Bewältigung dieser Aufgabe muss das Gleichungssystem (1.37) zunächst nach den zweiten, zeitlichen Ableitungen aufgelöst werden. Das liefert

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= -\frac{c_n \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot m} \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) &= -\frac{c_n \cdot \rho \cdot A}{2 \cdot m} \cdot \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) - g \end{aligned} \quad (1.43)$$

Bei der numerische Lösung von Differentialgleichungen des Typs (1.43) wird der Zeitparameter t diskretisiert.

$$t_i = t_0 + i \cdot h \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1.44)$$

Das i ist dabei ein ganzzahliger Parameter und h ist der Diskretisierungsabstand. Je kleiner h gewählt wird, desto genauer wird die Annäherung an die exakte Lösung ($\propto h^5$) und desto mehr Rechenschritte müssen durchgeführt werden. Die Runge-Kutta Näherungsrechnung startet bei den Anfangsbedingungen $x(t_0) = x_0$, $y(t_0) = y_0$, $\dot{x}(t_0) = \dot{x}_0$, $\dot{y}(t_0) = \dot{y}_0$, d. h. bei $i = 0$. Einsetzen dieser Werte in (1.43) liefert zunächst die Krümmung der Funktion $\vec{r}(t)$ zum Zeitpunkt t_0 . Diese erste Krümmungsberechnung wird mit dem Index I gekennzeichnet.

$$\left. \begin{array}{l} t_I = t_0 \\ x_I = x_0 \\ y_I = y_0 \\ \dot{x}_I = \dot{x}_0 \\ \dot{y}_I = \dot{y}_0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \ddot{x}_I = f_x(x_I, y_I, \dot{x}_I, \dot{y}_I, t_I) = f_{x_I} \\ \ddot{y}_I = f_y(x_I, y_I, \dot{x}_I, \dot{y}_I, t_I) = f_{y_I} \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} k_{x_I} = f_{x_I} \cdot \frac{h^2}{2} \\ k_{y_I} = f_{y_I} \cdot \frac{h^2}{2} \end{array} \quad (1.45)$$

Mit dieser Krümmung lässt sich eine Parabel konstruieren (Taylor-Entwicklung), mit der die gesuchte Funktion um die Stelle t_0 approximiert werden und ein vorläufiger Funktionswert $\vec{r}_I = (k_{x_I}, k_{y_I})$ an der Stelle $t_1 = t_0 + h$ berechnet werden kann. In einem zweiten Rechenschritt wird mit Hilfe des vorläufigen Funktionswertes aus dem ersten Rechenschritt um $x_0 + \frac{h}{2}$ entwickelt und ein neuer vorläufiger Funktionswert \vec{r}_{II} mit dieser Näherung errechnet. Mit

(1.45) und der Formel für die Taylor-Entwicklung¹ folgt

$$\left. \begin{aligned} t_{II} &= t_0 + \frac{h}{2} \\ x_{II} &= x_0 + \frac{1}{2} \cdot \dot{x}_0 \cdot h + \frac{1}{4} \cdot k_{xI} \\ y_{II} &= y_0 + \frac{1}{2} \cdot \dot{y}_0 \cdot h + \frac{1}{4} \cdot k_{yI} \\ \dot{x}_{II} &= \dot{x}_0 + \frac{k_{xI}}{h} \\ \dot{y}_{II} &= \dot{y}_0 + \frac{k_{yI}}{h} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \ddot{x}_{II} &= f_x(x_{II}, \dots) = f_{xII} \\ \ddot{y}_{II} &= f_y(x_{II}, \dots) = f_{yII} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} k_{xII} &= f_{xII} \cdot \frac{h^2}{2} \\ k_{yII} &= f_{yII} \cdot \frac{h^2}{2} \end{aligned} \quad (1.46)$$

Mit Krümmung und Funktionswert aus (1.46) wird wieder eine Parabel um $t_0 + \frac{h}{2}$ konstruiert und eine dritte Krümmung, sowie ein dritter, vorläufiger Funktionswert bestimmt.

$$\left. \begin{aligned} t_{III} &= t_{II} \\ x_{III} &= x_{II} \\ y_{III} &= y_{II} \\ \dot{x}_{III} &= \dot{x}_0 + \frac{k_{xII}}{h} \\ \dot{y}_{III} &= \dot{y}_0 + \frac{k_{yII}}{h} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \ddot{x}_{III} &= f_x(x_{III}, \dots) = f_{xIII} \\ \ddot{y}_{III} &= f_y(x_{III}, \dots) = f_{yIII} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} k_{xIII} &= f_{xIII} \cdot \frac{h^2}{2} \\ k_{yIII} &= f_{yIII} \cdot \frac{h^2}{2} \end{aligned} \quad (1.47)$$

In einem vierten Rechenschritt wird um die Stelle $t_0 + h$ mit den gewonnenen Zahlen aus (1.47) entwickelt und wiederum die Krümmung und der Funktionswert bestimmt.

$$\left. \begin{aligned} t_{IV} &= t_0 + h \\ x_{IV} &= x_0 + \dot{x}_0 \cdot h + k_{xIII} \\ y_{IV} &= y_0 + \dot{y}_0 \cdot h + k_{yIII} \\ \dot{x}_{IV} &= \dot{x}_0 + \frac{2 \cdot k_{xIII}}{h} \\ \dot{y}_{IV} &= \dot{y}_0 + \frac{2 \cdot k_{yIII}}{h} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \ddot{x}_{IV} &= f_x(x_{IV}, \dots) = f_{xIV} \\ \ddot{y}_{IV} &= f_y(x_{IV}, \dots) = f_{yIV} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} k_{xIV} &= f_{xIV} \cdot \frac{h^2}{2} \\ k_{yIV} &= f_{yIV} \cdot \frac{h^2}{2} \end{aligned} \quad (1.48)$$

Schließlich wird über die vorläufigen Funktionswerte $\vec{r}_{I...IV}$ gemittelt und die beiden endgültigen Näherungswerte $\vec{r}(t_1)$ und $\vec{r}'(t_1)$ berechnet.

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \frac{1}{3} \cdot (k_{xI} + k_{xII} + k_{xIII}) \\ k_y &= \frac{1}{3} \cdot (k_{yI} + k_{yII} + k_{yIII}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} x(t_1) &= x_0 + \dot{x}_0 \cdot h + k_x \\ y(t_1) &= y_0 + \dot{y}_0 \cdot h + k_y \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_x &= \frac{1}{6} \cdot (k_{xI} + 2 \cdot k_{xII} + 2 \cdot k_{xIII} + k_{xIV}) \\ \dot{k}_y &= \frac{1}{6} \cdot (k_{yI} + 2 \cdot k_{yII} + 2 \cdot k_{yIII} + k_{yIV}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} \dot{x}(t_1) &= \dot{x}_0 + \frac{2 \cdot \dot{k}_x}{h} \\ \dot{y}(t_1) &= \dot{y}_0 + \frac{2 \cdot \dot{k}_y}{h} \end{aligned} \quad (1.49)$$

Nun wiederholt sich die beschriebene Rechenprozedur für die Stellen t_1, t_2, \dots, t_i als Ausgangspunkt.

Mit anderen Worten: Das Runge-Kutta-Verfahren ist nichts anderes, als das mehrfache Vortasten vom Intervallanfang aus auf Parabelbögen verschiedener, jeweils konstanter Krümmung, und zwar zweimal bis zur Intervallmitte und ein letztes Mal bis zum Intervallende. Dabei

¹Taylor-Entwicklung: $f(x+h) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x)}{n!} \cdot (x+h)^n$

werden viermal vorläufige Funktionswerte bestimmt und anschließend über diese gemittelt. Daraus wiederum werden die endgültigen Näherungswerte für das Intervallende berechnet. Die gesuchte Funktion $\vec{r}(t)$ stellt sich schließlich als Parabelzug entlang der Zeitintervalle dar. Zur Durchführung der umfangreichen Rechenarbeit wurde ein Rechner-Programm mit dem Namen SIMEK (**S**imulationsrechnung zur **M**echanik von **D**ruckentlastungs**k**lappen) entwickelt. Es ist unter anderem dazu in der Lage, die Wurfweiten als Funktion aller wichtigen Parameter zu berechnen und die Trümmerflugbahnen grafisch darzustellen.

1.5.3.2 Schiefer Wurf mit Newton-Reibung und Luftbewegung

Die Berücksichtigung von Wind bei der Flugbewegung von nahezu kugelsymmetrischen Körpern durch die Luft führt auf die Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{(\dot{x}(t) - v_{\text{Wind}})^2 + \dot{y}^2(t)} \cdot (\dot{x}(t) - v_{\text{Wind}}) &= 0 \\ m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho \cdot A \cdot \sqrt{(\dot{x}(t) - v_{\text{Wind}})^2 + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \end{aligned} \quad (1.50)$$

Diesem Ansatz liegt die Vereinfachung zugrunde, dass die Luftbewegung räumlich homogen, zeitlich konstant und parallel zum Erdboden ist. Stimmt die Richtung des Windes mit der Flugrichtung überein, erfährt der Flugkörper eine geringere Reibungskraft, da die Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Luft geringer ist als ohne Luftbewegung. Diese Gegebenheit drückt sich in (1.50) als Differenz zwischen \dot{x} und v_{Wind} aus. Um die Gleichungen (1.50) zu lösen, verfährt man in gleicher Weise wie unter 1.5.3.1 beschrieben (SIMEK).

1.5.3.3 Schiefer Wurf mit Newton-Reibung und Luftbewegung für nicht kugelsymmetrische Körper

Mit nicht kugelsymmetrisch sind in diesem Abschnitt alle Arten von flachen Körpern gemeint, die mindestens drei Symmetrieachsen aufweisen, wie z. B. kreisförmige Platten. Wie Abbildung 1.8 zeigt, besitzen solche Körper zwei, sich wesentlich unterscheidende Querschnittsflächen A_x, A_y bzw. Luftwiderstandskoeffizienten c_x, c_y . Das vektoriell geschriebene Reibungsgesetz (1.31) ist hier in guter Näherung gegeben durch

$$\vec{F}_R \approx \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \hat{N} \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{r}(t) \quad (1.51)$$

wobei der Tensor \hat{N} durch

$$\hat{N} = \begin{pmatrix} c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta & 0 \\ 0 & c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta + c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta \end{pmatrix} \quad (1.52)$$

gegeben ist. Die Bewegungsgleichungen (1.50) verändern sich damit zu

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_x \cdot A_x \cdot \cos^2(\beta) + c_y \cdot A_y \cdot \sin^2(\beta)) \\ \cdot \sqrt{(\dot{x}(t) - v_{\text{Wind}})^2 + \dot{y}^2(t)} \cdot (\dot{x}(t) - v_{\text{Wind}}) &= 0 \\ m \cdot \ddot{y}(t) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_x \cdot A_x \cdot \sin^2(\beta) + c_y \cdot A_y \cdot \cos^2(\beta)) \\ \cdot \sqrt{(\dot{x}(t) - v_{\text{Wind}})^2 + \dot{y}^2(t)} \cdot \dot{y}(t) &= -m \cdot g \end{aligned} \quad (1.53)$$

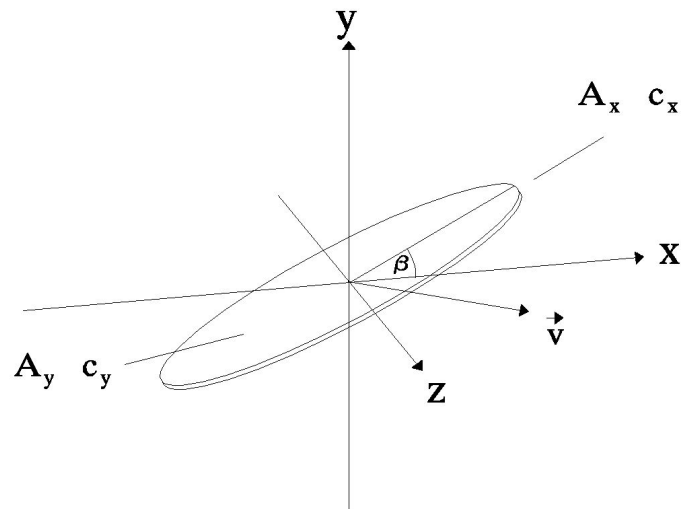


Abbildung 1.8: Skizze einer, mit der Geschwindigkeit v durch die Luft fliegenden Platte mit der Neigung β zur Horizontalen.

Die Sinus- und Cosinusfunktionen des Winkels β in \hat{N} bringen die Orientierung des Körpers in Bezug auf die Achsenrichtungen zum Ausdruck. Sie stellen die Berechnung der effektiven Querschnittsflächen in Richtung der Koordinatenachsen und näherungsweise die Veränderung des Reibungskoeffizienten durch die schräge Anströmung der Körperflächen dar. Rotiert der Körper während seines Fluges, so wird $\beta = \beta(t) = \dot{\beta} \cdot t$ zeitabhängig.

Sieht man einmal vom Auftreten eines aerodynamischen Auftriebes durch eine besonders günstige Flugkörperform ab, so ist die Flugweite einer in waagerechter Orientierung ($\beta = 0$) fliegenden Platte als Obergrenze der erreichbaren Flugweiten² anzusehen.

Der bei günstigen Bedingungen auftretende aerodynamische Auftrieb wird in dieser Betrachtung vernachlässigt, da er zum einen sehr selten vorkommen wird und zum anderen neben den anderen in Erscheinung tretenden Kräften eine eher untergeordnete Rolle spielt. Der zusätzliche Rechenaufwand bei der Berücksichtigung des aerodynamischen Auftriebes würde in einem äußerst ungünstigen Verhältnis zur Verbesserung der Rechenergebnisse stehen.

²Bei fester Körpermasse und fester Startgeschwindigkeit.

Kapitel 2

Experimentelle Untersuchungen

2.1 Eigenschaften der Druckentlastungsklappe

Voraussetzung für die in Kapitel 1 diskutierten Untersuchungsmethoden ist die Kenntnis von Trägheitsmoment (bezüglich der Drehachse) und Schwerpunkt der Druckentlastungsklappe. Um die theoretisch berechneten Werte für das Klappenträgheitsmoment bzw. den Klappenschwerpunkt zu überprüfen und um diese gegebenenfalls zu korrigieren, wurde Θ_K und \vec{r}_S auch auf experimentellem Weg ermittelt.

2.1.1 Bestimmung des Schwerpunktes

2.1.1.1 Messprinzip und Versuchsaufbau

Die Klappe wird punktuell an einem beliebigen Ort ihres Randes mit einer ausreichend starken Schnur aufgehängt. Parallel zu dieser Schnur verläuft eine zweite Schnur eines Lotes. Abbildung 2.1 verdeutlicht den Aufbau.

Die messende Person positioniert sich so, dass sich beide Schnüre in Blickrichtung bedecken. Die Blickrichtung ist dabei senkrecht zur größten Fläche der Klappe. Der Verlauf der Lotschnur wird auf der Klappe nachgezeichnet.

Anschließend wird die Klappe um einige Grad um die Achse senkrecht zur größten Fläche der Klappe gedreht. Wie zuvor wird der Verlauf der Lotschnur auf der Klappe eingezeichnet.

Diese Prozedur wird für verschiedene Klappenpositionen wiederholt. In guter Näherung liegt in dem Punkt der Klappe ihr Schwerpunkt, in welchem sich die auf ihr eingezeichneten Geraden schneiden.

2.1.1.2 Versuchsergebnisse und Auswertung

Es wurden 8 verschiedene Klappenpositionierungen auf die in 2.1.1.1 beschriebene Weise bearbeitet. Der Schnittpunkt der auf der Klappe gezeichneten Geraden ließ sich auf ± 5 mm fixieren.

Es ergab sich (Angabe in mm und bezogen auf das Koordinatensystem in Abb. 1.3)

$$\vec{r}_S = \begin{pmatrix} 385 \pm 5 \\ 0 \pm 5 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Theoretisch und experimentell ermittelter Schwerpunkort weichen also knapp 5 mm voneinander ab. Die Ursache dafür ist in Schweißnähten und anderen Verarbeitungsungenauigkeiten zu sehen, die theoretisch nicht berücksichtigt werden konnten.

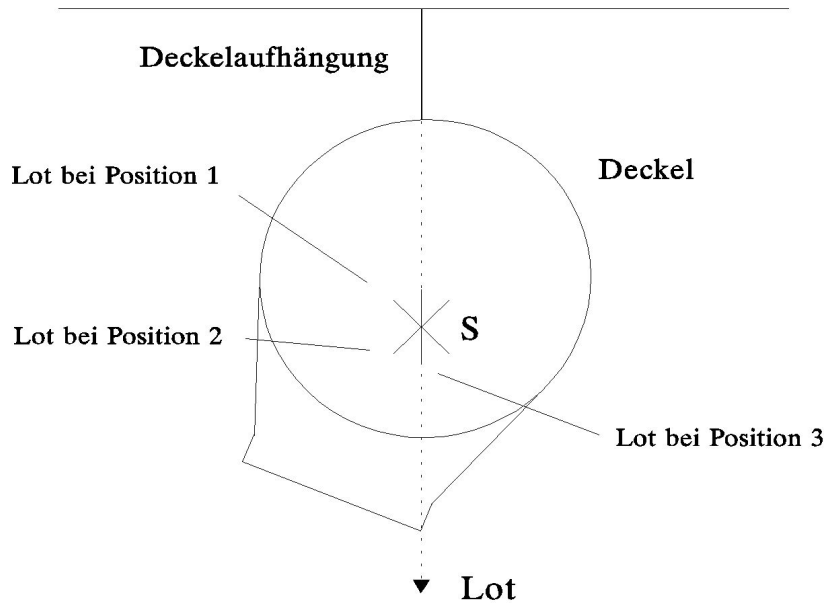


Abbildung 2.1: Skizze des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Entlastungsdeckelschwerpunktes.

2.1.2 Bestimmung des Trägheitsmomentes

Eine einfache Möglichkeit das Trägheitsmoment Θ_K zu bestimmen besteht darin, die Druckentlastungsklappe möglichst reibungsfrei aufzuhängen, in Pendelbewegungen kleiner Amplitude zu versetzen und die Dauer einer vollständigen Schwingung (Periode) zu messen. Wie Abbildung 2.2 veranschaulicht, ergibt sich für das physikalische Pendel die Bewegungsgleichung

$$\ddot{\varphi}(t) + \frac{r \cdot m \cdot g}{\Theta} \cdot \sin \varphi(t) = 0 \quad (2.2)$$

Für kleine Amplituden kann $\sin \varphi(t)$ durch $\varphi(t)$ ersetzt werden. Damit folgt

$$\ddot{\varphi}(t) + \frac{r \cdot m \cdot g}{\Theta} \cdot \varphi(t) = 0 \quad (2.3)$$

Die Differentialgleichung (2.3) wird allgemein gelöst durch

$$\varphi(t) = C \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{r \cdot m \cdot g}{\Theta}} \cdot t + \delta \right) \quad (2.4)$$

wobei die Konstante C und die Phasenverschiebung δ durch die Anfangsbedingungen festgelegt sind.

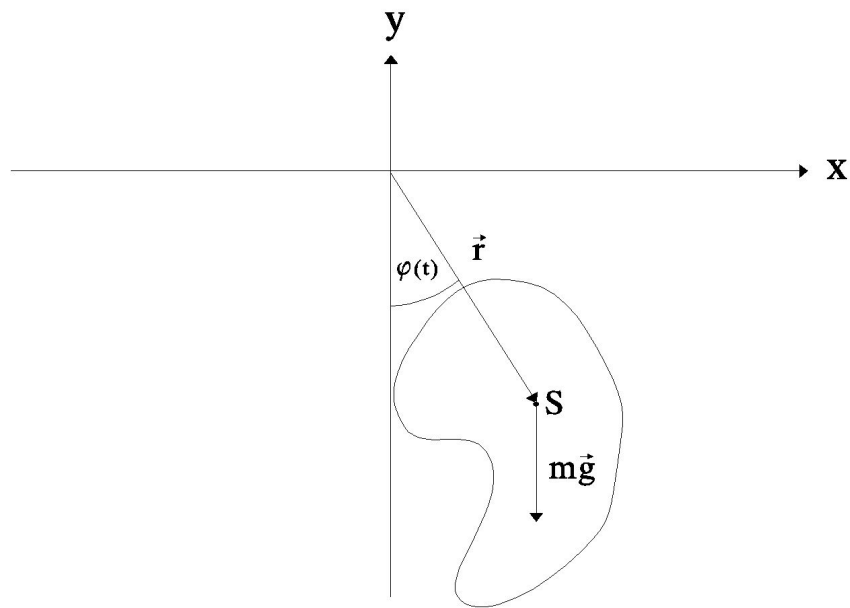


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines physikalischen Pendels.

Weil die Wurzel in (2.4) die Schwingungsfrequenz ω darstellt, folgt aus der Bedingung $\omega \cdot T = 2 \cdot \pi$ die Schwingungsperiode

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\Theta}{r \cdot m \cdot g}} \quad (2.5)$$

Aus (2.5) folgt mit Hilfe des Steiner'schen¹ Satzes das Trägheitsmoment für die Drehachse durch den Schwerpunkt

$$\Theta_S = r \cdot m \cdot g \left(\left(\frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2 - \frac{r}{g} \right) \quad (2.6)$$

Ist der Ort des Schwerpunktes bekannt, so kann Θ_S direkt über die Messung der Schwingungsperiode T bestimmt werden. Mit dem Satz von Steiner ergibt sich daraus das Trägheitsmoment für jede beliebige, zur Schwerpunktsdrehachse parallele Rotationsachse.

2.1.2.1 Versuchsaufbau

Ein leichtes und sehr bewegliches Nylonseil wurde durch die für die Wellenaufnahme vorgesehene Aussparung in der Klappe geführt. Beide Seilenden wurden so an einer Aufhängevorrichtung fixiert, dass eine Variation des Abstandes zwischen Klappenschwerpunkt und Drehachse ohne großen Aufwand durchgeführt werden konnte. Eine Wasserwaage diente der exakten Ausrichtung der Klappe und mit einem Metermaß wurde die jeweils benutzte Seillänge gemessen.

Für jede eingestellte Seillänge bzw. Abstand zwischen Schwerpunkt und Drehachse wurde fünfmal die Schwingungsperiode gemessen (Drehachse wie in Abbildung 1.3). Schließlich wurde über alle Werte für eine Seillänge gemittelt und auf die Dauer einer Schwingung umgerechnet.

¹siehe Abschnitt 4.1.2.1

2.1.2.2 Versuchsergebnisse

Zunächst wurde die Klappe dreimal gewogen. Übereinstimmend ergab sich bei jeder Wägung eine Klappenmasse von 14,3 kg. Die Ergebnisse der Pendelversuche sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Nr.	r [m]	$T_5(1)$ [s]	$T_5(2)$ [s]	$T_5(3)$ [s]	$T_5(4)$ [s]	$T_5(5)$ [s]	\bar{T}_5 [s]	σ [s]
1	1,398	12,10	12,11	12,16	12,20	12,33	12,180	0,083
2	1,373	12,12	12,27	12,30	12,08	12,11	12,176	0,090
3	1,257	11,49	11,67	11,66	11,70	11,52	11,608	0,086
4	1,139	11,06	11,29	11,11	11,35	11,23	11,208	0,109
5	1,038	10,67	10,56	10,73	10,70	10,72	10,676	0,062
6	0,948	10,17	10,42	10,52	10,23	10,52	10,372	0,146
7	0,859	9,80	9,88	10,20	9,80	9,88	9,913	0,148
8	0,776	9,73	9,78	9,38	9,40	9,33	9,527	0,191
9	0,705	9,18	9,15	9,32	9,25	9,15	9,210	0,064
10	0,620	8,47	8,48	8,52	8,65	8,73	8,570	0,072
11	0,540	8,07	8,32	8,22	8,33	8,33	8,253	0,103
12	0,463	8,12	7,98	7,92	7,85	8,13	7,999	0,111

Tabelle 2.1: Messergebnisse aus den Pendelversuchen zur Bestimmung des Trägheitsmomentes der Entlastungsklappe.

Nr.	r [m]	\bar{T}_1 [s]	Θ_S [kg · m ²]	Θ_K [kg · m ²]	$\Delta\Theta_K$ [kg · m ²]
1	1,398	2,436	1,531	3,650	0,404
2	1,373	2,435	1,970	4,090	0,429
3	1,257	2,322	1,625	3,745	0,358
4	1,139	2,242	1,792	3,912	0,397
5	0,948	2,074	1,405	3,525	0,175
6	1,038	2,135	1,639	3,758	0,461
7	0,859	1,983	1,451	3,571	0,359
8	0,776	1,905	1,396	3,515	0,402
9	0,705	1,842	1,392	3,512	0,119
10	0,620	1,714	0,975	3,095	0,110
11	0,540	1,651	1,061	3,180	0,131
12	0,463	1,600	1,146	3,266	0,117

Tabelle 2.2: Messdaten r und \bar{T}_1 und daraus berechnete Trägheitsmomente bezüglich der Schwerpunktachse und der Drehachse aus Abbildung 1.3.

2.1.2.3 Auswertung

Mit Formel (2.6), dem Steiner' schen Satz, der Deckelmasse $m = 14,3$ kg und den Daten aus Tabelle 2.1 für r und \bar{T}_5 kann das Trägheitsmoment bezüglich der Schwerpunktachse bzw. der Drehachse in Abbildung 1.3 berechnet werden. In Tabelle 2.2 sind die Resultate dieser Berechnung dargestellt.

Als Mittelwert der jeweils 12 Trägheitsmomente ergibt sich

$$\bar{\Theta}_S = 1,45 \pm 0,29 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad \bar{\Theta}_K = 3,56 \pm 0,29 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2.7)$$

2.2 Untersuchung am 9,4 Kubikmeter-Behälter

2.2.1 Messprinzip

Maßgeblich für die Explosionsheftigkeit von Staub/Luft-Gemischen in geschlossenen Behältern ist der maximale zeitliche Druckanstieg $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}}$ und der maximale Explosionsüberdruck p_{max} . Während bei konstanter Staubkonzentration c_s und Zündverzögerungszeit t_v (Zeitspanne zwischen dem Beginn des Staubeintrages und der Zündung) p_{max} bei annähernd kubischen Behältern weitgehend unabhängig von der Behältergröße ist, ändert sich $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}}$ nach dem sogenannten kubischen Gesetz mit der Größe des Behälters.

$$K_{\text{St}} = \left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}} \cdot \sqrt[3]{V} \quad (2.8)$$

Die staubspezifische Konstante K_{St} ist deshalb die Kenngröße eines Staubes bezüglich des maximalen zeitlichen Druckanstieges, den ein explodierendes Gemisch aus Luft und eben diesem Staub bei gegebenen Behältervolumen V hervorruft.

Bei einem beliebigen Behälter mit Entlastungsöffnung A_E muss bedingt durch dessen Geometrie und Volumen V die erforderliche Zündverzögerungszeit t_v und Staubkonzentration c_s so gewählt werden, dass die erzielten maximalen reduzierten Explosionsüberdrücke $p_{\text{red,max}}$ im Einklang stehen mit den nach der Berechnungsgleichung (2.9) in der Richtlinie VDI 3673 ermittelten reduzierten Explosionsüberdrücken $p_{\text{red,max}}$.

$$p_{\text{red,max}} = \left(\frac{3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\text{max}} \cdot K_{\text{St}} \cdot V^{0,753}}{A_E} \right)^{1,757} \quad (2.9)$$

Für das hier verwendete 9,4 m³-Silo ist diese Eich-Prozedur zuvor von *F. Kossebau et al.* durchgeführt worden und in [2] detailliert beschrieben.

In einem Silobehälter mit Druckentlastungsklappe werden Staubexplosionen definierter Heftigkeit gemäß [2] ausgelöst. Sowohl der Behälterinnendruck $p(t)$ als auch der Klappenöffnungswinkel $\varphi(t)$ wird als Funktion der Zeit aufgenommen, wobei das Klappenträgheitsmoment und die Explosionsheftigkeit (c_s , t_v) unabhängig voneinander variiert werden. Die Formeln aus Kapitel 1 liefern mit $\varphi(t)$ die zeitliche Entwicklung der Kraft auf das Klappenscharnier bzw. der Normalkraft auf die Klappenfläche. Damit ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dem maximalen Innendruck bzw. dem maximalen zeitlichen Druckanstieg im Behälter, den Klappeneigenschaften und der Kraft am Klappenscharnier bzw. auf die Entlastungsklappe. Die Ergebnisse dieser Messungen werden anschließend auf Entlastungsdeckel mit Seilsicherung übertragen. Die Messungen von $p(t)$ und $\varphi(t)$ werden weiterhin zur Überprüfung einer hier entwickelten Modellrechnung herangezogen.

Mit Hilfe dieser Modellrechnung werden Aussagen über das Beschleunigungsverhalten von Gegenständen im ausströmenden Verbrennungsprodukt möglich. Diese Kenntnis wird zusammen mit den Rechnungen aus Abschnitt 1.3 genutzt, um Angaben über Flugbahnen bzw. maximale Flugweiten von Trümmern bei Siloexplosionen machen zu können.

2.2.2 Versuchsaufbau

Ein Silobehälter ($V = 9,4 \text{ m}^3$, Höhe : Durchmesser = 1,5) ist mit vier über den Umfang und in der Höhe versetzten 12,3 l Staubvorratsbehältern versehen, aus denen über sprengkapselbetätigte Ventile und halbkreisförmig im Innern des Silobehälters angeordnete Ringdüsen Maisstärkestaub mit 20 bar Ausgangs-Luftdruck in den Behälter eingeblasen wird (Abbildung 2.3). Das Einblasen des Staubes wird durch einen Impuls aus einem speziellen Steuergerät ausgelöst. Nach einer, am Steuergerät einstellbaren Zeitspanne (Zündverzögerungszeit) wird die Zündung des Staub/Luft-Gemisches mittels eines zentral im Inneren des Silos montierten pyrotechnischen Zünders (Zündenergie 10 kJ) durch einen weiteren Impuls des Steuergerätes ausgelöst. Ein Transienten-Rekorder verfolgt Einblas- und Zündsignal. Die Triggerrung des gesamten Messsystems erfolgt durch das Einblassignal.

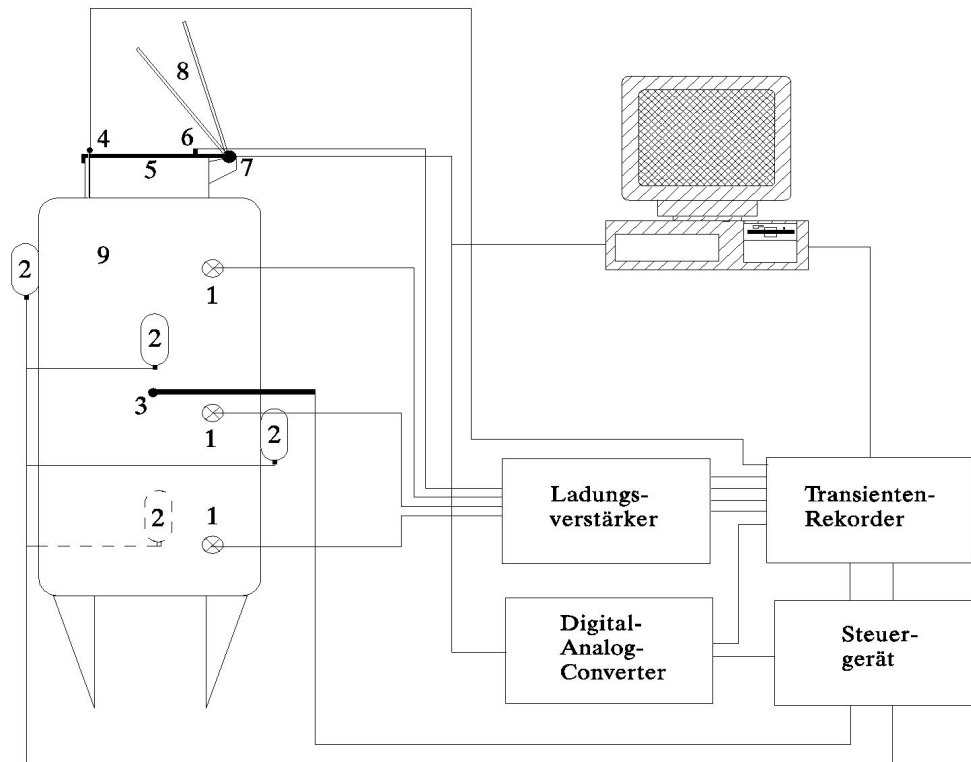


Abbildung 2.3: Schematisierter Versuchsaufbau mit den Komponenten piezoelektrische Drucksonden (1), Staub/Luft-Behälter (2), pyrotechnischer Zünder (3), Lichtschranke (4), Druckentlastungsklappe (5), piezoelektrischer Beschleunigungsmesser (6), Inkremental-Drehgeber (7), Deckelabfangvorrichtung mit Blattfederbremsung (8) und 9,4 m³-Silo (9).

2.2.2.1 Druckmessung

Der zeitliche Druckanstieg im Silo wird über drei piezoelektrische Drucksonden verfolgt, d. h. ein Ladungsverstärker wandelt die von den Sonden kommenden Messströme in Spannungssignale um, die durch einen Transienten-Rekorder gespeichert werden.

2.2.2.2 Winkel- und Beschleunigungsmessung

An der oberen Stirnseite des Silos befindet sich ein zylindrischer Entlastungsschlot kurzer Länge (etwa 0,5 m), der mit einer Entlastungsklappe verschlossen ist. Die Druckentlastungsklappe ist über eine Welle mit ihrer Verankerung auf dem Silo drehbar verbunden. Wird ein Siloinnenüberdruck von 0,1 bar (statischer Ansprechdruck p_{stat}) überschritten, so gibt die Klappe den Entlastungsschlot durch Aufklappen frei. Welle und Klappe sind starr miteinander verbunden, so dass sich die Welle beim Öffnen der Klappe mitdreht. Ein Ende der Welle ist mit der Messachse eines Inkremental-Drehgebers verschraubt. Deshalb gibt der Drehgeber Spannungsimpulse aufgrund der Drehbewegung der Klappe ab, wobei auf jedes zehntel² Grad Drehung ein Impuls kommt. Ein Digital-Analog-Wandler³ (DAC) wandelt die Impulse in eine mit dem Drehwinkel steigende Spannung um, welche ebenfalls mit dem Transienten-Rekorder aufgezeichnet wird. Parallel zu dieser Messanordnung werden die Impulse des Inkremental-Drehgebers direkt über eine Impulzzählkarte in den Speicher eines Rechners eingelesen und anschließend über eine spezielle Software in eine $\varphi(t)$ -Darstellung aufgearbeitet.

Zusätzlich ist im Abstand r_b von der Drehachse ein piezoelektrischer Beschleunigungsmesser so auf dem Entlastungsdeckel angebracht, dass die Beschleunigung in Richtung der Kreisbahntangente der sich öffnenden Klappe in Abhängigkeit von der Zeit gemessen werden kann. Das Stromsignal des Beschleunigungsmessers wird auf den Ladungsverstärker gegeben und das von dort ausgehende Spannungssignal wird im Transienten-Rekorder aufgezeichnet.

Der Zeitpunkt der beginnenden Klappenöffnung wird durch eine knapp oberhalb des Deckels montierte Lichtschranke erfasst. Auch deren Signal wird vom Transienten-Rekorder registriert. Schließlich werden alle Daten im Speicher des Transienten-Rekorders auf einen Computer übertragen und dort dauerhaft gespeichert.

2.2.3 Versuchsdurchführung

In der Zeit von September bis November 1994 wurden 37 Staubexplosionsversuche auf dem Versuchsgelände der BGN in Kappelrodeck (Schwarzwald) durchgeführt. Die Rahmenbedingungen waren:

- Behälter: Volumen = 9,4 m³; Höhe/Durchmesser = 1,5
- Entlastung: Volle Entlastungsfläche = 0,484 m²; Entlastungsklappe mit rund 65° freiem Bewegungswinkel; statischer Ansprechdruck = 0,1 bar
- Versuchsstaub: Maisstärke
- Zündung: im Zentrum des Silos mit einem Energieinhalt von 10 kJ

In Tabelle 2.3 sind alle weiteren Rahmenbedingungen und Versuchsparameter der Einzelversuche zusammengestellt.

Nach jeweils 2 bis 3 Versuchen wurde der statische Ansprechdruck p_{stat} der Druckentlastungsklappe überprüft. Dabei wurde die Klappe über eine Kraftmessuhr an einem Kranhaken befestigt und der Zug nach oben langsam erhöht. Wenn sich die Klappe bei einem Druck von 0,1 bar entsprechenden Kraft öffnete, konnte mit den Explosionsversuchen fortgefahren werden. Andernfalls wurde an einer Justierschraube der Klappenschließvorrichtung die Ansprechkraft verändert und die Testprozedur wiederholt.

²Auch 0,2°- bzw. 0,4°-Schritte sind möglich.

³Schaltplan siehe Kapitel 5.

Nr.	T [°C]	p [mbar]	F [%]	m [kg]	Θ_K [kg · m ²]	K_{St}^* $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	c_s $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$	t_v [s]
0	-	-	-	14,3	3,45	100	1000	1,30
1	10	997	70	14,3	3,45	100	1000	1,30
2	9	997	74	14,3	3,45	100	1000	1,30
3	11	1001	77	14,3	3,45	100	1000	1,30
4	11	1000	77	25,3	6,54	100	1000	1,30
5	11	1003	50	25,3	6,54	100	1000	1,30
6	12	1003	60	25,3	6,54	100	1000	1,30
7	11	1002	72	36,3	9,63	100	1000	1,30
8	8	993	75	36,3	9,63	100	1000	1,30
9	3	991	72	36,3	9,63	100	1000	1,30
10	6	990	70	47,0	12,64	100	1000	1,30
11	6	988	69	47,0	12,64	100	1000	1,30
12	6	984	71	47,0	12,64	100	1000	1,30
13	6	983	71	14,3	3,45	130	925	1,11
14	6	982	75	14,3	3,45	130	925	1,11
15	5	975	80	25,3	6,54	130	925	1,11
16	7	975	73	25,3	6,54	130	925	1,11
17	7	975	71	36,3	9,63	130	925	1,11
18	8	983	93	36,3	9,63	130	925	1,11
19	8	983	93	47,0	12,64	130	925	1,11
20	7	983	93	47,0	12,64	130	925	1,11
21	8	983	93	47,0	12,64	160	850	0,97
22	9	982	93	47,0	12,64	160	850	0,97
23	6	982	93	36,3	9,63	160	850	0,97
24	7	982	93	36,3	9,63	160	850	0,97
25	7	982	93	25,3	6,54	160	850	0,97
26	5	987	93	25,3	6,54	160	850	0,97
27	5	986	93	14,3	3,45	160	850	0,97
28	7	986	93	14,3	3,45	160	850	0,97
29	9	993	75	14,3	3,45	200	750	0,82
30	9	992	74	14,3	3,45	200	750	0,82
31	7	990	83	25,3	6,54	200	750	0,82
32	10	988	76	25,3	6,54	200	750	0,82
33	8	986	93	36,3	9,63	200	750	0,82
34	8	985	93	36,3	9,63	200	750	0,82
35	8	986	93	36,3	9,63	200	750	0,82
36	8	985	93	47,0	12,64	200	750	0,82

Tabelle 2.3: Rahmenbedingungen und Parameter der 37 durchgeführten Staubexplosionsversuche. Es bedeuten: T Lufttemperatur, p Luftdruck und F Luftfeuchtigkeit. Der angegebene K_{St}^* -Wert gilt für eine Berstscheiben-Druckentlastung des Silobehälters und stellt hier deshalb lediglich ein Synonym für die verwendete Staubkonzentration und Zündverzögerungszeit dar. Alle anderen Größen sind im laufenden Text beschrieben. Die Versuchsnummer 0 steht für ein Testexperiment, welches der Überprüfung der Diagnostik diene. Das Trägheitsmoment ist mit einem Fehler von etwa $\pm 0,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ behaftet und dominiert damit die Fehler aller anderen Größen.

Ebenfalls nach jeweils 2 bis 3 Versuchen wurde die Klappe aus einer Startposition von rund 65° frei fallen gelassen und der Winkel über der Zeit aufgenommen. Daraus wurden gemäß Abschnitt 1.1.6 das Drehmoment aufgrund der Reibung im Klappenscharnier abgeleitet.

Die Beschwerung der Druckentlastungsklappe wurde durch Anschrauben von runden Stahlplatten mit 11 kg bzw. 10,7 kg Gewicht erreicht. Aus dem Plattendurchmesser von 0,758 m errechnet sich ein zusätzliches Trägheitsmoment von $3,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ bzw. $3,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ pro Platte.

Entsprechend den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Methoden wurden nach Beendigung der Explosionsversuche die Schwerpunkte und Trägheitsmomente der Entlastungsklappen-Fangbügel (Nummer 8 in Abbildung 2.3) bestimmt.

Fangbügel	m [kg]	S [m]	Θ_B [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
vorne	36,0	0,46	12,06
mitte	30,8	0,49	10,47
hinten	44,8	0,51	17,77

Tabelle 2.4: Physikalische Eigenschaften der Entlastungsklappen-Fangbügel.

Im Verlauf der Versuchsdurchführung musste die Entlastungsklappe durch Schweißarbeiten mechanisch verstärkt werden, damit sie den massiven Belastungen über 36 Experimente hinweg standhalten konnte. Weiterhin wurde der Klappenschließmechanismus modifiziert, damit das einzustellende p_{stat} besser reproduziert werden konnte.

2.2.4 Versuchsergebnisse

Abgesehen von dem eingesetzten Beschleunigungsmesser (Nummer 6 in Abbildung 2.3), der nur bei circa einem Drittel aller Versuche brauchbare Messwerte lieferte, verlief die Durchführung der 36 Experimente weitgehend problemlos. Abbildung 2.4 zeigt einen bearbeiteten Ausschnitt einer Transienten-Rekorder-Fahne.

Der Beschleunigungsmesser erwies sich als wenig geeignet, weil die Klappe während der Entlastungsphase kurzzeitigen und heftigen Beschleunigungen ausgesetzt war und aufgrund dessen in Schwingungen versetzt wurde. Die dadurch entstandenen Schwingungssignale lagen oft in der gleichen Größenordnung wie das zu messende Signal. Die sehr langen Messkabel (Sicherheitsabstand) und die Kleinheit der Piezoströme des Beschleunigungsmessers beeinflussten das Verhältnis von Mess- zu Störsignal zusätzlich negativ.

Zur Bestimmung des maximalen reduzierten Überdruckes $p_{\text{red,max}}$ wird die Differenz aus dem erreichten Druckmaximum und dem Druckwert zum Zeitpunkt der Gemischzündung gebildet. Letzterer wird mit Hilfe des Zündsignals (Abbildung 2.4) ermittelt. Der maximale zeitliche Druckanstieg $\left.\frac{dp}{dt}\right|_{\text{max}}$ ergibt sich aus dem Maximum der ersten zeitlichen Ableitung der untersuchten Druckkurve. Schließlich ist der dynamische Ansprechdruck⁴ p_{dyn} die Differenz der Druckwerte zu Beginn der Klappenöffnung und zu Beginn des Staubeintrages in das Silo. Der Zeitpunkt der Klappenöffnung folgt aus dem Lichtschrankensignal bzw. aus dem Drehgebersignal (Abbildung 2.4). In Tabelle 2.5 sind die Werte für $p_{\text{red,max}}$, $\left.\frac{dp}{dt}\right|_{\text{max}}$ und p_{dyn} , die aus den Messungen der Versuche 1 bis 36 abgeleitet wurden, zusammengestellt.

⁴Das ist der Druckwert, bei dem sich die Druckentlastungsklappe im Versuch zu öffnen beginnt.

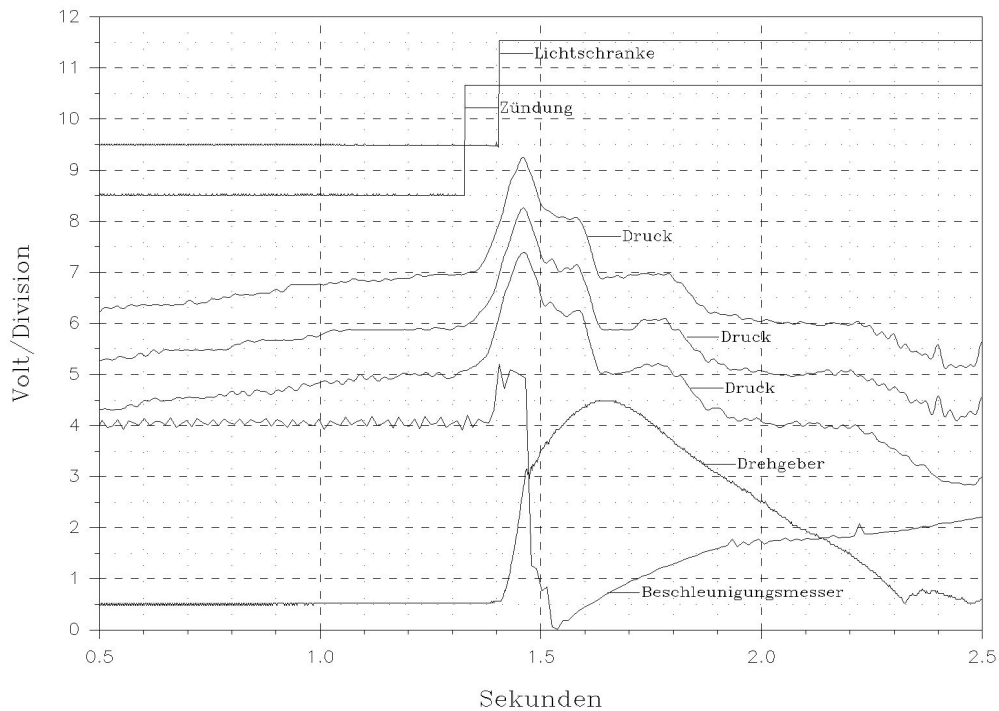


Abbildung 2.4: Bearbeiteter Ausschnitt des Transienten-Rekorder-Ausdruckes von Versuch Nummer 4. Die Druckkurven sind einmal, die Beschleunigungsmesserkurve ist zweimal geglättet dargestellt. Die Kurvenhöhen und -lagen entsprechen nicht dem Originalausdruck.

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$p_{\text{red,max}}$ [bar]	-	0,14	0,11	0,13	0,20	0,15	0,26	0,29	0,27	0,23	0,26	0,34
$\frac{dp}{dt} _{\text{max}}$ $\frac{\text{bar}}{\text{s}}$	-	2,59	1,80	1,62	2,92	2,22	4,06	4,78	4,32	3,04	3,80	5,74
p_{dyn} [bar]	-	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,10	0,11	0,11
Versuch Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$p_{\text{red,max}}$ [bar]	0,23	0,24	0,20	0,23	0,25	0,30	0,51	0,44	0,55	0,60	0,57	0,45
$\frac{dp}{dt} _{\text{max}}$ $\frac{\text{bar}}{\text{s}}$	3,26	4,13	3,14	3,03	4,74	5,49	10,1	9,33	11,4	12,1	10,4	9,10
p_{dyn} [bar]	0,08	0,08	0,08	0,07	0,09	0,10	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,09
Versuch Nr.	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$p_{\text{red,max}}$ [bar]	0,29	0,48	0,31	0,35	0,87	0,77	0,91	0,80	1,64	1,08	1,24	1,16
$\frac{dp}{dt} _{\text{max}}$ $\frac{\text{bar}}{\text{s}}$	6,30	11,2	6,00	7,47	13,5	13,4	16,5	15,7	30,7	19,3	25,0	23,0
p_{dyn} [bar]	0,05	0,09	0,10	0,12	0,12	0,09	0,10	0,09	0,13	0,12	0,14	0,1

Tabelle 2.5: Auflistung des gemessenen maximalen reduzierten Überdruckes $p_{\text{red,max}}$, des maximalen zeitlichen Druckanstieges $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ und des dynamischen Ansprechdruckes p_{dyn} aller Einzelversuche. Jeder Einzelwert ist das Mittel aus den abgeleiteten Werten der jeweils drei Druckkurven.

Zur weiteren Untersuchung der Daten aus Tabelle 2.5 wurde über die Werte der Versuche gleicher Parametern gemittelt. Das Ergebnis dieser Mittelung ist in den Tabellen 2.6, 2.7 und 2.8 aufgelistet. Mit der Variante

$$p_{\text{red,max}} \approx \left[\left(3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\text{max}} \cdot K_{\text{St}} + \frac{1}{4} \cdot (p_{\text{stat}} - 0,1) \right) \cdot \frac{\sqrt[4]{V^3}}{A_E} \right]^{\frac{7}{4}} \cdot \exp \left(2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{K_{\text{St}}}{V^{\frac{3}{5}}} \cdot \sqrt{Q} \right) \quad K_{\text{St}} \equiv K_{\text{St}}^* \quad (2.10)$$

der Gleichung (2.9) lassen sich die Werte aus Tabelle 2.6 gut beschreiben, wie Abbildung 2.5 zu entnehmen ist. Der Klappenwiderstand Q wird dabei definiert als

$$Q = \frac{\Theta_K}{A_E \cdot h} \quad (2.11)$$

wobei A_E die Fläche der Entlastungsöffnung und h der Hebelarm, also der Abstand zwischen Drehachse und Kraftangriffspunkt ist. Der Exponentialfaktor in (2.10) wurde darum gewählt, damit die Formel für $Q \rightarrow 0$ (Berstscheibe) gegen die Berechnungsformel für Berstscheiben geht. Für p_{max} wurden näherungsweise 9 bar angesetzt.

$K_{\text{St}}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\bar{p}_{\text{red,max}} \pm \sigma \quad [\text{bar}]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47,0 [kg]
100	$0,125 \pm 0,015$	$0,160 \pm 0,028$	$0,272 \pm 0,014$	$0,274 \pm 0,046$
130	$0,235 \pm 0,008$	$0,214 \pm 0,014$	$0,278 \pm 0,025$	$0,475 \pm 0,038$
160	$0,330 \pm 0,030$	$0,385 \pm 0,095$	$0,510 \pm 0,057$	$0,575 \pm 0,025$
200	$0,822 \pm 0,049$	$0,855 \pm 0,058$	$1,321 \pm 0,235$	$1,157 \pm 0,017$

Tabelle 2.6: Mittelwerte für den maximalen reduzierten Explosionsdruck. In die Mittelung gingen jeweils die Daten aus den Versuchen mit gleichen Randbedingungen ein. Die Standardabweichung σ ist angegeben.

Mit (2.10) eingesetzt in die Gleichung (zur Begründung siehe (2.18) bzw. Abschnitt 3.3)

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}} \approx 1,818 \cdot \frac{K_{\text{St}}}{\sqrt[3]{V}} \cdot \frac{p_{\text{red,max}}}{p_{\text{max}}} = 1,818 \cdot \frac{200}{\sqrt[3]{9,4}} \cdot \frac{p_{\text{red,max}}}{9} \quad K_{\text{St}} \neq K_{\text{St}}^* \quad (2.12)$$

kann Tabelle 2.7 in guter Näherung reproduziert werden, wie Abbildung 2.6 zeigt.

$K_{\text{St}}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\left. \frac{dp}{dt} \right _{\text{max}} \pm \sigma \quad \left[\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47,0 [kg]
100	$2,197 \pm 0,397$	$2,251 \pm 0,531$	$4,387 \pm 0,295$	$4,194 \pm 1,134$
130	$3,697 \pm 0,434$	$3,084 \pm 0,054$	$5,114 \pm 0,377$	$9,694 \pm 0,367$
160	$6,735 \pm 0,732$	$8,743 \pm 2,440$	$9,732 \pm 0,632$	$11,74 \pm 0,333$
200	$13,44 \pm 0,045$	$16,12 \pm 0,384$	$25,03 \pm 4,673$	$22,97 \pm 0,469$

Tabelle 2.7: Mittelwerte für den maximalen zeitlichen Druckanstieg. Sonst wie bei Tabelle 2.6.

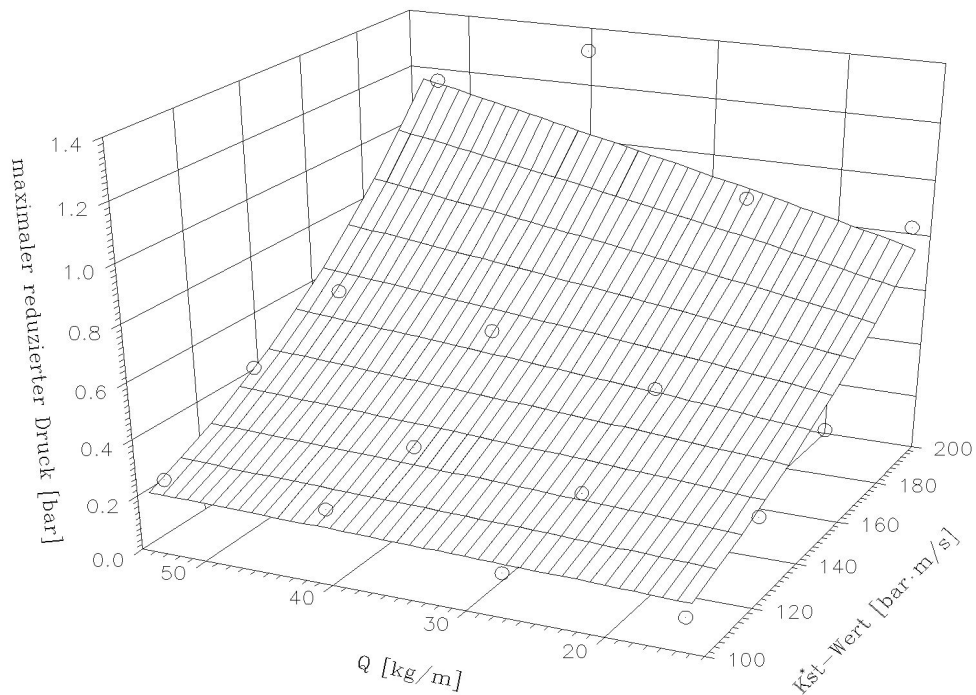


Abbildung 2.5: Werte aus Tabelle 2.6 dargestellt im dreidimensionalen Koordinatensystem. Zum Vergleich ist die Fit-Gleichung (2.10) gezeigt. Der Korrelationskoeffizient R^2 zwischen Datenpunkten und Fit beträgt rund 0,9.

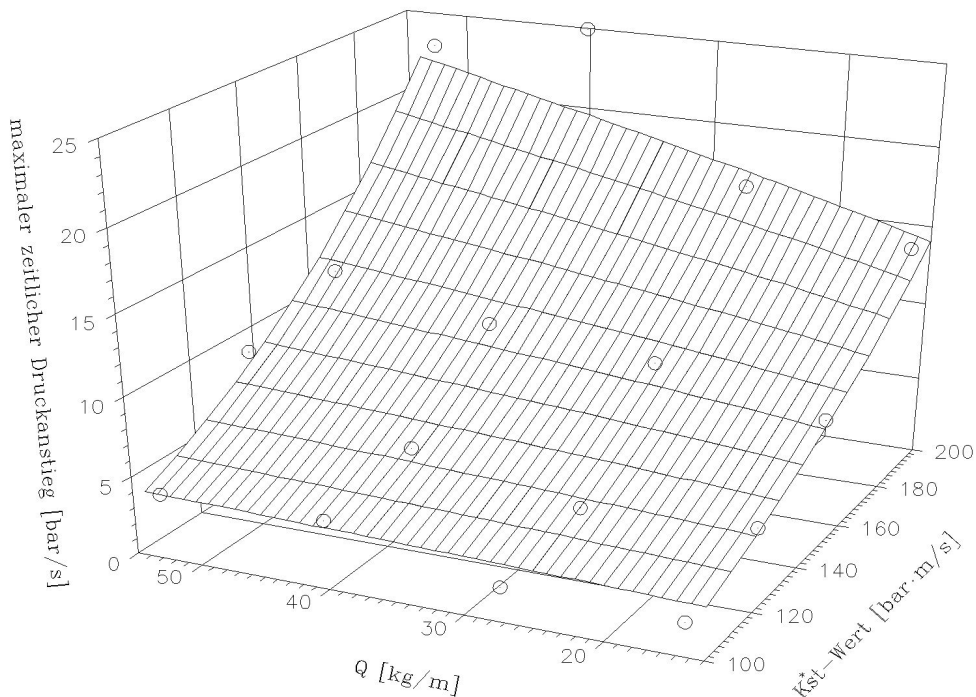


Abbildung 2.6: Datenpunkte aus Tabelle 2.7 und Fit-Gleichung (2.12) im dreidimensionalen Koordinatensystem. Der Korrelationskoeffizient R^2 zwischen Datenpunkten und Fit beträgt etwa 0,92.

Die Streuung der Messpunkte ist in erster Linie auf die kaum zu vermeidende Schwankung von p_{dyn} zurückzuführen (siehe Tabelle 2.8). Je später sich die Entlastungsklappe nach der Zündung öffnet ($p_{\text{dyn}} > p_{\text{stat}}$), desto größer werden $p_{\text{red,max}}$ und $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ sein, da das Abblasen des Gases und damit der Druckverlust erst in einem weiter fortgeschrittenen Stadium des Explosionsverlaufes einsetzen kann. Umgekehrt setzt das Abblasen frühzeitig ein, wenn die Entlastungsklappe unterhalb des vorgegebenen Ansprechdruckes öffnet ($p_{\text{dyn}} < p_{\text{stat}}$). Bevor die maximale Verbrennungsrate erreicht ist, kommt die Druckreduzierung schon maßgeblich zum tragen und $p_{\text{red,max}}$ bzw. $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ werden vergleichsweise gering bleiben. Unglücklicherweise ist nicht klar, wie $p_{\text{red,max}}$ und $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ quantitativ von p_{dyn} abhängen. Die Anzahl der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche ist zu gering, um einen statistisch vernünftigen Zusammenhang zwischen diesen Größen ableiten zu können. Das muss anderen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

$K_{\text{St}}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\bar{p}_{\text{dyn}} \pm \sigma \quad [\text{bar}]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47,0 [kg]
100	$0,085 \pm 0,005$	$0,100 \pm 0,000$	$0,113 \pm 0,009$	$0,107 \pm 0,005$
130	$0,080 \pm 0,000$	$0,075 \pm 0,005$	$0,095 \pm 0,005$	$0,105 \pm 0,005$
160	$0,110 \pm 0,010$	$0,070 \pm 0,020$	$0,085 \pm 0,005$	$0,095 \pm 0,005$
200	$0,105 \pm 0,015$	$0,095 \pm 0,005$	$0,130 \pm 0,008$	$0,100 \pm 0,000$

Tabelle 2.8: Mittelwerte für den dynamischen Ansprechdruck. Sonst wie bei Tabelle 2.6.

2.2.5 Auswertung

Aus der mit Hilfe des Drehgebers direkt gemessenen Abhängigkeit des Klappenöffnungswinkels von der Zeit, können sowohl die Kraftverhältnisse an der Klappe und deren Abfangmechanismus, als auch die Rotationsenergie der Klappe in Abhängigkeit von der Zeit abgeleitet werden. Dabei bedient man sich der in Kapitel 1 hergeleiteten Zusammenhänge. Wegen der sehr schlechten Qualität der wenigen verwertbaren Beschleunigungsmesskurven können diese nur zur groben Bestätigung der aus den Drehgeberkurven abgeleiteten Beschleunigungen herangezogen werden. Im Rahmen der Messfehler wird aber Übereinstimmung erzielt.

2.2.5.1 Kraftverhältnisse an der Entlastungsklappe

Zunächst wird mit Hilfe eines Rechners der bestmögliche Fit in die Messpunkte $\varphi(t)$ des Bereiches der freien Klappenbewegung (etwa 3° bis 65°) eingepasst. Die erste zeitliche Ableitung der Fit-Gleichung liefert anschließend die Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$. Die zweite Ableitung nach der Zeit führt auf die Winkelbeschleunigung $\varepsilon(t)$. Aus den Formeln (1.8), (1.15) und (1.11) folgen daraus die radiale und tangentiale Kraft auf das Scharnier und die Normalkomponente⁵ der klappenbeschleunigenden Kraft. Letztere greift im Mittelpunkt des kreisförmigen Schlotverschlussteiles der Entlastungsklappe an. Die Gesamtkraft auf das Entlastungsklappenscharnier folgt aus der tangentialen und radialen Kraftkomponente auf das Scharnier (Kräfteparallelogramm). Die am häufigsten auftretenden Formen der Kraftverläufe können den Abbildungen 2.7 bis 2.10 entnommen werden. Wie dort zu sehen ist, verläuft die Klappenwinkelbeschleunigung $\varepsilon(t)$ nicht monoton, sondern in zwei mehr oder minder stark

⁵Der Vektor mit dem Betrag 1, der stets senkrecht auf der Klappenfläche steht, heißt Normale. Siehe hierzu auch Abbildung 1.4.

ausgeprägten Beschleunigungsphasen. Dieses Phänomen zeigt sich bei den Auswertungen fast aller Versuche. Besonders die Klappen mit vergleichsweise geringem Trägheitsmoment Θ_K beschleunigen in zwei Etappen (Abbildung 2.7). Schwere Klappen beschleunigen gleichmäßiger, jedoch auch über zwei Maxima (Abbildung 2.10).

Dieses Verhalten hat folgende qualitative Erklärung: Nach der Zündung beginnt der explosionsbedingte Druckanstieg im Silo. Im Idealfall öffnet sich die Entlastungsklappe bei Erreichen des statischen Ansprechdruckes, wobei sie einen etwa konstanten Drehimpuls durch die sich entspannende Schließmechanik mitbekommt. Parallel dazu erfolgt die Klappenwinkelbeschleunigung $\varepsilon(t)$ durch den auf der Klappenfläche lastenden Behälterinnendruck, der aufgrund seines stetigen Anstieges eine wachsende Klappenbeschleunigung hervorruft. Mit größer werdendem Klappenöffnungswinkel beginnt das seitliche Abströmen des Siloinhaltes, weshalb der Druck auf die Entlastungsklappe gegenüber dem Behälterinnendruck abfällt (Bernoulli-Gleichung). Weil dieser Druckabfall schneller größer wird als der Druckanstieg im Silo, kommt es zur Ausprägung eines ersten Beschleunigungsmaximums. Hat die Entlastungsklappe etwa $\frac{2}{3}$ ihre Entlastungsfläche freigegeben ($\varphi(t) \approx 20^\circ$; siehe Abschnitt 2.2.5.4), setzt das massive Abblasen des Siloinhaltes ein. Die Beschleunigung der Entlastungsklappe wird nun durch den Strömungswiderstand verursacht, den die Klappe dem ausströmenden Siloinhalt bietet. Dieses Drehmoment ist proportional zur Querschnittsfläche des angeströmten Körpers, zum Reibungskoeffizienten, zum Hebel, zur Dichte des strömenden Mediums und zum Quadrat der Relativgeschwindigkeit $v_{\text{rel}}(t)$ zwischen Klappe und ausströmendem Medium (siehe Formel (1.34)). Wegen des inzwischen schnell steigenden Siloinnendruckes wächst $v_{\text{rel}}^2(t)$ so stark, dass das Schrumpfen der anderen Größen aufgrund des zunehmenden Klappenöffnungswinkels dominiert wird. Die Beschleunigung nimmt folglich wieder zu.

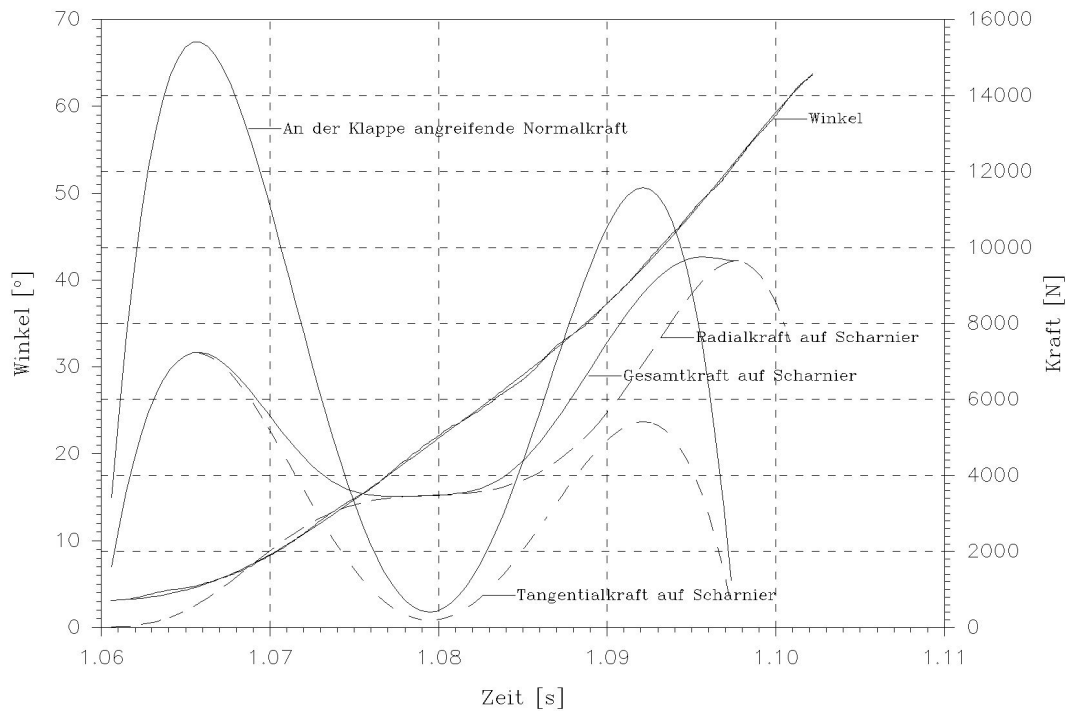


Abbildung 2.7: Auswertung des Versuches 27 ($K_{\text{St}}^* = 160 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $m = 14,3 \text{ kg}$) bezüglich der Kraftverhältnisse an der Entlastungsklappe während der freien Öffnungsphase. Die Kennzeichnung „Winkel“ markiert sowohl die Messpunkte als auch den Fit.

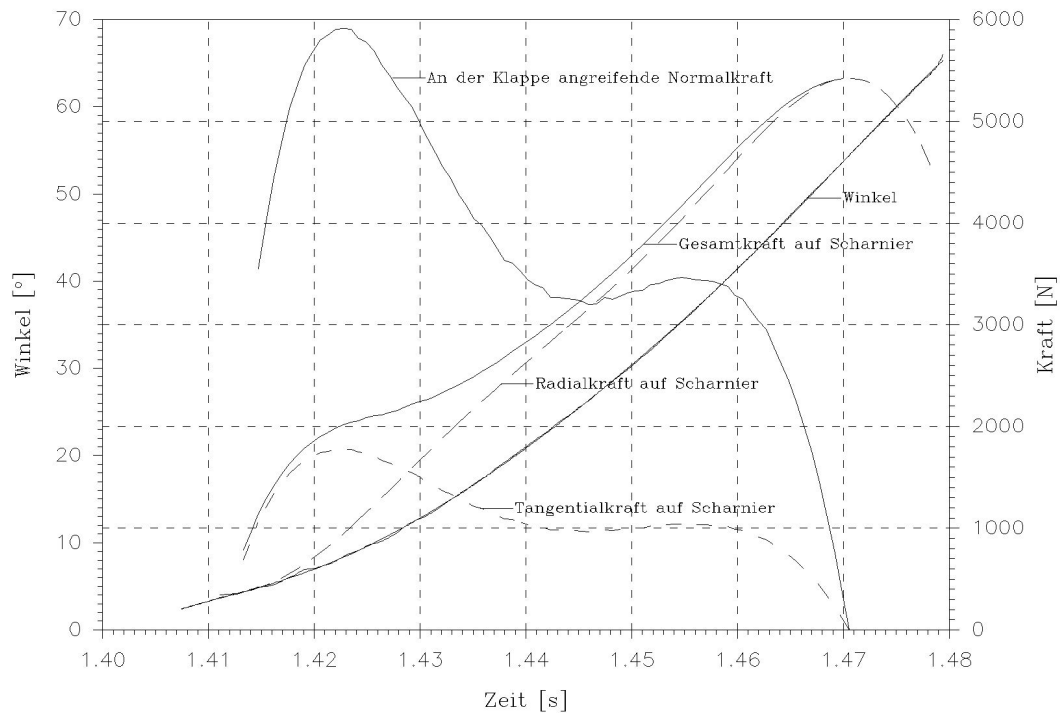


Abbildung 2.8: Auswertung des Versuches 4 ($K_{St}^* = 100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $m = 25,3 \text{ kg}$). Weiteres siehe Abbildung 2.9. Die dort erscheinenden zwei Beschleunigungsphasen sind hier nicht mehr so stark ausgeprägt.

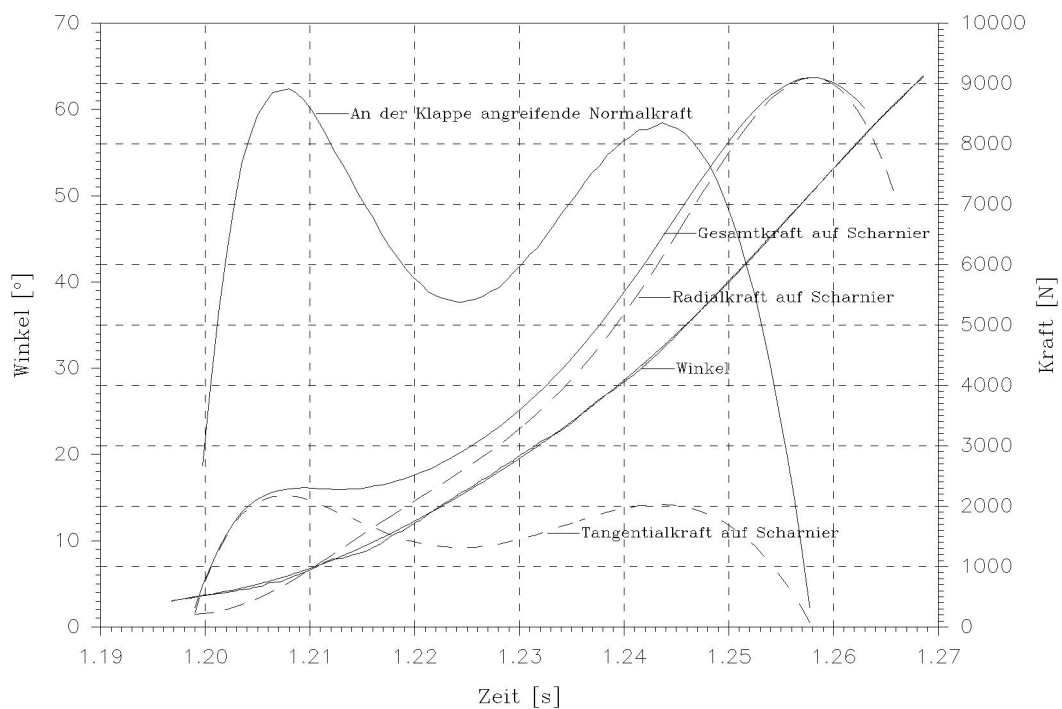


Abbildung 2.9: Auswertung des Versuches 17 ($K_{St}^* = 130 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $m = 36,3 \text{ kg}$). Wieder treten zwei Beschleunigungsmaxima auf. Sonst wie bei den Abbildungen 2.7 und 2.8.

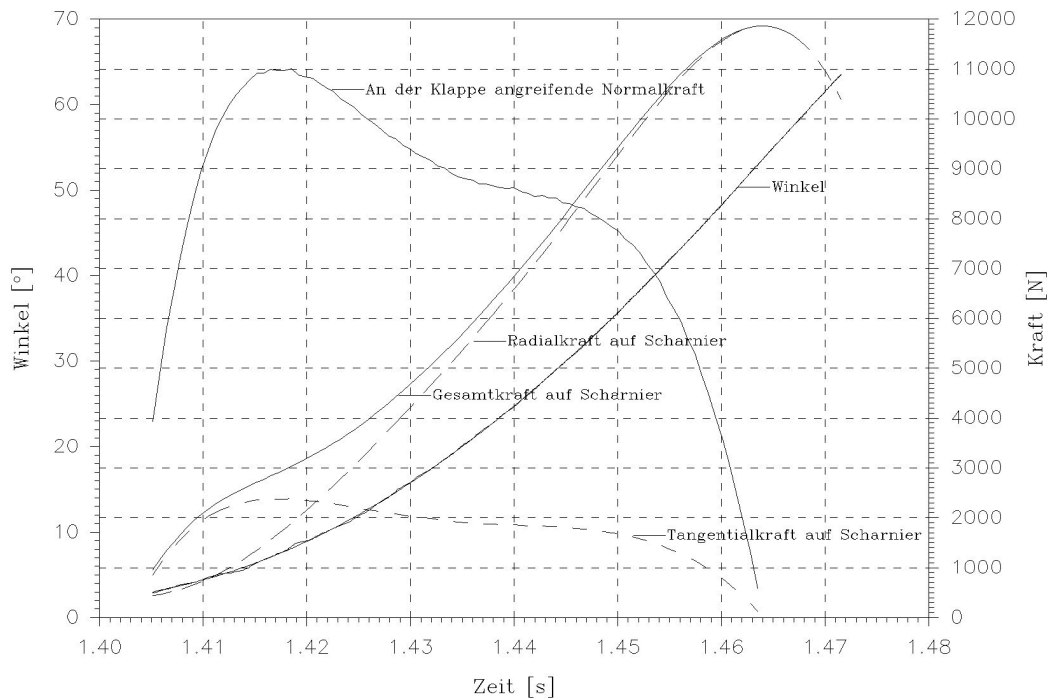


Abbildung 2.10: Auswertung des Versuches 12 ($K_{St}^* = 100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $m = 47 \text{ kg}$). Zwei Beschleunigungsmaxima sind kaum noch zu erkennen.

Schließlich dreht sich die Entlastungsklappe so weit aus dem Gasstrom heraus, dass die Dominanz von $v_{\text{rel}}^2(t)$ verloren geht und die Klappenbeschleunigung wieder sinkt und letztendlich negativ wird (Luftwiderstand, Scharnierreibung). Die quantitative Behandlung dieses Vorganges erfolgt in Abschnitt 3.1.1.

Die Ursache für das beobachtete Absinken der Schwankungsbreite der Klappenwinkelbeschleunigung mit zunehmender Klappenmasse ist in der größer werdenden Massenträgheit der Klappen zu sehen. Mit steigender bzw. sinkender Explosionsheftigkeit wird dieser Effekt abgeschwächt bzw. verstärkt.

Die maximal in Erscheinung getretenen Scharnierkräfte $F_{S_{\text{max}}}$ sind über die Versuche gleicher Bedingungen gemittelt worden und in der Tabelle 2.9 aufgelistet. Eine grafische Darstellung der maximalen Scharnierkraft als Funktion von $p_{\text{red,max}}$ bzw. $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ und dem Klappenwiderstand Q findet sich in den Abbildungen 2.11 und 2.12. Weil die Kraft auf die Entlastungsklappe bzw. auf das Klappenscharnier unabhängig von Q Null sein muss wenn $p_{\text{red,max}}$ bzw. $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ Null ist, ist die Form

$$f(x, y, z, \dots) = \text{Konstante} \cdot x^a \cdot y^b \cdot z^c \cdot \dots \quad (2.13)$$

für die Fit-Gleichungen durch die Datenpunkte naheliegend. Wie man aus der Tabelle bzw. Grafik ersieht, treten Kraftspitzen bis zu einigen 10 kN am Scharnier der Klappe auf.

Die Messpunkte aus Abbildung 2.11 lassen sich in guter Näherung ($R^2 = 0,96$) durch die Fit-Gleichung

$$F_{S_{\text{max}}} = 4633 \cdot \sqrt{p_{\text{red,max}}} \cdot \sqrt[5]{Q^2} \quad (2.14)$$

beschreiben. Ähnliches gilt für die Daten aus Abbildung 2.12. Diese folgen der Fit-Gleichung ($R^2 = 0,96$)

$$F_{S_{\text{max}}} = 1069 \cdot \sqrt{\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}} \cdot \sqrt[5]{Q^2} \quad (2.15)$$

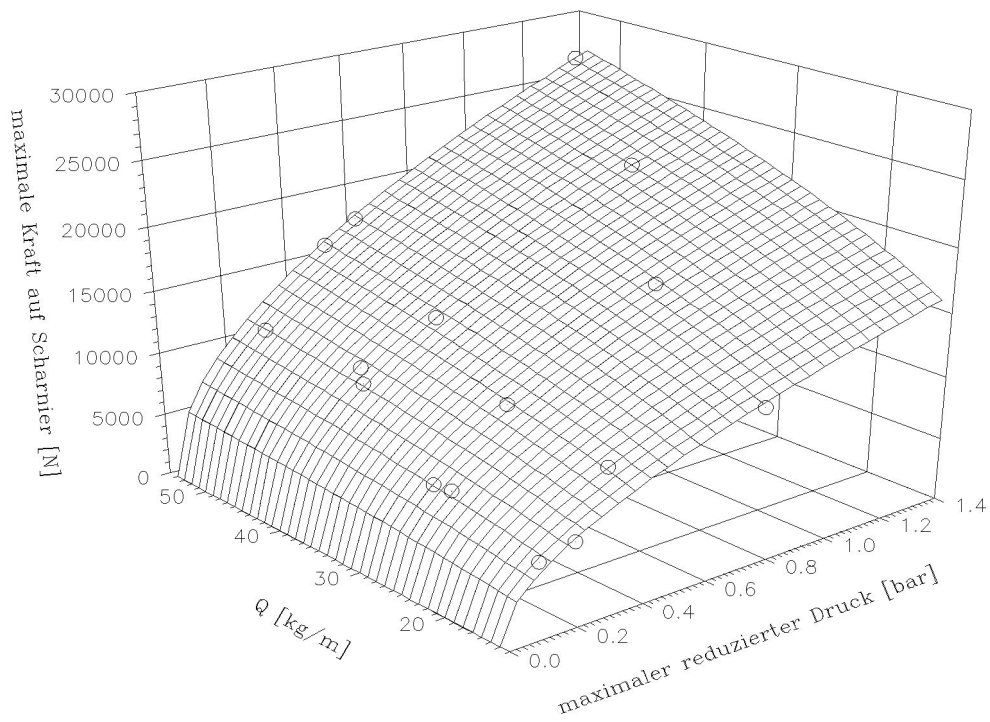


Abbildung 2.11: Maximale Kraft auf das Klappenscharnier in Abhängigkeit des Klappenwiderstandes Q und des maximalen reduzierten Druckes.

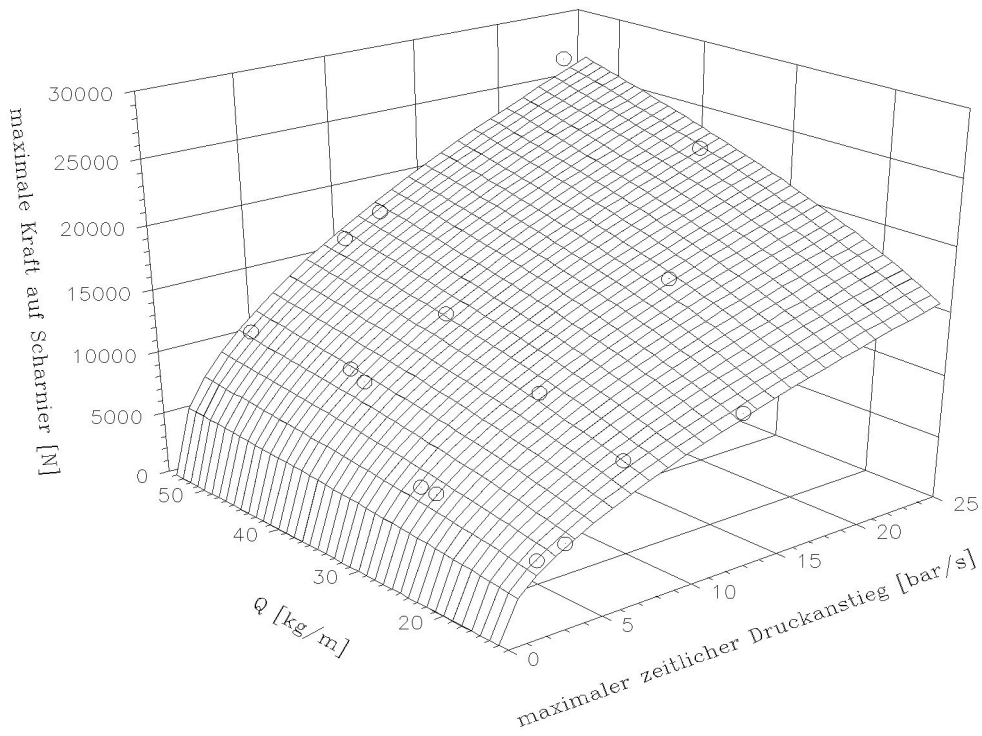


Abbildung 2.12: Maximale Kraft auf das Klappenscharnier als Funktion des Klappenwiderstandes Q und des maximalen zeitlichen Druckanstieges.

$K_{St}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\bar{F}_{S_{\max}} \pm \sigma \quad [\text{N}]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47 [kg]
100	5211 \pm 738	6533 \pm 1001	11034 \pm 1084	10663 \pm 1208
130	5792 \pm 237	5630 \pm 471	9705 \pm 606	16291 \pm 2791
160	10615 \pm 864	11011 \pm 3670	13391 \pm 638	17831 \pm 353
200	11319 \pm 819	17117 \pm 184	21651 \pm 3173	26500*

Tabelle 2.9: Mittelwerte für die maximal auftretende Scharnierkraft in Abhängigkeit von K_{St}^* -Wert und Klappenmasse m . Der mit * gekennzeichnete Wert ist eine Schätzung, weil für diesen letzten Messpunkt aufgrund einer irreparablen Klappenverformung keine brauchbaren Daten bezüglich der Scharnierkraft vorliegen.

Wie bei den Scharnierkräften wurden die maximal aufgetretenen Normalkräfte $F_{N_{\max}}$ auf die Entlastungsklappe über die Versuche gleicher Bedingungen gemittelt und in der Tabelle 2.10 zusammengestellt. Weil die Normalkraft unabhängig von den Klappeneigenschaften wieder Null sein muss wenn $p_{\text{red}_{\max}}$ bzw. $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max}$ Null ist, sollten Fit-Gleichungen für die gemittelten Normalkraftwerte wieder die Form (2.13) haben. Aufgrund der Tatsache, dass die Normalkraft auf die Klappe in erster Linie von der Größe der Klappenfläche abhängt, ist in diesem Fall der Klappenwiderstand Q eine unbrauchbare Variable. Besser geeignet ist die Entlastungsfläche A_E und das Klappenträgheitsmoment Θ_K . Damit ergibt sich

$$F_{N_{\max}} = 49128 \cdot A_E \cdot p_{\text{red}_{\max}} \cdot \sqrt[5]{\Theta_K} \quad (2.16)$$

mit einem Korrelationskoeffizienten von rund 0,9 (Abbildung 2.13). Die Abhängigkeit der maximalen Klappennormalkraft von $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max}$ wird durch

$$F_{N_{\max}} = 2573 \cdot A_E \cdot \left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max} \cdot \sqrt[5]{\Theta_K} \quad (2.17)$$

beschrieben. Hier beträgt der Korrelationskoeffizient rund 0,91 (Abbildung 2.14). Fit-Gleichungen und Datenauswertung zeigen, dass Normalkräfte auf die Entlastungsklappe von mehreren 10 kN auftreten können.

$K_{St}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\bar{F}_{N_{\max}} \pm \sigma \quad [\text{N}]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47 [kg]
100	8683 \pm 3361	7764 \pm 1320	13845 \pm 5342	10260 \pm 543
130	7454 \pm 596	5945 \pm 484	9269 \pm 356	18019 \pm 3424
160	16539 \pm 1127	11941 \pm 4976	14008 \pm 1457	17346 \pm 35
200	18285 \pm 781	26508 \pm 339	48282 \pm 4913	56111

Tabelle 2.10: Mittelwerte für die maximal auftretende Kraft in Richtung der Klappennormalen in Abhängigkeit von K_{St}^* -Wert und Klappenmasse m . Mittelwertbildung wie zuvor.

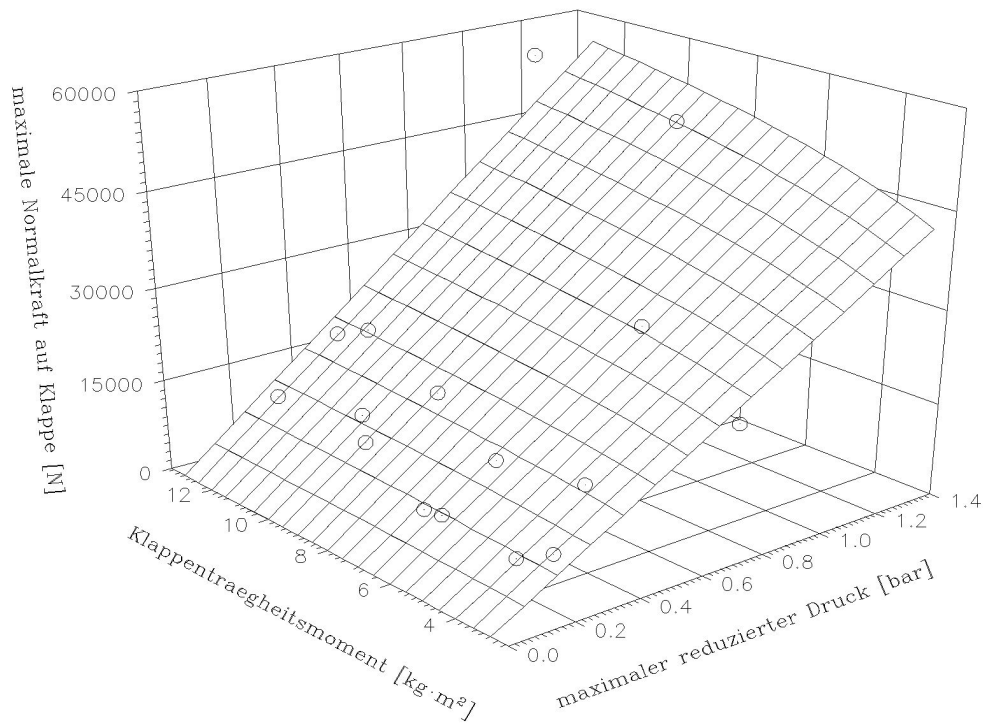


Abbildung 2.13: Maximale Normalkraft auf die Entlastungsklappe in Abhängigkeit des Klappenträgheitsmomentes Θ_K und des maximalen reduzierten Druckes.

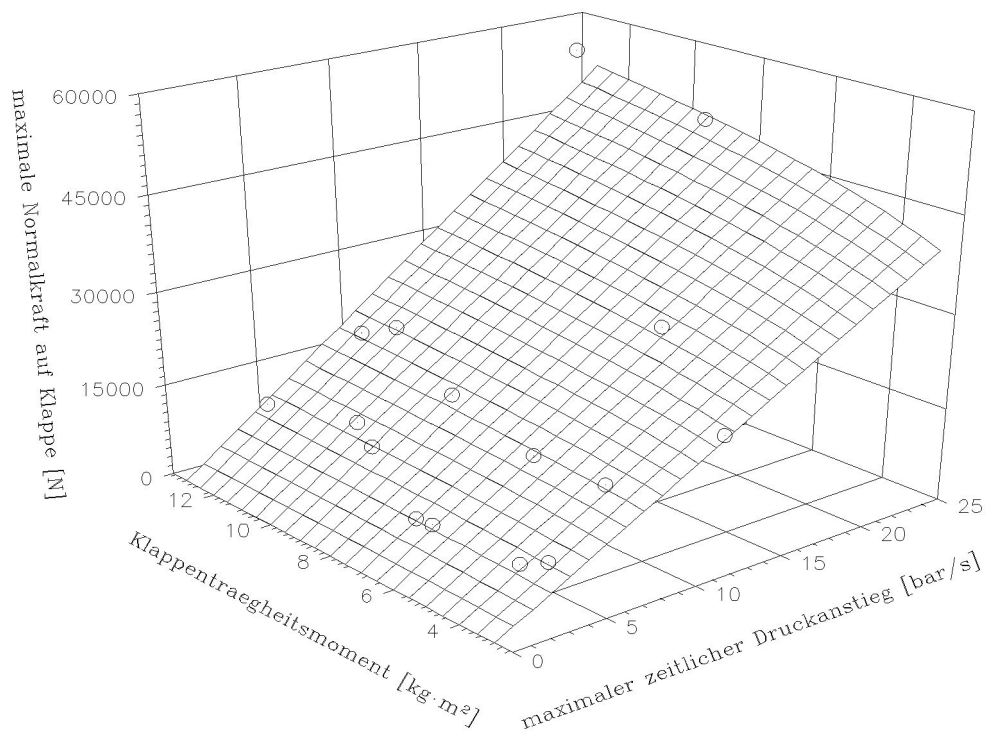


Abbildung 2.14: Maximale Normalkraft auf die Entlastungsklappe als Funktion des Klappenträgheitsmomentes Θ_K und des maximalen zeitlichen Druckanstieges.

Vergleicht man (2.14) mit (2.15), (2.16) mit (2.17) und (2.19) mit (2.20), so fallen die jeweils gleichen Potenzen der Variablen auf. Durch Gleichsetzen der entsprechenden Fit-Gleichungen lässt sich deshalb ein linearer Zusammenhang zwischen $p_{\text{red}_{\text{max}}}$ und $\left.\frac{dp}{dt}\right|_{\text{max}}$ konstruieren. Es ergibt sich

$$p_{\text{red}_{\text{max}}} = c \cdot \left.\frac{dp}{dt}\right|_{\text{max}} \quad c = 0,0529 \pm 0,0004 \quad (2.18)$$

wobei sich der angegebene Fehler in c aus der Mittelung über die drei aus den Vergleichen gewonnenen Einzelwerte ergibt. Eine Untersuchung von Druckdaten, welche durch Maisstärkeexplosionen an unserem 1 m³- und 60 m³-Behälter gewonnen wurden, scheinen (2.18) zu bestätigen. Man kann daraus schließen, dass zumindest für annähernd kubische Behälter ein einfacher Zusammenhang gemäß (2.18) existiert, wobei die Proportionalitätskonstante c volumen- und vermutlich staubabhängig ist.

Setzt man (2.10) bzw. (2.12) in (2.14) bis (2.17) ein, so können $F_{S_{\text{max}}}$ und $F_{N_{\text{max}}}$ als Funktion von K_{St}^* , Q , Θ_K , A_E , p_{stat} und V ausgedrückt werden. Der Nachweis der Allgemeingültigkeit von (2.14) bis (2.17) könnte z. B. durch Simulationsrechnungen gemäß Kapitel 3 erfolgen.

2.2.5.2 Rotationsenergie

Aus den mit Hilfe eines Rechners ermittelten Fit-Funktionen $\varphi(t)$ (siehe Abschnitt 2.2.5.1) kann durch einfache zeitliche Ableitung die Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ gefunden werden. Mit Gleichung (1.23) folgt daraus die Rotationsenergie E_{rot} in Abhängigkeit von der Zeit. In Abbildung 2.15 wird dies am Beispiel von Versuch Nummer 23 gezeigt.

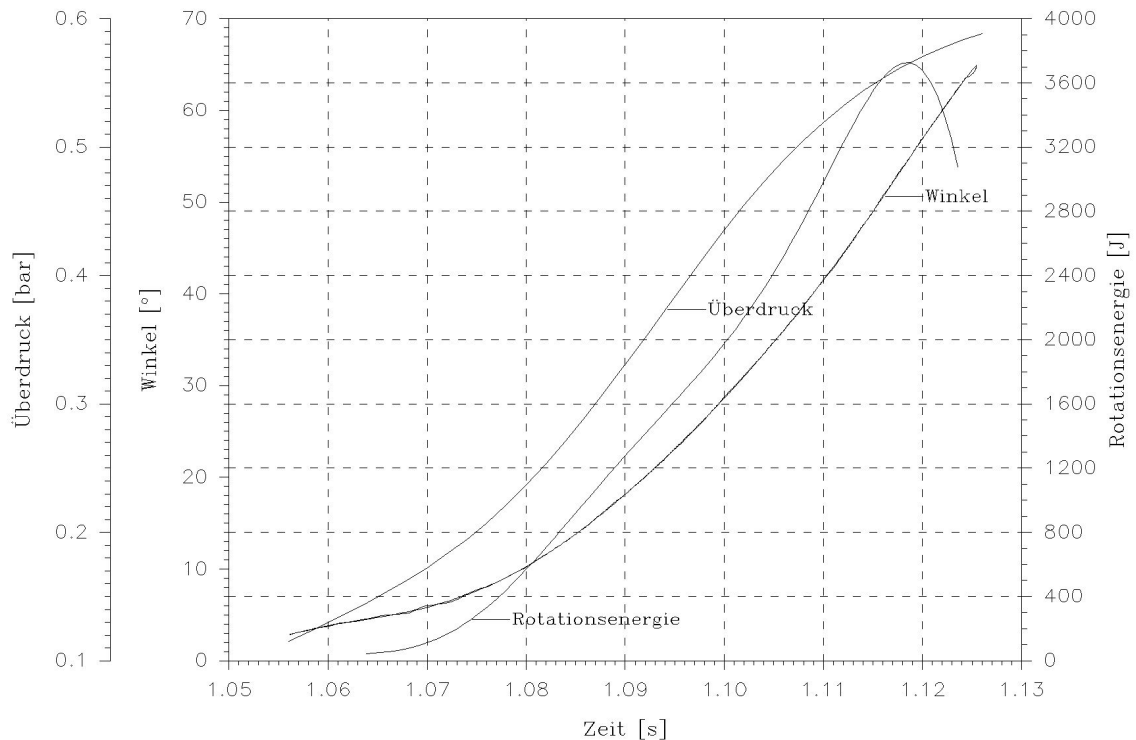


Abbildung 2.15: $\varphi(t)$, $E_{\text{rot}}(t)$ und $p(t)$ für den freien Klappenöffnungsvorgang bei Versuch 23.

Wie dort zu sehen ist, erreichte die Rotationsenergie $E_{\text{rot}}(t)$ den Maximalwert von rund 3700 J. Die am Beispiel von Versuch Nummer 23 demonstrierte Prozedur zur Bestimmung von $E_{\text{rot}}(t)$ wurde auf die Messwerte $\varphi(t)$ aller Experimente angewandt. Die Ergebnisse einer Mittelung über die Energiewerte der Versuche gleicher Bedingungen sind in der Tabelle 2.11 aufgeführt und in den Abbildungen 2.16 und 2.17 grafisch dargestellt. Tabelle und Grafiken zeigen, dass schon bei schwachen Staubexplosionen und Entlastungskappen mit kleinem Trägheitsmoment leicht Rotationsenergien deutlich größer als 1000 J auftreten. Bei dem von uns verwendeten Versuchsaufbau reichten Rotationsenergien größer als circa 5500 J aus, um bleibende, schwere Verformungen und Materialbrüche an Aufhängung und Lagerung der Klappe bzw. des Abfangmechanismus zu bewirken.

$K_{\text{St}}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\bar{E}_{\text{rot,max}} \pm \sigma \quad [\text{J}]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47 [kg]
100	1542 ± 207	1937 ± 296	3224 ± 317	2980 ± 331
130	1788 ± 70	1669 ± 140	2835 ± 177	4731 ± 812
160	3230 ± 248	3262 ± 1089	3912 ± 186	5177 ± 102
200	3495 ± 247	5065 ± 60	6325 ± 926	7700*

Tabelle 2.11: Mittelwerte für die maximal auftretende Rotationsenergie der Entlastungsklappe in Abhängigkeit von K_{St}^* -Wert und Klappenmasse m . Weiteres wie in Tabelle 2.9.

Entsprechend der Argumentation bei der Bestimmung von Fit-Funktionen für die Scharnier- und Normalkraft auf die Entlastungsklappe ergibt sich mit (2.13)

$$E_{\text{rot,max}} = 1359 \cdot \sqrt{p_{\text{red,max}}} \cdot \sqrt[5]{Q^2} \quad (2.19)$$

Der Korrelationskoeffizient beträgt $R^2 \approx 0,94$. Die Abhängigkeit der maximalen Rotationsenergie $E_{\text{rot,max}}$ von Q und $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}}$ wird durch

$$E_{\text{rot,max}} = 313 \cdot \sqrt{\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}}} \cdot \sqrt[5]{Q^2} \quad (2.20)$$

in guter Näherung, d. h. mit dem Korrelationskoeffizienten $R^2 \approx 0,96$ wiedergegeben. Vergleicht man (2.14) und (2.15) mit (2.19) und (2.20), so fällt auf, dass $E_{\text{rot,max}}$ in gleicher Weise von $p_{\text{red,max}}$ bzw. $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{max}}$ abhängt wie $F_{\text{S,max}}$. Das sollte man auch erwarten, da sowohl $E_{\text{rot,max}}$ als auch $F_{\text{S,max}}$ im wesentlichen von $\omega^2(t)$ abhängen, wie die Gleichungen (1.8) und (1.23) zeigen.

2.2.5.3 Kraftverhältnisse am Bremsmechanismus

Das Abfangen der von uns verwendeten Druckentlastungsklappe erfolgt über drei Fangbügel. Deren Position ist etwa 55° (vorne), 65° (mitte) und 78° (hinten) über der geschlossenen Entlastungsklappe (Position 0°). Fangbügel und Entlastungsklappe laufen um eine gemeinsame Drehachse. Der hintere Fangbügel erzeugt über Blattfedern ein Bremsmoment, welches in erster Näherung proportional zur Auslenkung aus der Ruheposition ist. Im Experiment wurden der vordere und mittlere Fangbügel miteinander verbunden, damit der Klappe ein größerer freier Weg von circa 65° zur Verfügung steht.

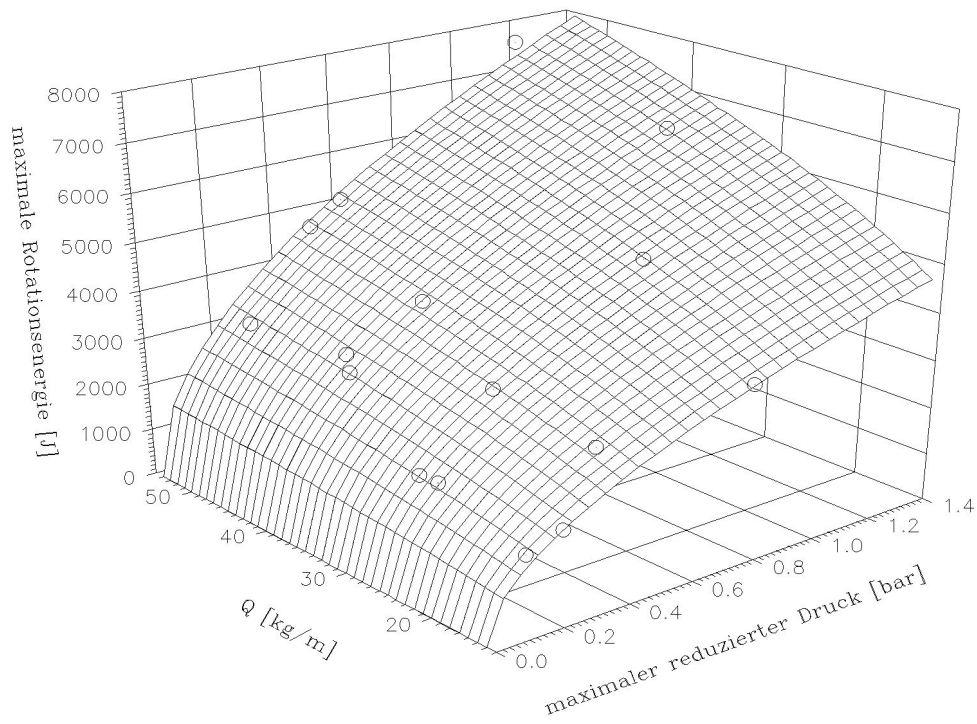


Abbildung 2.16: Maximale Rotationsenergie der Entlastungsklappe als Funktion vom Klappenwiderstand Q und maximalem reduziertem Druck.

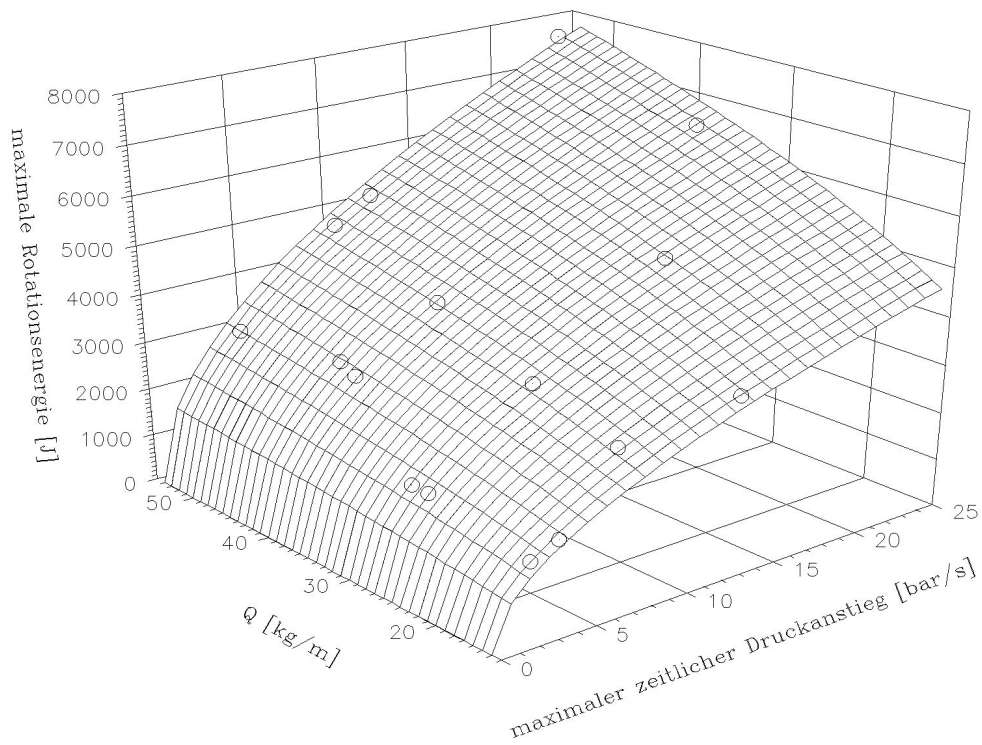


Abbildung 2.17: Maximale Rotationsenergie der Entlastungsklappe als Funktion vom Klappenwiderstand Q und maximalem zeitlichen Druckanstieg.

Die geschilderten Verhältnisse beim Bremsvorgang entsprechen physikalisch dem harmonischen Oszillator, der einer Dämpfung unterliegt weil Reibungsverluste auftreten. Wird zusätzlich die Gravitationswirkung auf Fangbügel und Klappe berücksichtigt, ergibt sich für die Bewegung der Entlastungsklappe mitsamt der drei Fangbügel die Differentialgleichung

$$\underbrace{(\Theta_K + \Theta_{B_v} + \Theta_{B_m} + \Theta_{B_h})}_{\Theta_g} \cdot \ddot{\varphi}(t) = -k^\circ \cdot \varphi(t) - m_g \cdot g \cdot S_g \cdot \cos(\varphi_a + \varphi(t)) - \beta \cdot \dot{\varphi}(t) \quad (2.21)$$

worin k° die Winkelrichtgröße und β die Dämpfungskonstante bedeuten. Der Index g an der Masse m und dem Abstand S zwischen Schwerpunkt und Drehachse steht für „gesamt“, also Klappe plus Fangbügel. Weil Zeitpunkt und Winkel des Abbremsungsbeginns in der Oszillatorgleichung (2.21) gleich 0 gesetzt werden, muss das $\varphi_a \approx 78^\circ$ (Bremsbeginn) im Cosinus des Gravitationstermes eingesetzt werden. So ist gewährleistet, dass bei $\varphi(t) \approx 12^\circ$ nach Bremsungsbeginn (Klappe steht senkrecht relativ zur Erdoberfläche) das Argument des Cosinus gleich 90° ist und der Gravitationsterm verschwindet. Bei größeren Winkeln wird der Cosinus negativ und das Vorzeichen des Gravitationsterms kehrt sich um. Der Reibungsansatz $-\beta \cdot \dot{\varphi}(t)$ setzt voraus, dass die auftretende Reibung linear mit der Winkelgeschwindigkeit wächst. Diese Bedingung kann in erster Näherung als gegeben angesehen werden.

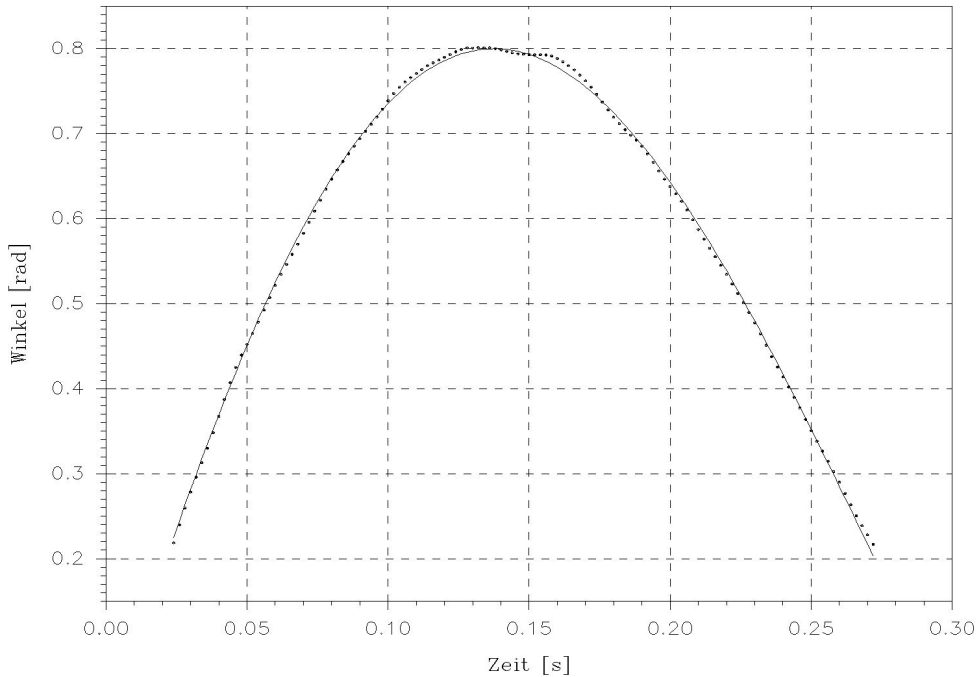


Abbildung 2.18: Messpunkte und Fit nach (2.23) für den Bremsvorgang von Versuch Nr. 23. Aus der Kurvenanpassung ergibt sich $k^\circ = 5880 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$, $\beta = -158 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$ und $\varphi_0 = 1,03$ rad.

Damit für (2.21) eine analytische Lösung angegeben werden kann, wird der Cosinus im Gravitationsterm durch die lineare Funktion $1 - \frac{2}{\pi} \cdot (\varphi_a + \varphi(t))$ ersetzt ($\varphi(t)$ in Radian!). Damit folgt aus (2.21)

$$\ddot{\varphi}(t) + \left(\frac{k^\circ}{\Theta_g} - \frac{2 \cdot m_g \cdot g \cdot S_g}{\Theta_g \cdot \pi} \right) \cdot \varphi(t) + \frac{\beta}{\Theta_g} \cdot \dot{\varphi}(t) + \left(\frac{m_g \cdot g \cdot S_g}{\Theta_g} - \frac{2 \cdot m_g \cdot g \cdot S_g \cdot \varphi_a}{\Theta_g \cdot \pi} \right) = 0 \quad (2.22)$$

Mit dem Ansatz $\varphi(t) = C \cdot e^{\lambda \cdot t}$ für den homogenen Teil von (2.22) und anschließender Variation der Konstanten zur Lösung der inhomogenen Gleichung errechnet sich als Lösung für (2.22)

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{k^\circ}{\Theta_g} - \frac{2 \cdot m_g \cdot g \cdot S_g}{\Theta_g \cdot \pi} - \frac{\beta^2}{4 \cdot \Theta_g^2}} \cdot t \right) \cdot e^{-\frac{\beta}{2 \cdot \Theta_g} \cdot t} - \frac{m_g \cdot g \cdot S - \frac{2 \cdot m_g \cdot g \cdot S \cdot \varphi_a}{\pi}}{k - \frac{2 \cdot m_g \cdot g \cdot S}{\pi}} \quad (2.23)$$

mit φ_0 als Amplitude der ungedämpften Schwingung. Gleichung (2.23) wurde in die Messpunkte $\varphi(t)$ des Bremsverlaufes aller Versuche eingepasst und damit die Parameter k° , β und φ_0 bestimmt. Als Mittelwert für die Winkelrichtgröße ergibt sich rund $\bar{k}^\circ = 6500 \pm 1400 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$. Als Mittelwert für die Abklingkonstante ergibt sich $\bar{\gamma} = -\frac{\beta}{2 \cdot \Theta_g} = -1,2 \pm 0,09 \text{ s}^{-1}$. Wie gut sich (2.23) in die Messpunkte einfügen lässt, zeigt Abbildung 2.18.

Beim Anschlag der Entlastungsklappe an den Fangbügel treten die größten Belastungen für die Entlastungsklappe bzw. die Klappenscharniere auf. Aus den Messkurven lässt sich eine mittlere Stoßdauer um $\Delta t \approx 5 \text{ ms}$ ableiten. Daraus folgt als mittlere Stoßkraft auf die Bremsbügel

$$\bar{F} \approx \frac{\Delta L_i}{h \cdot \Delta t} = \frac{2 \cdot \Theta_i \cdot L_i}{(\Theta_i + \Theta_j) \cdot h \cdot \Delta t} \quad (2.24)$$

mit h als Hebelarm und L als Drehimpuls. Der Index i bezeichnet den stoßenden Körper, j kennzeichnet den getroffenen Körper. ΔL_i ist der auf den Körper j übertragene Bruchteil des ursprünglichen Drehimpulses L_i des Körpers i . Aus (2.24) leitet sich eine mittlere Stoßkraft um $\bar{F} \approx 10^5 \text{ N}$ ab. Diese Größenordnung bestätigen auch die Messkurven aufgenommen durch den Beschleunigungsmesser. Weil beide Stoßpartner i und j etwa knapp die Hälfte dieses Kraftwertes in entgegengesetzter Richtung auf das Klappenscharnier ausüben (Kapitel 1.1.3), muss mit einer Gesamtkraft in der selben Größenordnung auf die Klappenscharniere gerechnet werden. Zur Veranschaulichung siehe Abbildung 2.19.

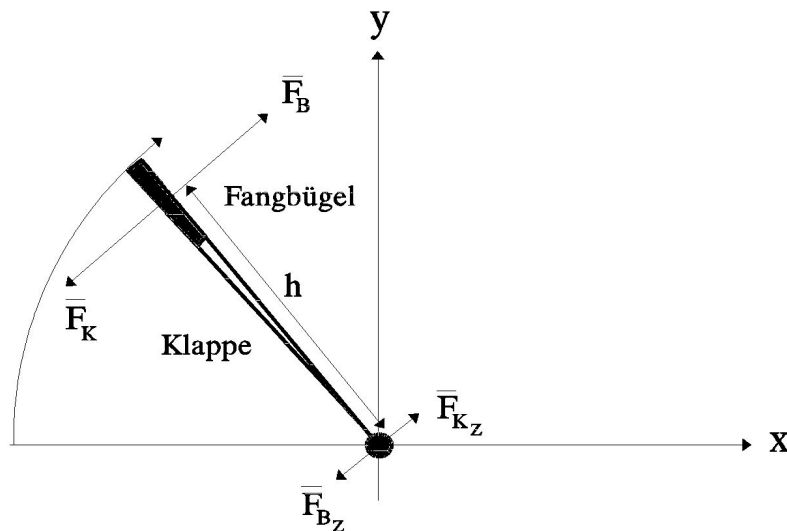


Abbildung 2.19: Mittlere Stoßkraft auf einen Klappenfangbügel \bar{F}_B und zugehörige Reaktionskraft (Bremskraft) \bar{F}_K auf die Entlastungsklappe im Augenblick des Stoßes. An der Drehachse sind die entsprechenden Zwangskräfte dargestellt.

Weil die Winkelrichtgröße \bar{k}° und der Abstand $h_b \simeq 0,02 \text{ m}$ zwischen Angriffspunkt der Blattfedern am hinteren Fangbügel und der Drehachse bekannt ist, kann die von den Blattfedern

ausgeübte Kraft F_b^{rot} angegeben werden. Wie zuvor erörtert, folgt das bremsende Drehmoment dem Hook' schen Gesetz $D_b(t) = -k^\circ \cdot \varphi(t)$. Damit folgt aus $D_b(t) = -k^\circ \cdot \varphi(t) = -F_b^{\text{rot}} \cdot h_b$ für die Federbremskraft

$$F_b^{\text{rot}} \approx \frac{\bar{k}^\circ}{h_b} \cdot \varphi(t) = \frac{6500}{0,02} \cdot \varphi(t) = 325000 \cdot \varphi(t) \quad [\text{N}] \quad (2.25)$$

Als maximaler Winkel bei der Deckelabbremmung wurden knapp 1,3 rad beobachtet, was rund 422500 N (!) Federbremskraft entspricht. Die Kleinheit von h_b stellt eine Konstruktionsschwäche dar, weil dadurch große Federbremskräfte und damit auch sehr stabile Federverankerungen notwendig sind.

Zur Überprüfung der abgeleiteten Zusammenhänge soll nun noch die aufgenommene und dissipierte Rotationsenergie der Entlastungsklappe bei Versuch 23 verglichen werden. Die dissipierte Energie ist

$$E_b^{\text{rot}} = \frac{k}{2} \cdot \varphi_0^2 \approx \frac{5880}{2} \cdot 1,03^2 \approx 3120 \quad [\text{J}] \quad (2.26)$$

Die von der Klappe bis zum Anschlag an den Fangbügel aufgenommenene Rotationsenergie kann aus Abbildung 2.15 mit rund 3100 J abgelesen werden. Auch bei allen anderen Versuchen stimmen beide Energiebeträge überein, wenn auch nicht immer mit solcher Genauigkeit.

2.2.5.4 Entlastungsfähigkeit

Entscheidend für die Entlastungsfähigkeit einer Druckentlastungsklappe ist das Verhältnis aus der Dauer des Explosionsvorganges zu der Zeitspanne, die bis zur völligen Freigabe der Entlastungsöffnung benötigt wird.

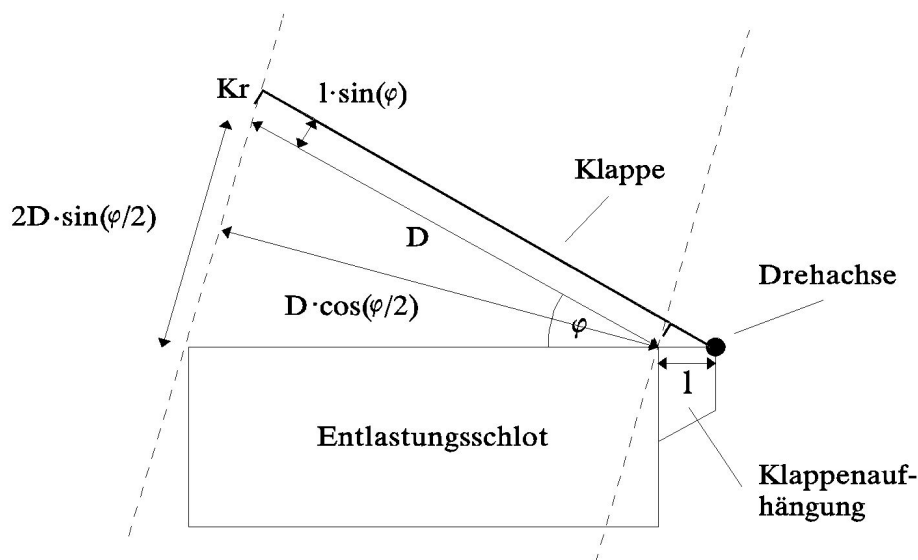


Abbildung 2.20: Skizze der von uns verwendeten Druckentlastungseinrichtung. $D = 0,785$ m ist der Entlastungsflächendurchmesser, $l = 0,08$ m ist der Abstand zwischen Drehachse und Entlastungsschlotinnenwand und $Kr = 0,04$ m ist die Breite des Klappenrandes.

Bei der von uns verwendeten Entlastungsöffnung mit kreisförmiger Querschnittsfläche wird die Entlastungsfläche $A_{EK}(t)$ als Funktion des Öffnungswinkels $\varphi(t)$ durch die Gleichung

$$A_{EK}(t) = D \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{D}{2} + l \right) \cdot \sin \varphi(t) - Kr \right) \quad (2.27)$$

beschrieben. Das Kr in (2.27) ist die Höhe der Klappenkrempe (siehe Abbildung 1.2 und 2.20), deren Fläche von der Öffnungsfläche der ebenen Klappe subtrahiert werden muss. Das Zustandekommen der einzelnen Terme bzw. die Bedeutung der Variablen in (2.27) entnimmt man Abbildung 2.20. Der Verlauf von $A_{EK}(\varphi)$ ist in Abbildung 2.21 dargestellt. Die volle Entlastungsfläche $A_E = 0.484 \text{ m}^2$ wird bei fast genau $\varphi(t) = 30^\circ$ erreicht.

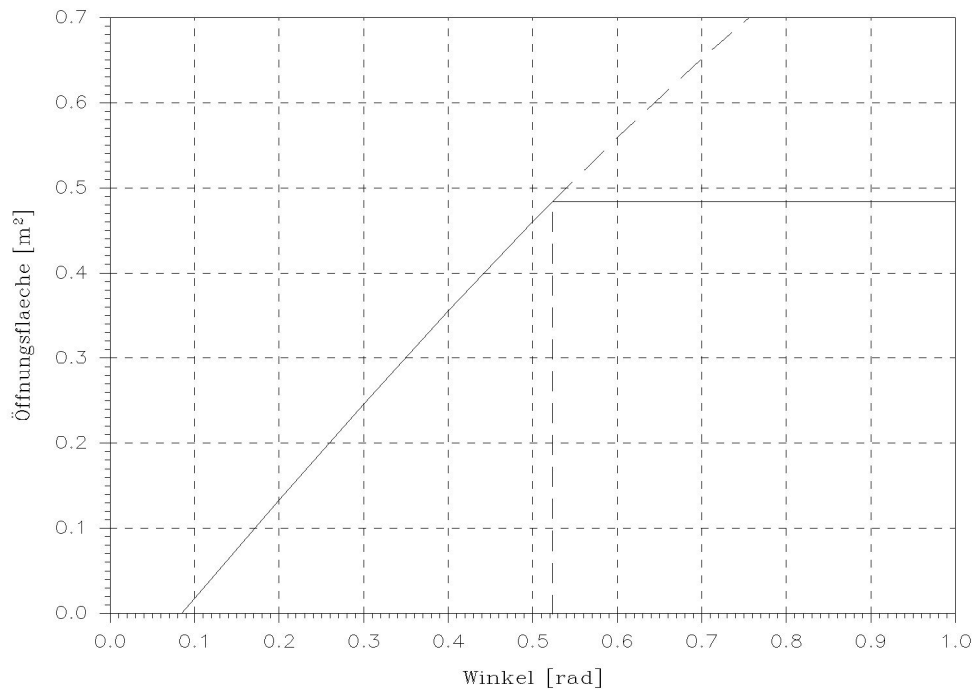


Abbildung 2.21: Entlastungsfläche A_E als Funktion des Öffnungswinkels $\varphi(t)$ der Entlastungsklappe. Der weitere Verlauf von (2.27) nach Erreichen der vollen Öffnungsfläche von $A_E = 0,484 \text{ m}$ ist gestrichelt dargestellt.

Mit Hilfe von Formel

$$p_{\text{red,max}} = \left[\left(3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\text{max}} \cdot K_{St}^* + \frac{1}{4} \cdot (p_{\text{dyn}} - 0,1) \right) \cdot \frac{\sqrt[4]{V^3}}{A_E} \right]^{\frac{7}{4}} \quad (2.28)$$

wurde aus den Versuchsdaten K_{St}^* , $p_{\text{red,max}}$ und $p_{\text{max}} \approx 9 \text{ bar}$ für jeden Versuch eine zur Berstscheibentlastung äquivalente Entlastungsfläche berechnet. Nach Mittelwertbildung über die Versuche gleicher Randbedingungen ergaben sich die Werte in Tabelle 2.12 bzw. die Punkte in Abbildung 2.22. Die in derselben Abbildung gezeigte Fläche ist die ebenfalls mit (2.28) berechnete Klappenentlastungsfähigkeit, wobei für $p_{\text{red,max}}$ (2.10) eingesetzt worden ist. Wie in Abbildung 2.22 deutlich zu sehen ist, fällt die Entlastungsfähigkeit unserer Klappenkonstruktion mit wachsendem K_{St}^* -Wert und Klappenwiderstand Q . Die Übereinstimmung zwischen aufgearbeiteten Messpunkten und der Flächenfunktion ist durch die erhebliche Streuung der Messdaten nicht besonders gut, was sich in einem Korrelationskoeffizienten

von lediglich $R^2 \approx 0,64$ widerspiegelt. Visuell scheint eine bessere Übereinstimmung zwischen Flächenfunktion und aufgearbeiteten Messpunkten vorzuliegen; dieser Effekt wird aber durch die Perspektive hervorgerufen. Die Streuung der Messpunkte wird zum einen durch die geringe Versuchszahl und dadurch große Schwankungsbreite der Druckdaten verursacht. Zum anderen ist eine Quelle der großen Messpunktstreuung in der Berechnungsmethode für die Entlastungsfähigkeit selbst, also in (2.28) zu suchen, denn p_{\max} ist sicher nicht genau 9 bar, geschweige denn konstant. Darüberhinaus kommen zusätzliche Ungenauigkeiten über die Bestimmung von Staubkonzentration und Zündverzögerungszeit zur Simulation verschiedener K_{St} -Werte in die Messergebnisse hinein. In Anbetracht dieser nicht unerheblichen Fehlerquellen ist der erreichte Korrelationskoeffizient von rund 0,64 nicht schlecht.

$K_{\text{St}}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\overline{EF} \pm \sigma \quad [\%]$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47 [kg]
100	$94,0 \pm 11$	$94,0 \pm 9,4$	$75,9 \pm 4,3$	$72,3 \pm 4,9$
130	$84,1 \pm 1,0$	$85,4 \pm 6,7$	$85,7 \pm 1,6$	$66,9 \pm 0,7$
160	$103,2 \pm 1,6$	$76,2 \pm 1,3$	$70,9 \pm 6,8$	$69,6 \pm 3,6$
200	$74,4 \pm 2,1$	$69,7 \pm 1,1$	$63,4 \pm 5,7$	$59,7 \pm 0,0$

Tabelle 2.12: Über Versuche gleicher Parameter gemittelte Klappenentlastungsfähigkeit in Abhängigkeit von K_{St}^* -Wert und Klappenmasse m .

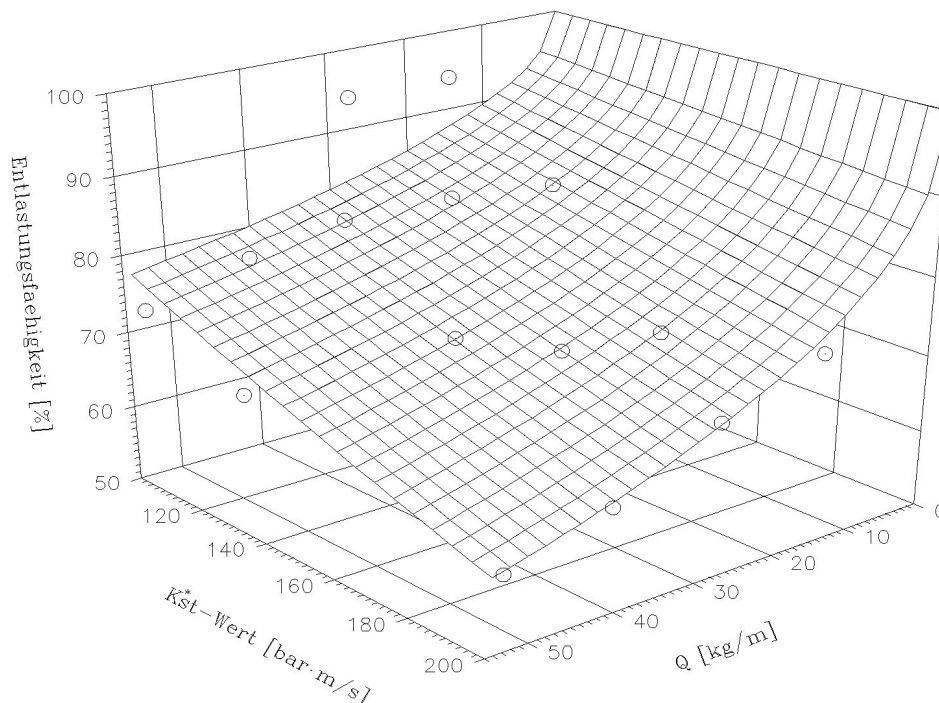


Abbildung 2.22: Klappenentlastungsfähigkeit als Funktion vom Klappenwiderstand Q und K_{St}^* -Wert. Der „Ausreißer“ bei 103,2 % wurde ist nicht berücksichtigt. Zur Berechnung der Entlastungsfähigkeit siehe laufenden Text.

Die Entlastungsfähigkeit einer Druckentlastungsklappe mit dem Klappenwiderstand Q kann demnach berechnet werden, wenn (2.10) in (2.28) eingesetzt und zur realen Entlastungsfläche in Bezug gesetzt wird. Es ergibt sich:

$$\frac{EF}{100} \approx \left(\exp \left(2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{K_{St}}{V^{\frac{3}{5}}} \cdot \sqrt{Q} \right) \right)^{-\frac{4}{7}} \approx \left(\exp \left(7,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\frac{dp}{dt}^{\frac{4}{3}}}{p_{red}^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{Q} \right) \right)^{-\frac{1}{6}} \quad (2.29)$$

Auch für diese empirische Formel (2.29) muss die Allgemeingültigkeit durch weitere Versuche überprüft und gegebenenfalls verbessert werden und zwar aus folgendem Grund: *R. Siwek* und *O. Skov* [7] fanden in einer zu der hier vorliegenden ähnlichen Arbeit, dass die Entlastungsfähigkeit einer beliebigen Entlastungsklappe mit gegebenem Trägheitsmoment generell mit dem K_{St}^* -Wert wächst. Sie stützten sich dabei vor allem auf experimentelle Ergebnisse, die an drei verschiedenen Behältern von 2,4 m³, 10 m³ und 25 m³ Volumen gewonnen wurden. Im Widerspruch dazu kommt *A. Harmanny* [8] in seiner theoretischen Arbeit zu dem Ergebnis, dass die Entlastungsfähigkeit eines Entlastungselementes mit nicht vernachlässigbarer aber konstanter Massenträgheit mit steigendem K_{St} -Wert fallen sollte. Ebenfalls im Widerspruch zu *Siwek* und *Skov* stehen Erfahrungen aus zahlreichen experimentellen Entlastungsklappenprüfungen, die auf der Bergbau-Versuchsstrecke in Dortmund durchgeführt wurden [15]. Hier zeigte sich, dass die Entlastungsfähigkeit einer Entlastungsklappe auf einem Behälter mit steigendem K_{St}^* -Wert fallen kann, während die Entlastungsfähigkeit derselben Klappe auf einem anderen, größervolumigen Behälter mit wachsendem K_{St}^* -Wert steigt. Auch auf dem BGN-Versuchsfeld in Kappelrodeck (Schwarzwald) wurden solche Beobachtungen gemacht [6] und zwar an Behältern von 9,4 m³ und 60 m³ Volumen. Die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse von *Siwek* und *Skov* darf also ebenso angezweifelt werden wie diejenige der Formeln (2.10) und (2.29). Vermutlich decken die Versuchsparameter von [7] und der vorliegenden Arbeit nur jeweils den Teilbereich der möglichen Verhaltensweisen von Druckentlastungsklappen ab, in dem die Entlastungsfähigkeit mit dem K_{St}^* -Wert entweder steigt oder fällt.

Offensichtlich gibt es auch weiterhin einige Unklarheiten, weshalb an dieser Stelle lediglich der Versuch einer qualitativen Erklärung der beobachteten Phänomene unternommen werden kann. Die Entlastungsfähigkeit einer Klappe sollte beeinflusst werden durch:

1. Die Höhe der Druckäußerung, d. h. die Höhe des reduzierten Überdruckes. Denn bei nahezu konstanter Druckdifferenz $\Delta p_{red} = p_{red_K} - p_{red}$ und steigendem Druckniveau sollte das Druckverhältnis $f_p = \frac{p_{red}}{p_{red_K}}$ in (2.29) wachsen und damit auch die Entlastungsfähigkeit. Für eine gegebene Entlastungsfläche A_E ergibt sich p_{red} bei Verwendung einer Berstfolie und p_{red_K} in Anwesenheit einer Entlastungsklappe.
2. Das Behältervolumen. Steigendes Behältervolumen wirkt sich zum einen wegen des dadurch wachsenden Druckniveaus (Formel (2.9)) günstig auf die Entlastungsfähigkeit aus, wie unter 1. geschildert wird. Zum anderen bedeutet größer werdendes Behältervolumen eine Verkleinerung des zeitlichen Druckanstieges, weshalb das Trägheitsmoment einer Entlastungsklappe weniger ins Gewicht fällt. Die Klappe kann dem langsamer ablaufenden Druckanstieg besser folgen.
3. Den Klappenwiderstand. Steigender Klappenwiderstand bedeutet größere Massenträgheit, d. h. die Klappe kann schlechter auf den zeitlichen Druckanstieg reagieren. Die Entlastungsfähigkeit fällt also mit wachsendem Klappenwiderstand. Diese Überlegung kann als experimentell nachgewiesen angesehen werden.

4. Die Entlastungsfläche. Die Größe der Entlastungsfläche beeinflusst die Höhe des reduzierten Überdruckes und damit über 1. die Entlastungsfähigkeit einer Klappe.

Jede Versuchssituation wird die unter den Punkten 1. bis 4. beschriebenen Einflussfaktoren auf die Entlastungsfähigkeit mehr oder weniger stark begünstigen. Bei welcher Kombination der Versuchsparameter V , Q , und A_E welche Effekte dominieren und wie sich die Einflussfaktoren mit der Variation dieser Versuchsparameter ändern, kann aufgrund der experimentellen Erfahrung nur sehr grob abgeschätzt werden. Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen:

Betrachtet man einen relativ kleinen Behälter ($V < 10 \text{ m}^3$) mit gegebener Entlastungsklappe, dessen Entlastungsfläche so gewählt ist, dass sich bei K_{St}^* -Werten unter $200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ reduzierte Drücke unter 1 bar ergeben, so sollte sich der Klappenwiderstand einer vorhandenen Entlastungsklappe aufgrund des relativ schnellen Druckanstieges stark bemerkbar machen. Als Folge daraus sollte Δp_{red} vergleichsweise groß sein und mit steigendem K_{St}^* -Wert so stark mitwachsen, dass das Druckverhältnis f_p und damit die Entlastungsfähigkeit EF kleiner wird, obwohl das Niveau des reduzierten Überdruckes steigt. In der linken Hälfte der Abbildung 2.23 ist dieser Fall skizziert dargestellt.

Werden gerade so viele obiger Entlastungsklappen auf einem großen Behälter ($V > 50 \text{ m}^3$) eingesetzt, dass sich bei K_{St}^* -Werten bis $200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ leicht erhöhte reduzierte Überdrücke gegenüber denen am kleinen Beispielbehälter einstellen, so sollte sich eine Situation ergeben, wie sie in der rechten Hälfte der Abbildung 2.23 gezeigt ist. Hier wächst Δp_{red} aufgrund des vergleichsweise langsamen zeitlichen Druckanstieges so schwach mit dem K_{St}^* -Wert, dass f_p und damit EF wegen des ansteigenden Niveaus des reduzierten Überdruckes größer wird.

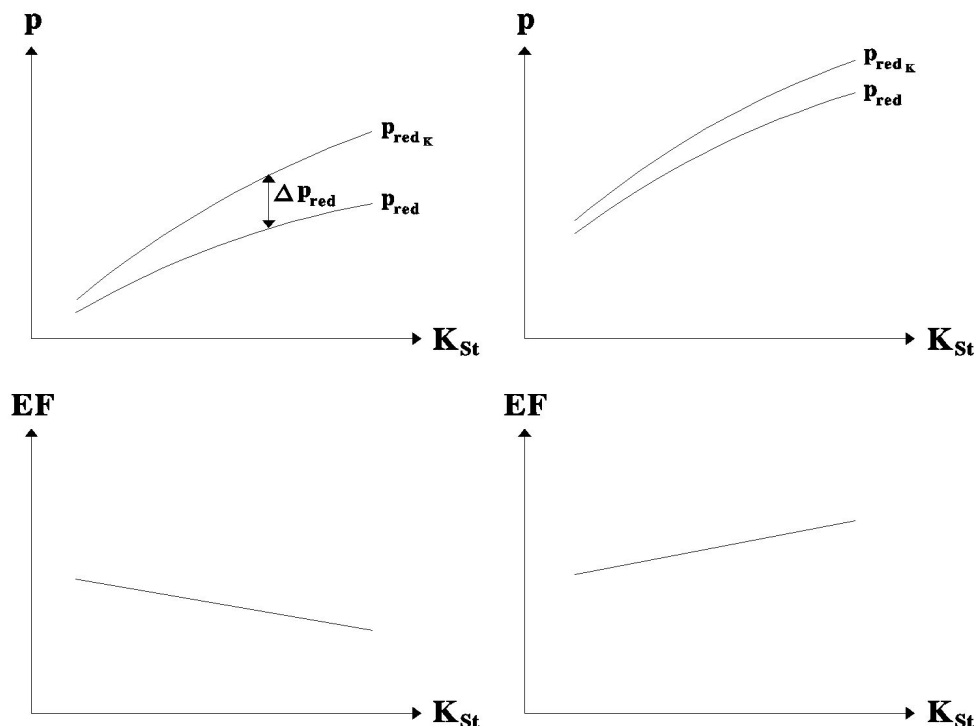


Abbildung 2.23: Entwicklung der Entlastungsfähigkeit bei zwei verschiedenen Versuchsbedingungen. Links: kleiner Behälter, niedrigeres Druckniveau und starkes Wachstum von Δp_{red} . Rechts: großer Behälter, höheres Druckniveau und schwaches Wachstum von Δp_{red} .

2.2.6 Übertragung der Versuchsergebnisse auf Entlastungsdeckel

2.2.6.1 Deckelbeschleunigung

Im Gegensatz zu einer Druckentlastungsklappe dreht sich ein Druckentlastungsdeckel beim Freigeben der Entlastungsöffnung nicht aus dem Materiestrom aus einem Silo heraus. Nimmt man die zu beschleunigende Masse, also Deckel plus Halteseile als konstant an, so kann die resultierende Kraft auf den Entlastungsdeckel $F_D(t)$ (siehe Abbildung 1.7) aus der Normalkraft auf die Entlastungsklappe $F_N(t)$ (siehe Abbildung 1.4) näherungsweise abgeleitet werden. Das geschieht, indem der experimentell bestimmte zeitliche Verlauf von $F_N(t)$ durch das Quadrat des Cosinus des Klappenöffnungswinkels dividiert wird.

$$F_D(t) \approx \frac{F_N(t)}{\cos^2 \varphi(t)} \quad (2.30)$$

Die Veränderung der Resultierenden einer Entlastungsklappe aufgrund der zunehmenden Schrägstellung im Materiestrom aus dem Silo gegenüber der Resultierenden eines gleichgroßen Entlastungsdeckels werden durch einen \cos^2 -Divisor ungefähr ausgeglichen, wie man aus Abschnitt 3.1.1.1 entnimmt.

2.2.6.2 Kinetische Energie eines Druckentlastungsdeckels

Mit der Annahme konstanter Masse und (2.30) kann die kinetische Energie des Entlastungsdeckels bei Beginn des Abfangvorganges t_a mit (1.29) abgeschätzt werden. Es folgt

$$E_{\text{kin}}(t_a) = \frac{\left(\int_0^{t_a} F_D(t) dt \right)^2}{2 \cdot m} \approx \frac{\left(\int_0^{t_a} \frac{F_N(t)}{\cos^2 \varphi(t)} dt \right)^2}{2 \cdot m} \quad (2.31)$$

Die Durchführung des Integrals und die Auffindung von t_a erfolgt rechnergestützt aus den zeitlichen Verläufen von $\varphi(t)$ und $F_N(t)$.

2.2.6.3 Bremsweg eines Entlastungsdeckels

Mit der Bremskraftfunktion (1.30) und der ungefähren kinetischen Energie eines Entlastungsdeckels aus (2.31) folgt aus dem Energiesatz in etwa die Länge der Seildehnung beim Abfangvorgang. Es gilt

$$E_{\text{kin}}(t_a) \approx \frac{\left(\int_0^{t_a} \frac{F_N(t)}{\cos^2 \varphi(t)} dt \right)^2}{2 \cdot m} = \frac{n \cdot E \cdot A_S \cdot l_{\text{bmax}}^2}{2 \cdot l} = E_b^{\text{kin}} \quad (2.32)$$

Aufgelöst nach l_{bmax} ergibt sich

$$l_{\text{bmax}} \approx \sqrt{l \cdot \left(\int_0^{t_a} \frac{F_N(t)}{\cos^2 \varphi(t)} dt \right)^2 \cdot (n \cdot m \cdot E \cdot A_S)^{-1}} \quad (2.33)$$

2.2.6.4 Maximale Kraft auf ein Fangseil eines Entlastungsdeckels

Setzt man (2.33) in das Bremskraftgesetz (1.30) ein und addiert die Kraft auf den Entlastungsdeckel zum Zeitpunkt t_a des Bremsbeginns, so erhält man in etwa die auftretende Kraftspitze beim Abfangvorgang eines Druckentlastungsdeckels. Es ergibt sich

$$F_{b_{\max}} \approx \sqrt{\frac{n \cdot E \cdot A_S}{m \cdot l}} \cdot \int_0^{t_a} \frac{F_N(t)}{\cos^2 \varphi(t)} dt + \frac{F_N(t_a)}{\cos^2 \varphi(t_a)} \quad (2.34)$$

Wird (2.34) durch die Anzahl n der Fangseile dividiert, so folgt für die maximale Belastung pro Seil

$$F_{b_{\max}}^s \approx \sqrt{\frac{E \cdot A_S}{n \cdot m \cdot l}} \cdot \int_0^{t_a} \frac{F_N(t)}{\cos^2 \varphi(t)} dt + \frac{F_N(t_a)}{n \cdot \cos^2 \varphi(t_a)} \quad (2.35)$$

Mit diesem Ausdruck wird eine Abschätzung der maximal an einem Halteseil auftretenden Kraft beim Abfangen eines beschleunigten Druckentlastungsdeckel möglich, wobei man sich auf Messdaten bei Entlastungsklappenversuchen stützen muss.

2.2.6.5 Ergebnisse der Abschätzung

Zur Berechnung der maximalen Kraft pro Seil beim Abfangen eines Deckels der Masse 14,3 kg, 25,3 kg, 36,3 kg und 47 kg mit Hilfe von (2.35) wurden folgende Annahmen gemacht: Der Elastizitätsmodul beträgt $10^{10} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}}$ (massiver Stahl: $E \simeq 2 \cdot 10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}}$) und der Deckel wird von vier Seilen à 1 m Länge und 0,02 m Durchmesser abgebremst. Damit ergeben sich die in der Tabelle 2.13 und in den Abbildungen 2.24 und 2.25 dargestellten Werte für die maximale Bremskraft pro Halteseil als Funktion von Deckelmasse und K_{St}^* -Wert bzw. $p_{\text{red}_{\max}}$ und $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max}$.

$K_{St}^* \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$	$\bar{F}_{b_{\max}}^s \text{ [N]}$			
	14,3 [kg]	25,3 [kg]	36,3 [kg]	47 [kg]
100	84750	97200	135750	130550
130	121800	97300	146200	163500
160	156650	146150	152650	177100
200	174750	183250	326450	322250

Tabelle 2.13: Aus Formel (2.35) und den Messdaten der Entlastungsklappenversuche berechnete maximale Bremskraft pro Halteseil beim Abfangen von Entlastungsdeckeln verschiedener Masse über vier Seile von je 1 m Länge.

Die ermittelten Kraftspitzen liegen in derselben Größenordnung wie sie in [1] bei ähnlichen Randbedingungen direkt gemessen wurden. Die ebenfalls in den Abbildungen 2.24 und 2.25 dargestellten Fit-Flächen mit den Gleichungen

$$F_{b_{\max}}^s \approx \frac{4,3 \cdot 10^5}{n} \cdot \sqrt{p_{\text{red}_{\max}}} \cdot \sqrt[5]{\frac{m}{A_D}} \quad (2.36)$$

$$F_{b_{\max}}^s \approx \frac{9,933 \cdot 10^4}{n} \cdot \sqrt{\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max}} \cdot \sqrt[5]{\frac{m}{A_D}} \quad (2.37)$$

beschreiben die Datenpunkte bei einem Korrelationskoeffizienten von knapp 0,9 recht gut.

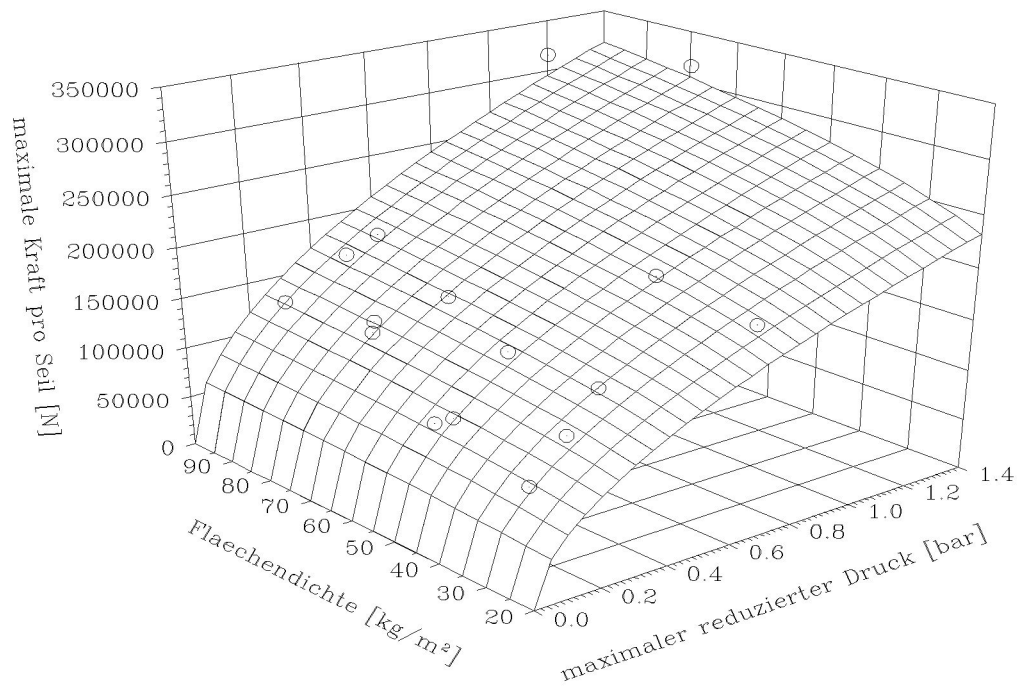


Abbildung 2.24: Kraftwerte aus Tabelle 2.13 in Abhängigkeit des maximalen reduzierten Überdruckes.

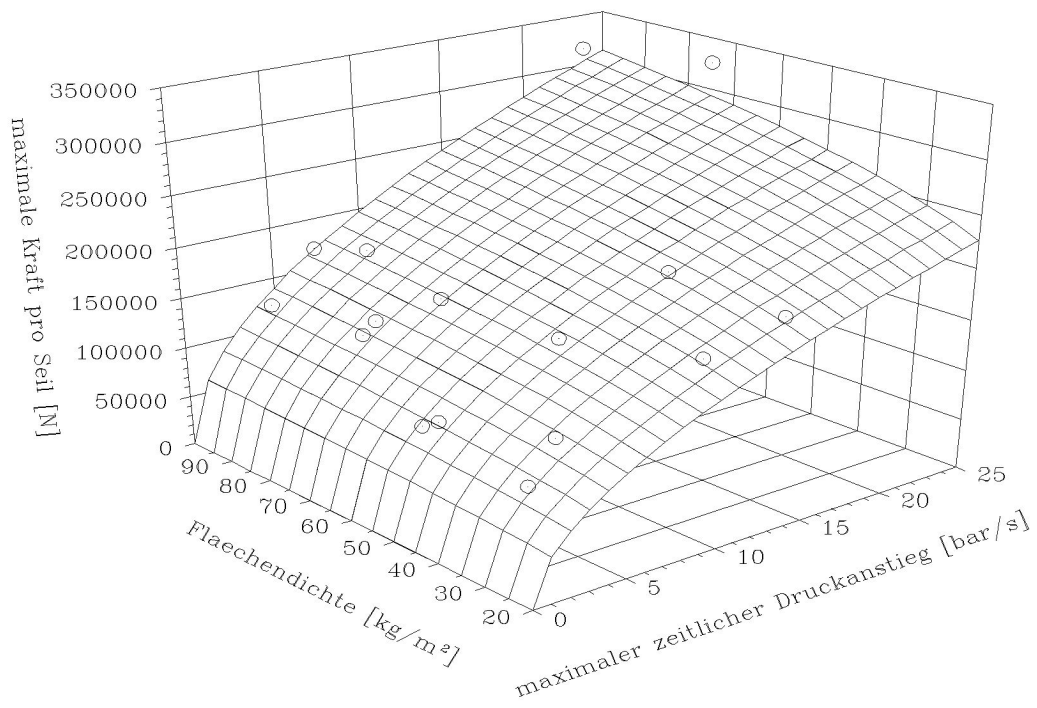


Abbildung 2.25: Kraftwerte aus Tabelle 2.13 als Funktion des maximalen zeitlichen Druckanstieges.

Kapitel 3

Modellrechnung

Um zu einer allgemeingültigen mathematischen Behandlung der physikalischen Vorgänge von Druckentlastungsklappen im Entlastungsfall zu gelangen, muss sich von den in der Versuchsauswertung gewonnenen empirischen Zusammenhängen möglichst weitgehend gelöst werden, da diese nur die von uns gewählte spezielle experimentelle Situation richtig zu beschreiben vermögen. Der Mindestanspruch an die gefundenen theoretischen Formeln muss es aber sein, unsere Versuchsergebnisse in guter Näherung wiederzugeben. Die Erfüllung dieser Anforderungen ist mit Einschränkungen gelungen.

3.1 Entlastungsklappendynamik

3.1.1 Klappenbeschleunigung

3.1.1.1 Beschleunigung einer runden Entlastungsklappe

Zur quantitativen theoretischen Behandlung der Klappenbewegung wird auf die schon gewonnen Erkenntnisse der Abschnitte 1.1.6 und 2.2.5.1 zurückgegriffen. Demnach setzt sich das resultierende Drehmoment auf die Entlastungsklappe \vec{D}_K aus dem Beschleunigungsmoment im Gasstrom \vec{D}_{Ex} , dem Gravitationsmoment \vec{D}_{Gr} und den beiden Reibungsmomenten aufgrund des Luftwiderstandes \vec{D}_{LR} und der Scharnierreibung \vec{D}_{SR} zusammen.

Das klappenbeschleunigende Drehmoment ergibt sich aus der allgemeinen Formel 1.10. Die Größe der wirkenden Kraft (proportional zur wirksamen Klappenfläche) und die Länge des Klappenhebels hängen unter anderem in nicht zu vernachlässigender Weise vom Klappenöffnungswinkel $\varphi(t)$ ab, wie man Abbildung 3.1 entnehmen kann. Nimmt man den Gasstrom idealisiert als zylinderförmig an, so entzieht sich von der runden Entlastungsklappe ein mit dem Klappenöffnungswinkel $\varphi(t)$ wachsender Kreisabschnitt mit der Höhe $f(t)$ dem angreifenden Gasstrom. Aus dieser Überlegung folgt für die im Gasstrom wirksame Klappenfläche $A_{Ex}(t)$

$$A_{Ex}(t) = A_K - R_K^2 \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{2 \cdot f(t) \cdot R_K - f^2(t)}}{R_K}\right) - R_K \cdot \sqrt{2 \cdot f(t) \cdot R_K - f^2(t)} \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{\sqrt{2 \cdot f(t) \cdot R_K - f^2(t)}}{R_K}\right)\right) \quad (3.1)$$

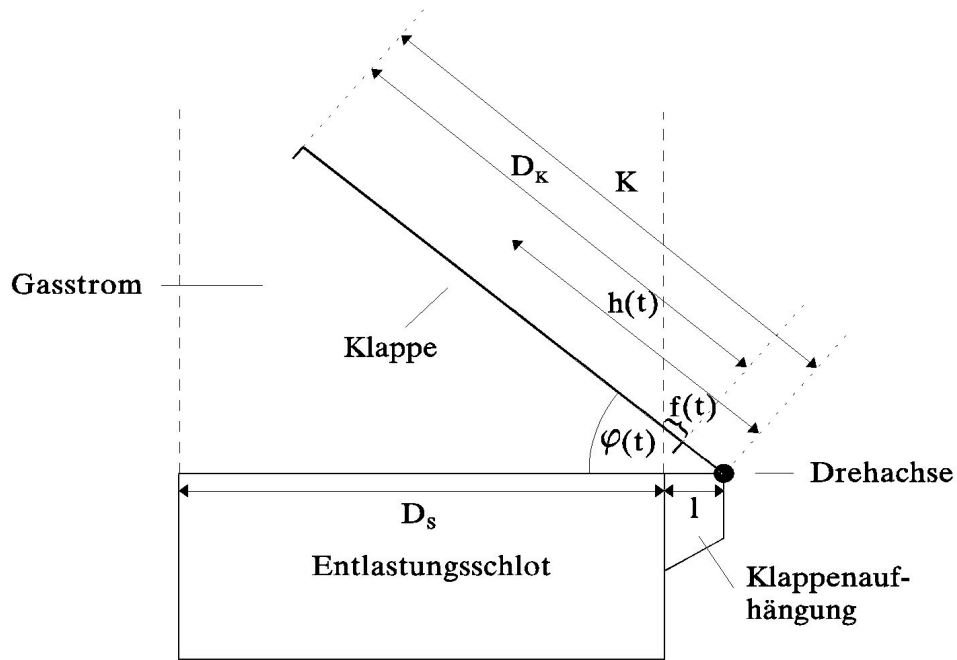


Abbildung 3.1: Skizze der Entlastungsklappe im beschleunigenden Gasstrom.

wobei $R_K = \frac{D_K}{2}$ der Radius und A_K die Fläche des runden Schlotabdeckteiles der Entlastungsklappe ist. Die Höhe des Kreisabschnittes $f(t)$ ist

$$f(t) = \frac{l}{\cos \varphi(t)} - l \quad (3.2)$$

Der wirksame Klappenhebel $h(t)$ ist der Abstand des Mittelpunktes der wirksamen Klappenfläche von der Drehachse, also

$$h(t) = \frac{l}{2 \cdot \cos \varphi(t)} + \frac{K}{2} \quad (3.3)$$

Gemäß den qualitativen Ausführungen von Abschnitt 2.2.5.1 (Seite 28) setzt sich das Klappenöffnungsmoment aus einem druckbedingten Drehmoment $D_{\text{Ex}}^{\text{dru}}(t)$ und einem reibungsbedingten Drehmoment $D_{\text{Ex}}^{\text{rei}}(t)$ zusammen. Mit (3.1) bis (3.3) folgt für deren Betrag

$$D_{\text{Ex}}^{\text{dru}}(t) \approx p(t) \cdot A_E \cdot h(t) \cdot \cos^2 \varphi(t)$$

$$D_{\text{Ex}}^{\text{rei}}(t) \approx \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \varphi(t)\right) \cdot c_n \cdot \rho_s(t) \cdot A_{\text{Ex}}(t) \cdot v_{\text{rel}}^2(t) \cdot h(t) \cdot \cos^2 \varphi(t) \quad (3.4)$$

Die Potenzen des Kosinus in (3.4) ergeben sich zum einen aus der Definition des Drehmomentes, zum zweiten daraus, dass nur der Körperquerschnitt senkrecht zur Strömungsrichtung in die Newton-Reibung einfließt. Der Faktor $\left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \varphi(t)\right)$ trägt der Verkleinerung des Reibungskoeffizienten c_n aufgrund der zunehmend schrägen Klappenanströmung Rechnung. Der c_n -Wert für eine senkrecht angeströmte Kreisplatte beträgt 1,17 und entstammt einem Nachschlagewerk.

Die Veränderung des druckbedingten Klappenöffnungsmomentes $D_{\text{Ex}}^{\text{dru}}(t)$ bzw. des reibungsbedingten Klappenöffnungsmomentes $D_{\text{Ex}}^{\text{rei}}(t)$ während des Klappenöffnungsvorganges wird dabei durch die Flanken zweier sigmoider Funktionen berücksichtigt. Damit ergibt sich für das öffnende Drehmoment der Klappe

$$D_{\text{Ex}}(t) \approx D_{\text{Ex}}^{\text{dru}}(t) \cdot \left(1 + \exp\left(-\frac{\varphi(t) - 0,35}{-0,06}\right)\right)^{-1} + D_{\text{Ex}}^{\text{rei}}(t) \cdot \left(1 + \exp\left(-\frac{\varphi(t) - 0,47}{0,09}\right)\right)^{-1} \quad (3.5)$$

Den Verlauf der Gewichtung von $D_{\text{Ex}}^{\text{dru}}(t)$ und $D_{\text{Ex}}^{\text{rei}}(t)$ zeigt Abbildung 3.2. Der Ansatz (1.22) und (3.4) zur Beschreibung der Entlastungsklappenbewegung macht die Einführung der sigmoiden Funktionen notwendig.

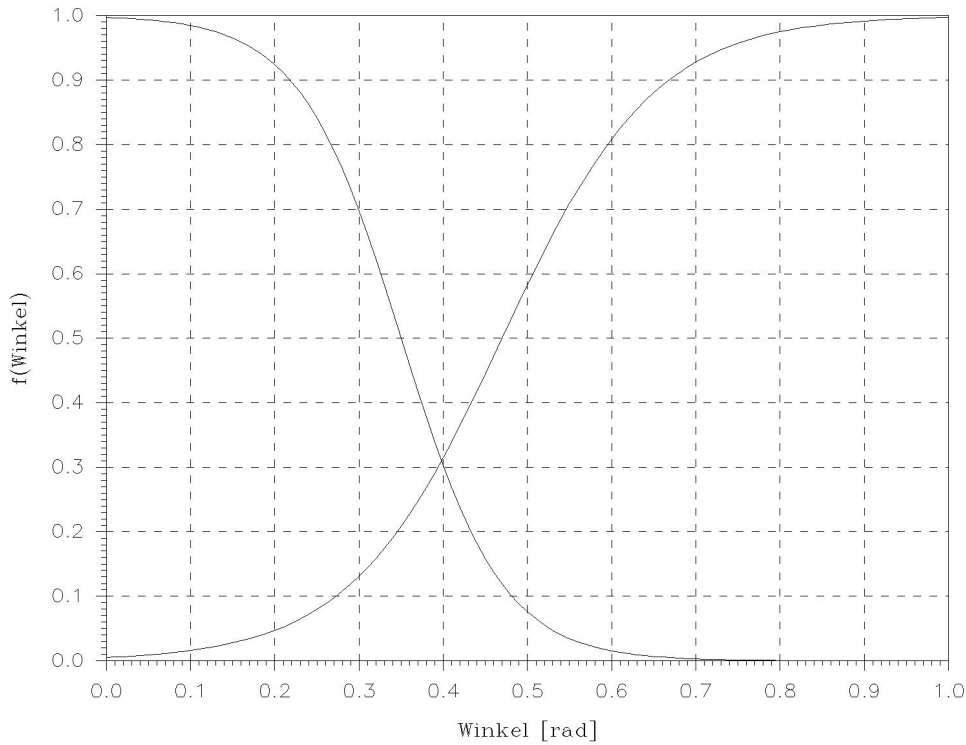


Abbildung 3.2: Verlauf der Funktionen $\left(1 + \exp\left(-\frac{\varphi(t)-0,35}{-0,06}\right)\right)^{-1}$, $\left(1 + \exp\left(-\frac{\varphi(t)-0,47}{0,09}\right)\right)^{-1}$.

Die Dichte des ausströmenden Mediums $\rho_s(t)$ kann näherungsweise gleich der momentanen Dichte im Silo gesetzt werden. Wird die Kompressibilität des Siloinhaltes der Einfachheit halber vernachlässigt, so ist der Massenstrom aus dem Silo ist in etwa

$$\dot{m}(t) \approx \xi \cdot \sqrt{2 \cdot p(t) \cdot \rho_s(t)} \cdot A_{\text{EK}}(t) \quad (3.6)$$

mit ξ als Geschwindigkeitsbeiwert (hier ist $\xi \approx 0,95$) und $p(t)$ als zeitabhängiger Überdruck im Behälter. Die Dichte im Behälter $\rho_s(t)$ ist damit

$$\rho_s(t) \approx \frac{1}{V} \cdot \left(m_0 - \int_0^t \dot{m}(\zeta) d\zeta\right) \quad (3.7)$$

wobei m_0 die Anfangsmasse im Silo ist. (3.6) eingesetzt in (3.7) liefert eine Gleichung zur Bestimmung der Dichte im Silo. Diese Gleichung ist aufgrund der komplizierten Ausdrücke unter dem Integral in (3.7) nicht analytisch lösbar, weshalb die Berechnung der zeitabhängigen Dichtewerte im Silo innerhalb des Simulationsprogrammes für den Klappenöffnungsvorgang numerisch erfolgt. Dabei wird für jedes (sehr kleine) Zeitintervall h des diskretisierten Zeitparameters t (siehe (1.44)) durch Multiplikation von $\dot{m}(t)$ mit h der Massenausstoß aus dem Silo berechnet und fortlaufend vom aktuellen Dichtewert subtrahiert.

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Gasstrom und Entlastungsklappe ergibt sich in erster Näherung aus

$$v_{\text{rel}}(t) \approx \xi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p(t)}{\rho_s(t)}} - h(t) \cdot \omega(t) \quad (3.8)$$

Bei sich senkrecht nach oben öffnenden Entlastungsklappen ist der Betrag des Drehmomentes aufgrund der Gravitationswirkung auf die Klappe

$$D_{\text{Gr}}(t) = -m \cdot g \cdot S \cdot \cos \varphi(t) \quad (3.9)$$

Der Betrag des Drehmomentes aufgrund des Luftwiderstandes kann mit Hilfe von (1.34) zu ungefähr

$$D_{\text{LR}}(t) \approx -\frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho_l \cdot A_K \cdot (\omega(t) \cdot h_0)^2 \cdot h_0 \quad (3.10)$$

abgeschätzt werden, wobei ρ_l die Dichte der Luft und h_0 der Klappenhebel bei geschlossener Klappe bedeuten.

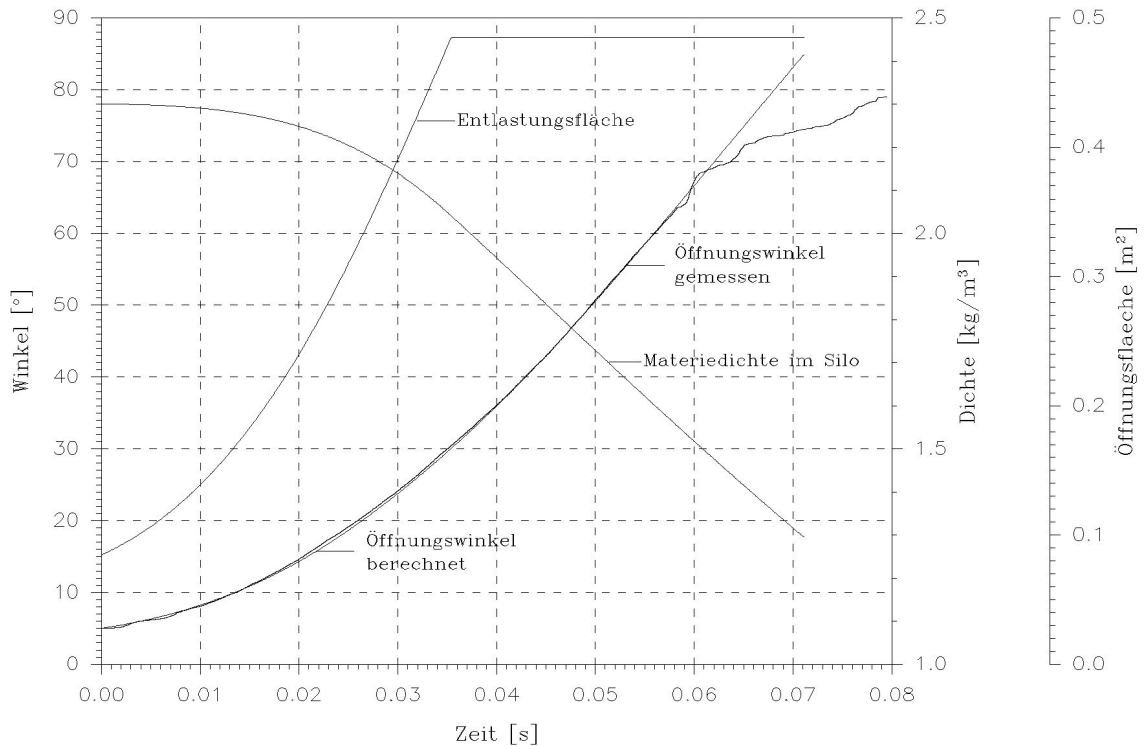


Abbildung 3.3: Berechneter und gemessener zeitlicher Verlauf des Klappenöffnungswinkels $\varphi(t)$, der Dichte im Behälter $\rho(t)$ und der Entlastungsfläche $A_{\text{EK}}(t)$ beim Versuch 23. Parameter: $\rho_0 = 2,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\lambda = 0$, $D_g = 20 \text{ Nm}$, $c_n = 1,17$, $\xi = 0,95$ und $p(t)$ aus Messung.

Das Drehmoment hervorgerufen durch die Scharnierreibung setzt sich aus dem konstanten Drehmoment D_g der Gleitreibungskraft und einem veränderlichen, zur Klappenfliehkraft proportionalen Drehmoment zusammen. Es ist dem Betrag nach

$$D_{SR}(t) = -D_g - \lambda \cdot m \cdot S \cdot \omega^2(t) \quad (3.11)$$

Die Bestimmung der Größe von $D_{SR}(t)$ ist nur auf experimentellen Weg möglich. Bei Vernachlässigung des veränderlichen Anteiles ($\lambda = 0$) ergab sich aus unseren Versuchen der Wert $D_g \approx 20$ Nm unter Anwendung der in Abschnitt 1.1.6 beschriebenen Methode. Bei guter Lagerung der Entlastungsklappe kann D_{SR} ganz vernachlässigt werden.

Die vier Drehmomente (3.5), (3.9), (3.10) und (3.11) sind in (1.22) einzusetzen. Die entstehende nichtlineare Differentialgleichung ist nicht analytisch zu lösen. Darum wurde zur Überprüfung der hergeleiteten Zusammenhänge das in Abschnitt 1.5.3 beschriebene numerische Lösungsverfahren für Differentialgleichungen verwendet. In Abbildung 3.3 ist sowohl der gemessene als auch der berechnete zeitliche Verlauf des Klappenöffnungswinkels für den Versuch 23 dargestellt. Eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischer und gemessener Kurve $\varphi(t)$ wird bei allen diesbezüglich geprüften Versuchen erreicht.

3.1.1.2 Beschleunigung einer rechteckigen Entlastungsklappe

Grundsätzlich sind die Überlegungen bezüglich der Beschleunigung einer runden Entlastungsklappe auch auf eine Entlastungsklappe von rechteckiger Form übertragbar, wobei aber die Ausdrücke für die zeitabhängige Entlastungsöffnung $A_{EK}(t)$ und die wirksame Klappenfläche $A_{Ex}(t)$ verändert werden müssen. Außerdem ist der Reibungskoeffizient c_n hier eine Funktion des Seitenverhältnisses der Klappe.

Benennt man die zur Drehachse (Scharnier) parallele Klappenseite mit a und zur Drehachse senkrechte Klappenseite mit b , so vereinfacht sich (3.1) zu

$$A_{Ex}(t) = A_K - a \cdot (l + f(t)) \quad (3.12)$$

mit $A_K = a \cdot b$ als volle Klappenfläche. Zur Veranschaulichung kann Abbildung 3.1 herangezogen werden, wobei man sich nun eine rechteckigen Aufbau vorzustellen hat. K entspricht in diesem Fall der Klappenseite b .

Die Entlastungsfläche in Abhängigkeit von der Zeit ist bei einer rechteckigen Entlastungsklappe gegeben durch

$$\begin{aligned} A_{EK}(t) &= 2 \cdot a \cdot (b - l) \cdot \sin\left(\frac{\varphi(t)}{2}\right) + (b - l)^2 \cdot \sin\varphi(t) \\ &\quad + 2 \cdot (a + b - l) \cdot (l \cdot \sin\varphi(t) - Kr) \end{aligned} \quad (3.13)$$

wie man aus Abbildung 2.20 entnehmen kann. Es ist dort $D = b - l$.

Mit dem Seitenverhältnis $\chi = \frac{a}{b}$ ($b \leq a$) folgt der Wert des Reibungskoeffizienten für eine rechteckige Entlastungsklappe in guter Näherung dem empirischen Ausdruck

$$c_n \approx 1,1549 + 0,01389 \cdot \chi - \frac{0,06857}{\chi} \quad 1 \leq \chi \quad (3.14)$$

(3.12) bis (3.14) eingesetzt in die entsprechenden Ausdrücke aus Abschnitt 3.1.1.1 ergibt eine nichtlineare Differentialgleichung für die Öffnungsbewegung einer rechteckigen Druckentlastungsklappe. Die Lösung dieser Differentialgleichung erfolgt wieder mit Hilfe der numerischen Methode aus Abschnitt 1.5.3.

3.1.2 Scharnier- und Normalkraft

Die numerische Integration der in den beiden vorhergehenden Abschnitten hergeleiteten Differentialgleichungen liefert den Öffnungswinkel einer runden bzw. rechteckigen Druckentlastungsklappe als Funktion der Zeit. Aus der Berechnung für $\varphi(t)$ ergeben sich auch die Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ und die Winkelbeschleunigung $\varepsilon(t)$ der Entlastungsklappe. Diese Werte eingesetzt in (1.8), (1.15) und (1.11) liefern die radiale und tangentielle Kraft auf das Klappenscharnier und die Normalkraft auf die Klappe am Ort des Klappenschwerpunktes als Funktion der Zeit. Die Normalkraft auf die Entlastungsklappe kann mit

$$\varepsilon(t) \cdot \Theta_K = F_S(t) \cdot S = F_h(t) \cdot h \quad (3.15)$$

leicht auf jeden anderen Abstand h (Hebel) zwischen Kraftangriffspunkt und Drehachse umgerechnet werden.

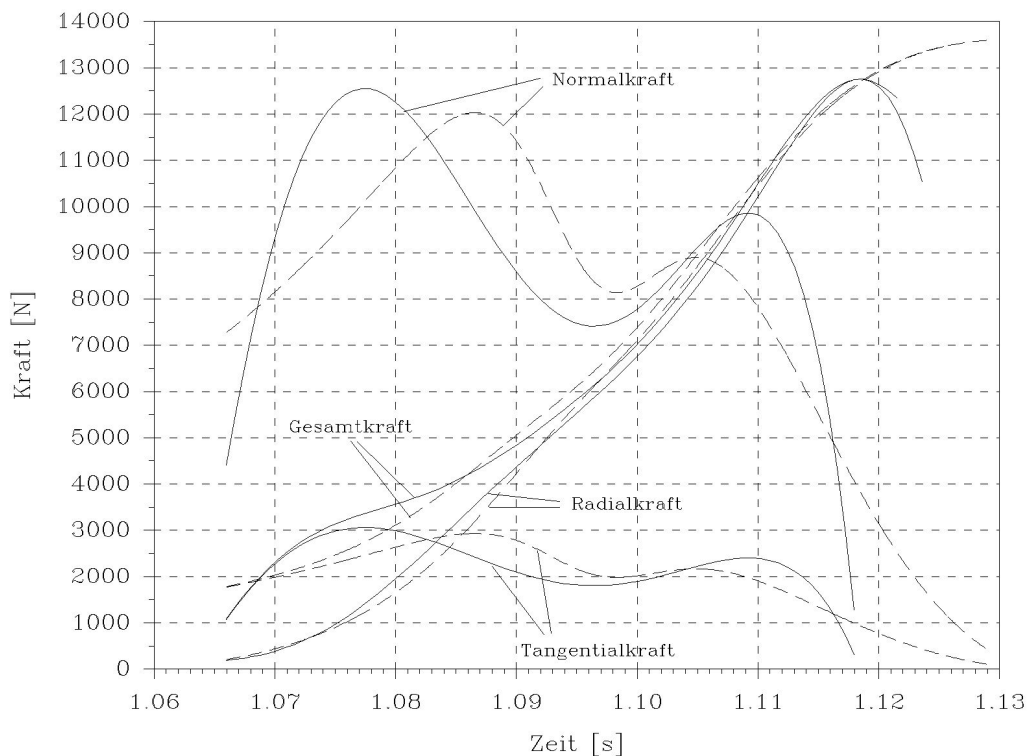


Abbildung 3.4: Experimentell (durchgezogene Linien) und theoretisch (gestrichelte Linien) bestimmte zeitliche Entwicklung der tangentialen, radialen und gesamten Kraft auf das Klappenscharnier sowie der Normalkraft auf die Entlastungsklappe für Versuch 23.

Für die am Klappenscharnier angreifende Gesamtkraft $F_g(t)$ ergibt sich mit (1.8) und (1.15)

$$F_g(t) = \sqrt{F_r^2(t) + F_t^2(t)} \quad (3.16)$$

Abbildung 3.4 zeigt einen Vergleich der experimentell und theoretisch ermittelten zeitlichen Verläufe der an der Entlastungsklappe angreifenden Scharnier- und Normalkräfte am Beispiel von Versuch 23. Wie dort zu sehen ist, weichen Lage und Höhe der im Versuch bestimmten Kraftmaxima auf Klappe und Scharnier von der theoretisch berechneten Lage leicht ab. Das

ist auf den theoretisch unberücksichtigten Einfluss der Klappenschließvorrichtung und der Luftkissenbremsung der Klappe kurz vor den Fangbügeln zurückzuführen. Die Abweichung liegt aber deutlich unter 10%. Das ist ein befriedigendes Ergebnis.

3.1.3 Rotationsenergie

Zur Bestimmung der Rotationsenergie der Klappe als Funktion der Zeit wird nach (1.23) neben dem bekannten Klappenträgheitsmoment Θ_K auch die zeitabhängige Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ benötigt. Wie schon erwähnt wurde, erfolgt die Berechnung des Klappenöffnungswinkels $\varphi(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t , indem die Differentialgleichung (1.22) numerisch mit Hilfe des Runge-Kutta Verfahrens (Abschnitt 1.5.3) gelöst wird. Dabei wird ebenfalls die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\varphi}(t_i) = \omega(t_i)$ berechnet und zwar für alle Zeitpunkte i gemäß (1.44). Einsetzen der $\omega(t_i)$ in (1.23) liefert dann unmittelbar die Rotationsenergie der Klappe zum Zeitpunkt t_i .

3.1.4 Bremskraft und -drehmoment

Um die zeitabhängige Bremskraft auf eine Entlastungsklappe zu berechnen wird ab dem Zeitpunkt des Bremsbeginns t_a die Differentialgleichung (1.22) um ein Bremsglied $\vec{D}_b(t)$ erweitert. Man erhält

$$\vec{D}(t) = \vec{D}_{\text{Ex}}(t) + \vec{D}_{\text{Gr}}(t) + \vec{D}_{\text{LR}}(t) + \vec{D}_{\text{SR}}(t) + \vec{D}_b(t) \quad (3.17)$$

wobei der Betrag des Bremsmomentes durch

$$D_b(t) = -k^\circ \cdot \varphi(t) = -k \cdot h_b^2 \cdot \varphi(t) \quad (3.18)$$

gegeben ist. k , k° und h_b sind wieder die Federkonstante, die Winkelrichtgröße und der Bremshebel. Das Runge-Kutta Verfahren liefert damit für jeden Zeitpunkt t_i den dazugehörigen Klappenöffnungswinkel $\varphi(t_i)$ während des Bremsvorganges. Eingesetzt in (1.24) ergibt sich damit die Federbremskraft zum Zeitpunkt t_i .

3.1.5 Klappenflug

Zur Berechnung der Flugbahn einer Entlastungsklappe nach ihrem Abriss vom Halterungscharnier ist die Kenntnis der Startgeschwindigkeit und des Startwinkels gegen die Horizontale zwingend notwendig. Die Fluggeschwindigkeit einer Entlastungsklappe unmittelbar nach dem Abreißen kann näherungsweise aus dem Energieerhaltungssatz abgeleitet werden. Wird eine Energiedissipation aufgrund von Verformungsarbeit der Klappenaufhängung beim Abreißvorgang vernachlässigt, dann gilt

$$\frac{\Theta_K}{2} \cdot \dot{\varphi}_K^2(t_f) = \frac{m}{2} \cdot v^2(t_f) + \frac{\Theta_S}{2} \cdot \dot{\varphi}_S^2(t_f) \quad (3.19)$$

Der Term links vom Gleichheitszeichen ist die Rotationsenergie der Klappe zum Zeitpunkt t_f des Abreißen. Unmittelbar nach dem Klappenabriss hat sich die Rotationsachse der Klappe vom Rand in den Klappenschwerpunkt parallelverschoben. Der daraus resultierende Energiegewinn erscheint nun als Translationsenergie. Letztere und die Rotationsenergie bei Schwerpunktdrehachse stehen rechts vom Gleichheitszeichen. Löst man (3.19) nach v auf ergibt sich

$$v(t_f) = \sqrt{\frac{\Theta_K \cdot \dot{\varphi}_K^2(t_f) - \Theta_S \cdot \dot{\varphi}_S^2(t_f)}{m}} \quad (3.20)$$

Nach den Erfahrungen unserer Versuche sollte die Flugweite einer abgerissenen Entlastungsklappe maximal werden, wenn die Klappe bei einem Öffnungswinkel um 50° abreißt. Dann ist nämlich die Winkelgeschwindigkeit maximal und man liegt sehr nah am optimalen 45° -Startwinkel. In Abbildung 3.5 ist die Flugbahn für die Gegebenheiten unseres Versuches 36 bei verschiedenen Windbedingungen dargestellt.

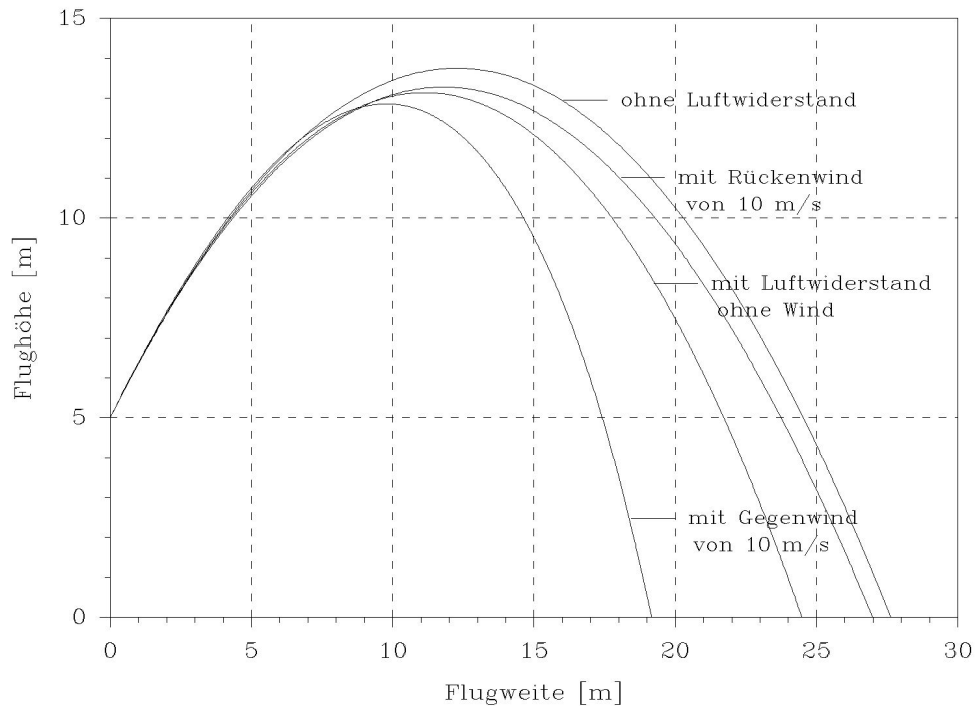


Abbildung 3.5: Flugbahnen der von uns im Versuch 36 verwendeten Entlastungsklappe bei einem Abreißwinkel von 55° , einer Startgeschwindigkeit von $16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einer Starthöhe von 5 m.

Wie man der Abbildung entnehmen kann, hängt die Flugweite einer abgerissenen Entlastungsklappe in erster Linie von der Starthöhe, der Startgeschwindigkeit und den Windverhältnissen ab. Diese Aussage gilt ganz allgemein für frei durch die Luft fliegende Gegenstände, wobei die erreichten Flugweiten dann allerdings stark von der Körperform, vom Reibungskoeffizienten c_n und vom Rotationsverhalten des Gegenstandes beeinflusst werden. Mit den Randbedingungen unserer Versuche lägen die Flugweiten der Entlastungsklappen zwischen 10 m und 30 m. Wird bei der Berechnung der Flugweite kein Luftwiderstand berücksichtigt (Formel (1.39)), so ergibt sich bei vorausgesetzter Windstille ein Fehler zwischen 10% und 15%.

3.2 Entlastungsdeckeldynamik

3.2.1 Deckelbeschleunigung

3.2.1.1 Beschleunigung eines runden Entlastungsdeckels

Die Berechnung der Deckelbeschleunigung erfolgt analog dem Abschnitt 3.1.1. Statt der wirkenden Drehmomente müssen hier die am Entlastungsdeckel angreifenden Kräfte bestimmt und in die Differentialgleichung (1.28) eingesetzt werden.

Für die deckelabhebende Kraft sollte näherungsweise

$$F_{\text{Ex}}(t) \approx \frac{p(t) \cdot A_E}{1 + \exp\left(\frac{-y(t)-0,2}{-0,06}\right)} + \frac{c_n \cdot \rho_s(t) \cdot \pi \cdot D_D^2 \cdot v_{\text{rel}}^2(t)}{8 \cdot \exp\left(\frac{-y(t)-0,3}{0,09}\right) - \exp\left(\frac{-y(t)-2}{0,3}\right)} \quad (3.21)$$

gelten, wobei A_E wieder die Fläche der Entlastungsöffnung am Silo und D_D den Durchmesser des kreisförmigen Entlastungsdeckels darstellt. $y(t)$ ist der vom Deckel zurückgelegte Weg senkrecht in die Höhe. Wie auch (3.5) setzt sich (3.21) aus einem druckbedingten und einem reibungsbedingten Beschleunigungsterm zusammen. Die Gewichtung beider Terme beim Deckelabsprengprozess geschieht durch zwei nichtlineare Funktion, wie Abbildung 3.6 zeigt.

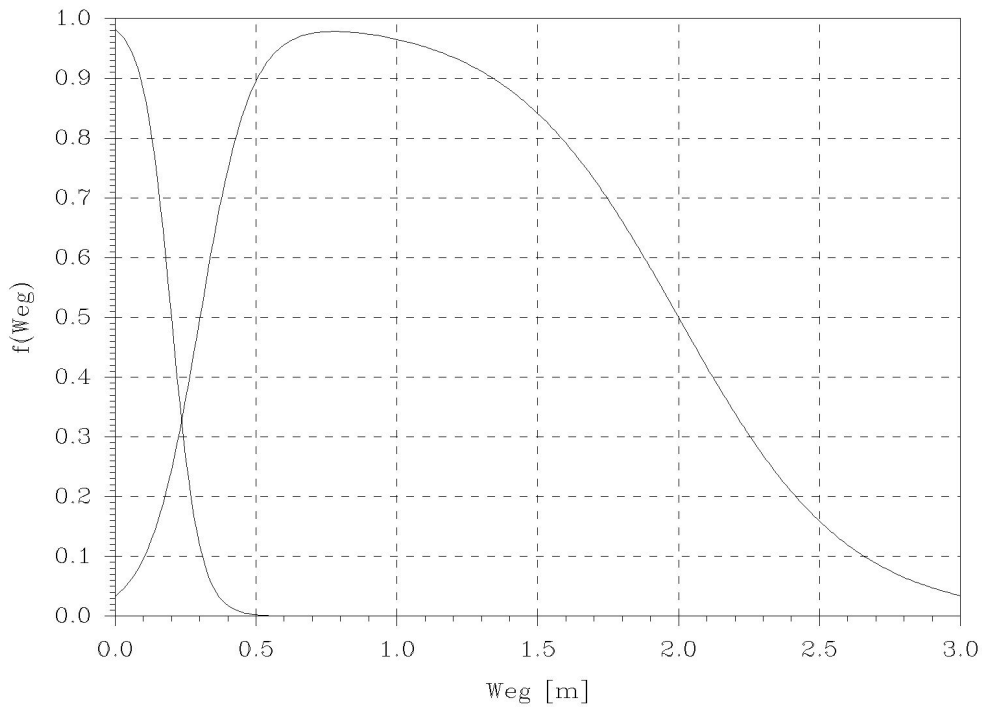


Abbildung 3.6: Verlauf der Funktionen $\left(\exp\left(\frac{-y(t)-0,3}{0,09}\right) - \exp\left(\frac{-y(t)-2}{0,3}\right)\right)^{-1}$ und $\left(1 + \exp\left(\frac{-y(t)-0,2}{-0,06}\right)\right)^{-1}$.

Wie gut die abfallende Flanke der Peak-Funktion den mit wachsenden Abstand des Entlastungsdeckels vom Silo fallenden reibungsbedingten Deckelkantrieb zu beschreiben vermag, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Die Abschätzung in (3.21) soll an dieser Stelle ausreichen.

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Entlastungsdeckel und ausströmender Materie aus dem Silo wird abgeschätzt durch

$$v_{\text{rel}}(t) \approx \xi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p(t)}{\rho_s}} - \dot{y}(t) \quad (3.22)$$

Die zeitabhängige Materiedichte ρ_s im Silo ergibt sich unverändert wie in Abschnitt 3.1.1.1 beschrieben, wobei für die ebenfalls zeitabhängige Öffnungsfläche hier allerdings

$$A_{ED}(t) = \pi \cdot D_D \cdot (y(t) - Kr) \quad (3.23)$$

anzusetzen ist. Das Kr ist wieder die Breite eines eventuell vorhandenen Deckelrandes. Für die wirkende Gravitationskraft gilt

$$F_{Gr} = m \cdot g \quad (3.24)$$

und für die auf den Entlastungsdeckel wirkende Kraft aufgrund des Luftwiderstand gilt die Gleichung

$$F_{LR}(t) = \frac{1}{2} \cdot c_n \cdot \rho_l \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_D}{2}\right)^2 \cdot \dot{y}^2(t) \quad (3.25)$$

(3.21), (3.24) und (3.25) eingesetzt in (1.28) liefert mit Hilfe des Runge-Kutta Lösungsverfahrens den Ort $y(t)$ und die Geschwindigkeit $\dot{y}(t)$ eines runden Entlastungsdeckels als Funktion der Zeit. Daraus können alle weiteren wichtigen Größen berechnet werden.

3.2.1.2 Beschleunigung eines rechteckigen Entlastungsdeckels

Alle Aussagen des vorhergehenden Abschnittes gelten prinzipiell auch für rechteckige Entlastungsdeckel. Für die Öffnungsfläche als Funktion der Zeit muss bei diesen Bedingungen aber

$$A_{ED}(t) = 2 \cdot (a_E + b_E) \cdot (y(t) - Kr) \quad (3.26)$$

angesetzt werden mit a_E und b_E als Seiten der rechteckigen Entlastungsöffnung. Damit und mit (3.14) verändert sich auch (3.25) zu

$$F_{LR}(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(1,155 + 0,0139 \cdot \chi - \frac{0,0686}{\chi}\right) \cdot \rho_l \cdot a \cdot b \cdot \dot{y}^2(t) \quad (3.27)$$

Der eingeklammerte Ausdruck ist der von χ abhängige Reibungskoeffizient c_n , wobei χ wieder das Seitenverhältnis der beiden Deckelseiten a und b darstellt. Auf dieselbe Art und Weise verändert sich auch der Reibungsterm in (3.21). Es ergibt sich

$$F_{Ex}(t) = \frac{p(t) \cdot A_E}{1 + \exp\left(\frac{-y(t)-0,2}{-0,06}\right)} + \frac{\left(1,155 + 0,0139 \cdot \chi - \frac{0,0686}{\chi}\right) \cdot \rho_s(t) \cdot a \cdot b \cdot v_{rel}^2(t)}{8 \cdot \exp\left(\frac{-y(t)-0,3}{0,09}\right) - \exp\left(\frac{-y(t)-2}{0,3}\right)} \quad (3.28)$$

3.2.2 Normalkraft

Die Durchführung einer Simulationsrechnung mit den in Abschnitt 3.2.1.1 beschriebenen Zusammenhängen und den Bedingungen aus Versuch 23 ergibt den in Abbildung 3.7 gezeigten zeitlichen Verlauf für die resultierende Kraft (Normalkraft) $F_D(t)$ auf einen kreisrunden Druckentlastungsdeckel mit 36,3 kg Masse und einer Fläche von 0,5 m². Außerdem ist die kinetische Energie und die Steighöhe des Deckels als Funktion der Zeit eingezeichnet.

Vergleicht man den Maximalwert der Normalkraft mit demjenigen aus Abbildung 3.4 (Entlastungsklappe), so wird sofort ein entscheidender Nachteil von Entlastungsdeckeln gegenüber Entlastungsklappen deutlich. Weil ein Deckel im Gegensatz zu einer Klappe während des Entlastungsvorganges anhaltend im Gasstrom verweilt, erfährt er eine größere beschleunigende Kraft als eine Klappe. Als Konsequenz daraus nimmt er weit mehr Energie auf, die es in Form geeigneter Abfangvorrichtungen zu verzehren gilt.

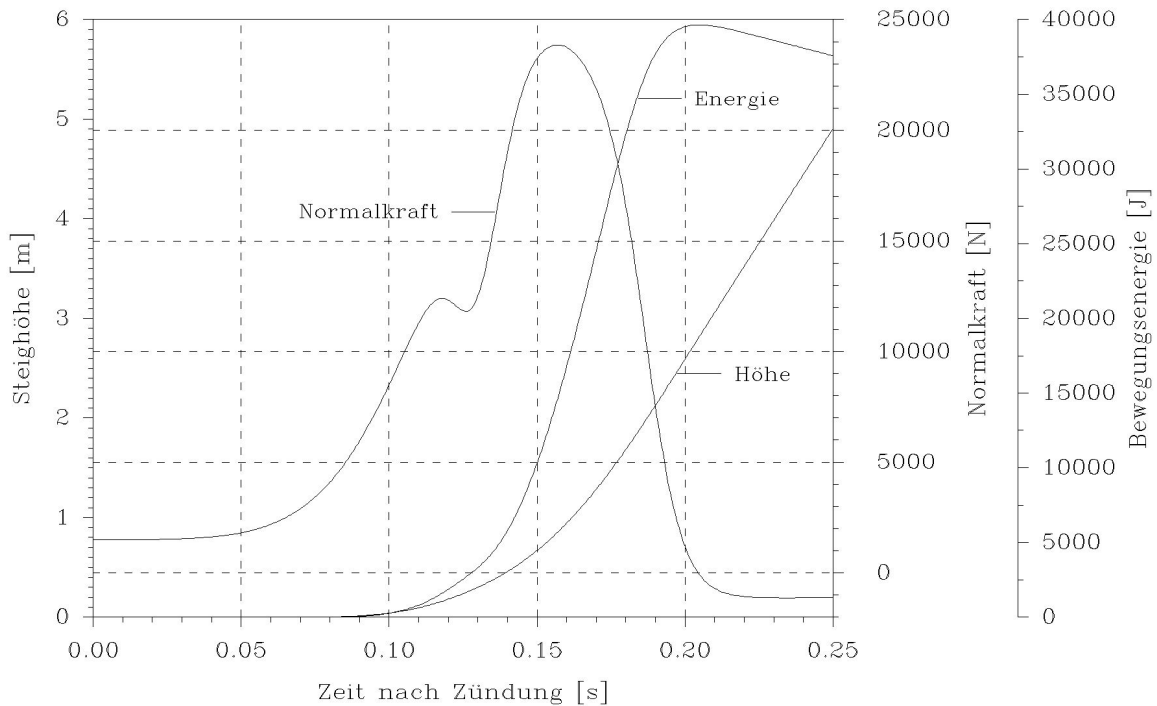


Abbildung 3.7: Berechnete zeitliche Entwicklung der Normalkraft auf einen Druckentlastungsdeckel für Randbedingungen, die unserem Versuch 23 entsprechen. Ebenfalls dargestellt ist die daraus abgeleitete Steighöhe des Deckels sowie dessen kinetische Energie.

3.2.3 Bewegungsenergie

Bei der numerischen Berechnung des Entlastungsdeckelweges bzw. dessen Steighöhe $y(t_i)$ wird auch die Geschwindigkeit $\dot{y}(t_i)$ für i Zeitpunkte ausgegeben. Mit Hilfe der linken Gleichung in Formel (1.29) und den bekannten Geschwindigkeitswerten kann die kinetische Energie eines Entlastungsdeckels als Funktion der Zeit errechnet werden. Abbildung 3.7 zeigt einen Teil einer solchen Energiekurve für die dort beschriebenen Bedingungen.

3.2.4 Bremskraft

Zur Bestimmung der fangseilbedingten Bremskraft auf den Entlastungsdeckel als Funktion der Zeit wird zur Differentialgleichung (1.28) ein weiteres Bremsglied addiert. Es folgt also

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m(t)} \cdot \left(F_{\text{Ex}}(t) - F_{\text{Gr}}(t) - F_{\text{LR}}(t) - F_{\text{b}}^{\text{kin}}(t) \right) \quad (3.29)$$

mit Formel (1.30) als Bremssterm $F_{\text{b}}^{\text{kin}}(t)$. Gleichung (3.29) wird ab dem Zeitpunkt des Abfangbeginns t_a anstelle des ursprünglichen Ausdrucks (1.28) mit dem Runge-Kutta Verfahren gelöst. Von den so aufgefundenen Werten für die Deckelsteighöhe nach dem Abfangbeginn wird die Steighöhe zum Zeitpunkt t_a subtrahiert. Die dadurch erhaltenen Werte für die Seildehnung $l_b(t)$ werden in (1.30) eingesetzt und liefern so unmittelbar die Bremskraft pro Fangseil.

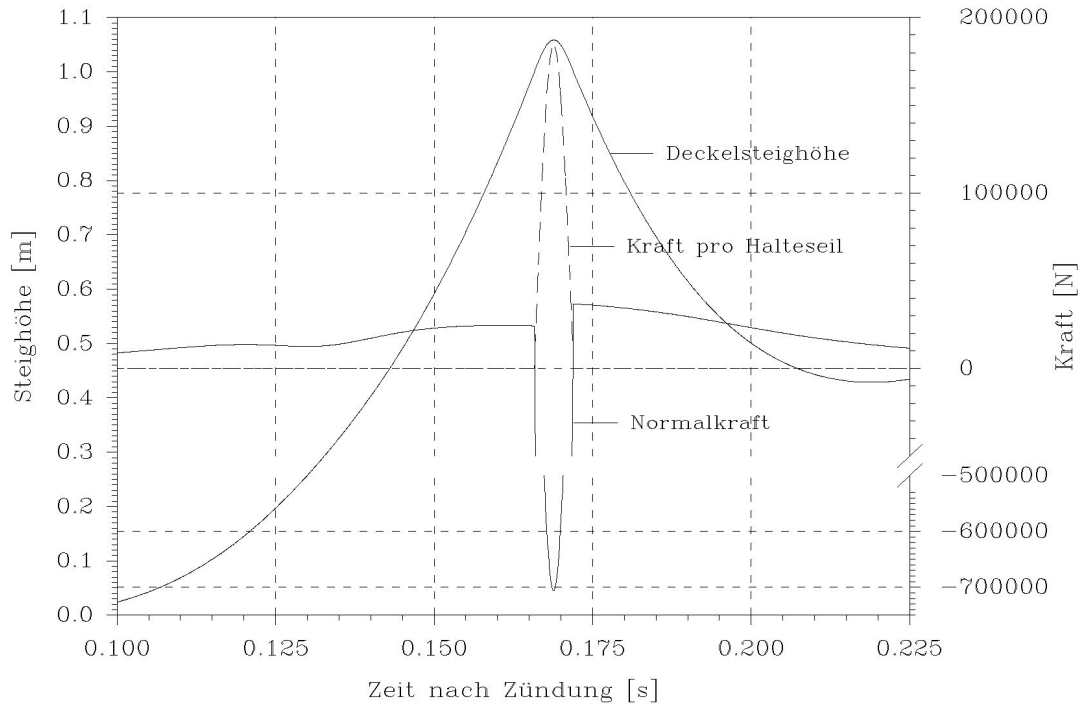


Abbildung 3.8: Berechnete zeitliche Entwicklung der Normalkraft auf einen Druckentlastungsdeckel mit 4 Fangseilen (Länge: 1 m, Durchmesser: 0,02 m, Elastizitätsmodul: 10^{10} N·m⁻²) für Randbedingungen, die unserem Versuch 23 entsprechen. Die Deckelsteighöhe und die auf ein Fangseil wirkende Kraft ist ebenfalls gezeigt.

Eine erneute Simulationsrechnung für einen Entlastungsdeckel mit vier Fangseilen bei den Bedingungen des Versuches 23 liefert die Kurven aus Abbildung 3.8. Die Normalkraft (Resultierende) auf den Deckel bzw. dessen Beschleunigung ist zunächst (zunehmend) positiv. Folglich wächst die Steighöhe stärker als mit dem Quadrat der Zeit t . Beim Erreichen von 1 m Steighöhe spannen sich die Halteseile und der Bremsvorgang beginnt. Über etwa 17 ms dominiert die starke Bremskraft (Kraftpeaks), hervorgerufen durch die Dehnung der Halteseile, alle anderen Kräfte. Der Deckel wird dadurch wieder nach unten beschleunigt. Während dieser Abwärtsbewegung des Deckels wirkt noch immer die nach oben beschleunigende Kraft aufgrund der aus dem Silo strömenden Materie, sodass der Deckel in seiner Abwärtsbewegung abgebremst und schließlich erneut nach oben bewegt wird.

Ein Vergleich der theoretisch ermittelten Kraftspitze pro Seil mit dem entsprechenden abgeschätzten Wert aus Tabelle 2.13 zeigt eine Diskrepanz zwischen beiden Größen von rund 31000 N. Das entspricht etwa 17%, die die geschätzte Spitzenkraft pro Seil hinter der durch Simulation bestimmten zurückbleibt. Im Gegensatz zur Abschätzung wird bei der Simulationsrechnung die Arbeit der Kraft $F_D(y(t))$ am Deckel auf dem Bremsweg (Integralterm in Formel (1.32)) berücksichtigt sowie der Einfluss der Seilmasse. Deshalb übersteigt die theoretisch ermittelte Kraftspitze pro Seil den auf der Basis experimenteller Daten abgeschätzten Wert.

3.2.5 Deckelflug

Zur genauen Berechnung der Flugbahn eines abgerissenen Druckentlastungsdeckels ist die Kenntnis der Anfangsgeschwindigkeit $v(t_f)$, des Startwinkels α und das Rotationsverhalten des Deckels um eine Schwerpunktsachse zwingend erforderlich. Konnten diese Größen im Fall einer sich losreisenden Entlastungsklappe relativ einfach bestimmt werden, so ist dies beim mit Seilen gesicherten, abreißenen Entlastungsdeckel nicht mehr ohne erheblichen Aufwand möglich. Wird ein anfänglich unbelastetes Seil mit stetig steigender Kraft bis zum Zerreißen gespannt, so zeigt sich eine komplizierte, nichtlineare Abhängigkeit der Seildehnung von der wirkenden Kraft. Wäre diese Abhängigkeit für jedes beliebige Seil bekannt (was sie nicht ist), so könnte der Verlust des Deckels an kinetischen Energie beim Abfangvorgang bis zum Abriss berechnet werden und damit auch die Deckelanfangsgeschwindigkeit. Der Startwinkel eines abreißenen Entlastungsdeckels hängt von der Gleichmäßigkeit der Deckelbeschleunigung über die Deckelfläche und von der Reihenfolge der einzelnen Seilrisse bzw. von der zeitlichen Differenz dazwischen ab. Letzteres ist auch ausschlaggebend für das Rotationsverhalten eines abgerissenen Deckels. Kann die Anfangsgeschwindigkeit aus der genauen Kenntnis der Seileigenschaften noch halbwegs vernünftig abgeschätzt werden, so ist das beim Startwinkel und beim Rotationsverhalten nahezu ausgeschlossen.

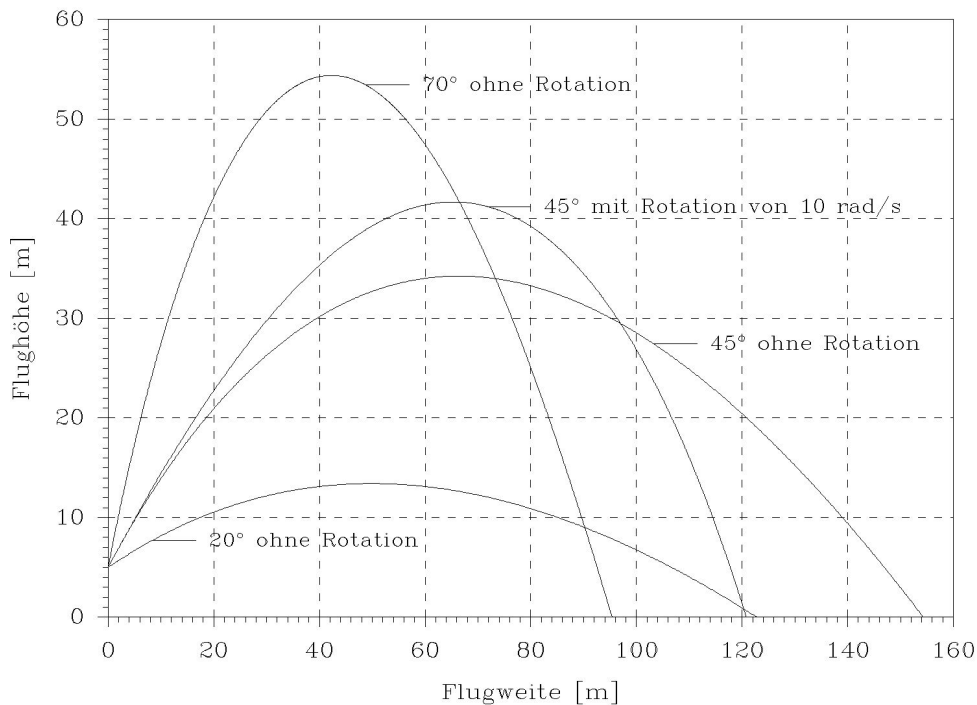


Abbildung 3.9: Deckelflugbahnen bei einer Startgeschwindigkeit von $45 \frac{m}{s}$ und den drei Startwinkeln 20° , 45° und 70° . Der Deckel rotiert nicht und seine Fläche ist parallel zur Erdoberfläche ausgerichtet. Um den Einfluss der Rotation zu zeigen, ist für 45° Startwinkel noch einmal die Flugbahn berechnet, die der Deckel bei einer Rotationswinkelgeschwindigkeit von $10 \frac{rad}{s}$ durchlaufen würde. Alle anderen Bedingungen wie bei Versuch 23.

Wegen der hier geschilderten großen Schwierigkeiten bei der Beschaffung der Anfangswerte zur Flugsimulationsrechnung für seilbefestigte Entlastungsdeckel, soll sich im Rahmen dieser Arbeit mit einer „worst case“-Rechnung zufrieden gegeben werden.

Fogende Annahmen werden zugrunde gelegt:

- Es findet praktisch keine Deckelabbremung durch die Fangseile statt
- Der Startwinkel liegt bei optimalen 45°
- Die Winkelgeschwindigkeit der Deckelrotation ist nahezu Null, wobei die Deckelfläche immer parallel zur Erdoberfläche orientiert ist (der Deckel „gleitet“ im Medium Luft)

In Abbildung 3.9 sind verschiedene Varianten des Deckelsfluges dargestellt. Zu deren Berechnung wurden wieder die Gegebenheiten unseres Versuches 23 herangezogen. Wie man dieser Abbildung entnimmt, werden als maximale Flugweite gut 154 m erreicht. Dieser Wert stellt die Obergrenze aller möglichen Flugweiten dar, die bei den vorgegebenen Parametern und bei Windstille erreicht werden können. Weitere durchgeführte Simulationsrechnungen mit wirklichkeitsnäherem Verhalten des Deckels (geringere Startgeschwindigkeit, Deckel rotiert) haben gezeigt, dass in der Realität mit Flugweiten zwischen 50% und 60% der maximal erreichbaren Weite gerechnet werden muss.

3.3 Zeitlicher Druckverlauf in druckentlasteten Behältern

Alle bisher aufgezeigten Modellrechnungen, sei es die Kraftbestimmung an Entlastungsklappen oder die Abschätzung von Flugweiten, setzten in irgendeiner Form die Kenntnis des zeitlichen Druckverlaufes im druckentlasteten Silobehälter voraus. Die Beschaffung einer möglichst allgemeingültigen Berechnungsmethode für $p(t)$ ist damit unabdingbar.

Parallel zu laufenden Projekten wird derzeit eine numerische Simulationsrechnung der verbrennungsphysikalischen Vorgänge bei der druckentlasteten Staubexplosion in Silobehältern versucht. Erste Erfolge wurden bis dato für geschlossene, kugelförmige Behältern erzielt. Um den physikalischen Zustand eines verbrennenden Staub/Luft-Gemisches im druckentlasteten Behälter für jeden Zeitpunkt wenigstens annähernd berechnen zu können, werden aber mindestens 2 bis 3 Jahre intensiver Arbeit an diesem Problem vonnöten sein, wobei der Erfolg nicht garantiert werden kann.

Aufgrund dessen kann hier zunächst nur eine empirische Formel zur Beschreibung des zeitlichen Druckverlaufes im Silo angegeben werden. Aus langwierigem Probieren nichtlineare Funktionen an die uns aus zahlreichen Experimenten vorliegenden zeitlichen Druckverläufe anzupassen, hat sich die modifizierte Gaußfunktion

$$p(t) = p_{\text{redmax}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|t-a|}{b}\right)^c\right) \quad (3.30)$$

als besonders geeignet erwiesen. Die Variable a in (3.30) kennzeichnet die Lage des Druckmaximums auf der Zeitachse. Die anderen beiden Variablen b und c sind vor allem über den Ausdruck für die Halbwertsbreite $2 \cdot b \cdot (2 \cdot \ln(2))^{\frac{1}{c}}$ maßgebend bezüglich der Form der Peak-Funktion.

Die Parameter b und c wurden nun aus den Druckkurven unserer Versuche bzw. aus Druckkurven anderer Klappenprüfungen¹ abgeleitet. Bei letzteren kamen rechteckige Klappen mit Flächen von $0,5 \text{ m}^2$ bis 2 m^2 auf dem $9,4 \text{ m}^3$ -Silo bzw. dem 60 m^3 -Silo zum Einsatz.

¹Auch diese Projekte fanden auf dem Versuchsgelände der BGN in Kappelrodeck (Schwarzwald) statt.

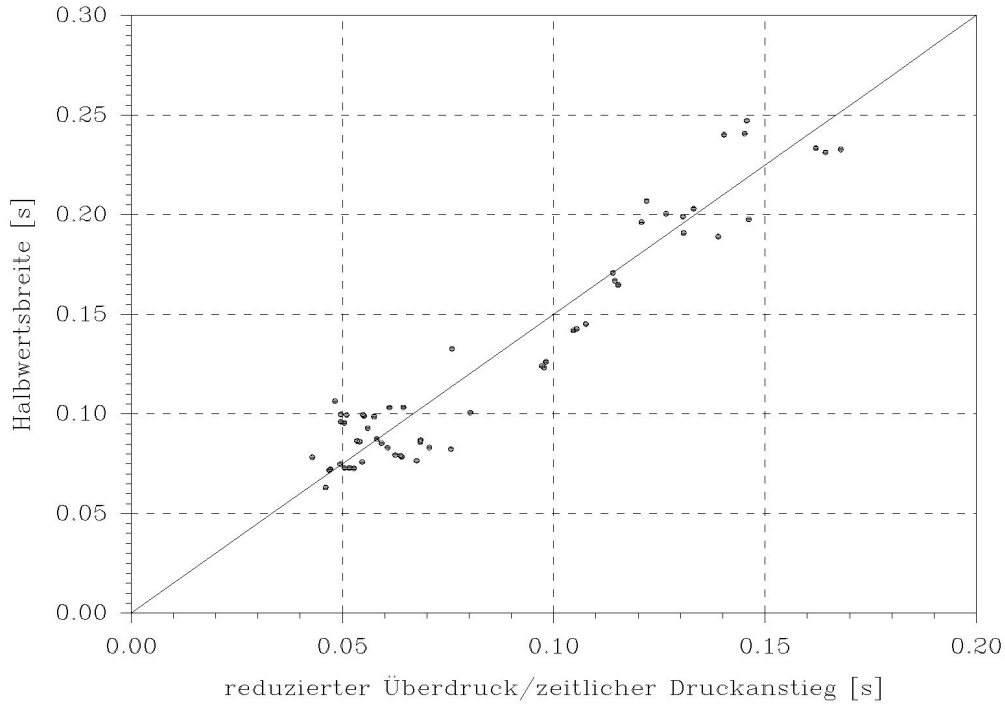


Abbildung 3.10: Abhängigkeit der Halbwertsbreite des zeitlichen Druckverlaufes von dem Quotienten aus $p_{\text{red,max}}$ und $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ (Messpunkte und Fit-Gerade). Die Messpunkte stammen aus unseren Versuchen und aus anderen Klappentests durchgeführt an einem 60 m^3 -Silo.

Wie man Abbildung 3.10 entnimmt, lässt sich die Halbwertsbreite HWB der Druckkurven gut anhand der Gleichung

$$HWB \approx 1,5 \cdot p_{\text{red,max}} \cdot \left(\frac{dp}{dt} \Big|_{\text{max}} \right)^{-1} \quad (3.31)$$

beschreiben. Für den Parameter b ergibt sich eine sehr ähnliche Abhängigkeit nämlich

$$b \approx 0,637 \cdot p_{\text{red,max}} \cdot \left(\frac{dp}{dt} \Big|_{\text{max}} \right)^{-1} \quad (3.32)$$

Mit (3.31) und (3.32) und dem Ausdruck für die Kurvenhalbwertsbreite ergibt sich für c der Wert

$$c = \frac{\ln(2 \cdot \ln(2))}{\ln\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{HWB}{b}\right)} = \frac{\ln(2 \cdot \ln(2))}{\ln\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1,5}{0,637}\right)} \approx 2 \quad (3.33)$$

Die durch Anpassung von (3.30) an die gemessenen zeitlichen Druckverläufe gewonnenen Werte des Parameters c zeigen eine Gauß'sche Streuung um den Wert 2 ($1,7 < c_{\text{fit}} < 2,3$). Dieser Sachverhalt kann als Bestätigung von (3.33) dienen. Der für die Kurvenform (und damit für das Klappen- bzw. Deckelöffnungsverhalten) unwichtige Parameter a kann beliebig gewählt werden, z. B. zweimal die Halbwertsbreite. Damit wird die empirisch-mathematische Beschreibung von zeitlichen Druckverläufen in druckentlasteten Behältern auf die (ebenfalls empirische) Berechnung des reduzierten Druckes $p_{\text{red,max}}$ nach (2.10) und des zeitlichen Druckanstieges $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ zurückgeführt. $p_{\text{red,max}}$ und $\frac{dp}{dt}|_{\text{max}}$ aller von uns untersuchten Druckverläufe

zeigen einen funktionalen Zusammenhang wie (2.18). Die Konstante c in (2.18) scheint dabei nur vom Behältervolumen V abzuhängen und zwar in Form der dritten Wurzel gemäß dem kubischen Gesetz. Der Einfluss des verwendeten Staubes kann aus unseren bisherigen experimentellen Daten nicht abgeschätzt werden, da ausschließlich Maisstärke verwendet wurde. Deshalb wird in (2.18) das Verhältnis aus den staubspezifischen Kenngrößen K_{St} und p_{max} eingeführt, um die reaktionskinetischen Eigenschaften² eines beliebigen Staubes wenigstens annähernd zu berücksichtigen.

Mit diesen Überlegungen ergibt sich aus (2.18)

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max} \approx 1,72 \cdot \frac{K_{St}}{\sqrt[3]{V}} \cdot \frac{p_{\text{red,max}}}{p_{\max}} \quad (3.34)$$

wobei mit der Konstanten in (3.34) die zeitlichen Druckanstiege aller uns vorliegenden Druckkurven in guter Näherung beschrieben werden können. Einen Vergleich von zwei gemessenen und dazu entsprechend berechneten zeitlichen Druckverläufen $p(t)$ zeigt Abbildung 3.11.

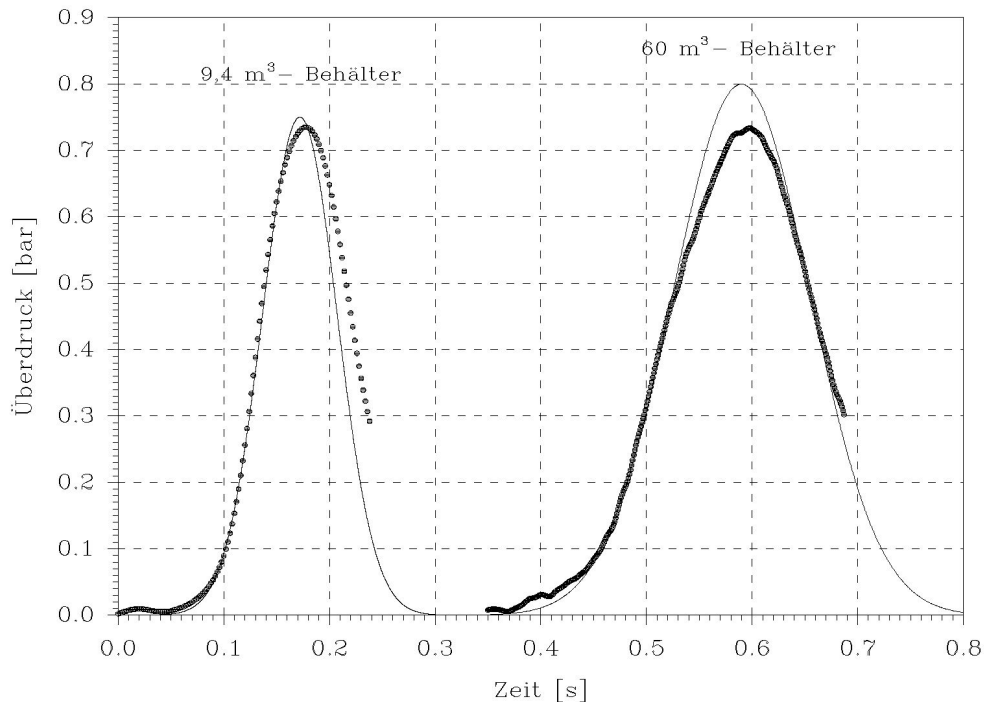


Abbildung 3.11: Vergleich von gemessenen (Punkte, geglättet) und berechneten (Linien) zeitlichen Druckentwicklungen in zwei verschieden großen, unterschiedlich druckentlasteten Silos. 9,4 m³-Behälter: $K_{St}^* = 200 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$, $Q = 14,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$, $A_E = 0,485 \text{ m}^2$. 60 m³-Behälter: $K_{St}^* = 200 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$, $Q = 3,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$, $A_E = 1,5 \text{ m}^2$.

Wie man Form und relative Lage der Kurven aus Abbildung 3.11 entnimmt, können die willkürlich ausgewählten Messkurven mit den hier entwickelten Berechnungsmethoden in guter Näherung wiedergegeben werden. Die gemessenen und berechneten Druckverläufe weichen gelegentlich im unteren Drittel der abfallenden Flanke des Druckpeaks stärker voneinander

²Erreichen z. B. zwei verschiedene Stäube im Explosionsversuch den gleichen maximalen Überdruck p_{\max} , so können sie aufgrund unterschiedlicher Verbrennungsgeschwindigkeit in ihrem zeitlichen Druckanstieg $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max}$, d. h. K_{St} -Wert, deutlich voneinander abweichen.

ab. Das liegt daran, dass der zeitliche Druckverlauf bei stattfindender Staubexplosion in einem Silo keine symmetrische Peak-Funktion ist wie die modifizierte Gauß-Funktion. Durch das Abblasen des Siloinhaltes und das anschließende Abkühlen entsteht ein kurzzeitiger Unterdruck im Behälter, der mit einer einfachen Gauß-Funktion nicht beschrieben werden kann. Dieser Sachverhalt ist aber für die hier angestellten Berechnungen nicht von Belang, da der Öffnungsvorgang von Entlastungsklappen bzw. -deckeln bis zum Erreichen der unteren Bereiche der abfallenden Druckflanke längst abgeschlossen ist. Sonstige Abweichungen etwa in p_{red} oder der Halbwertsbreite des Druckpeaks liegen meist unter 10%. Wichtig ist, dass die aufsteigende Flanke des zeitlichen Druckverlaufes im Silo gut wiedergegeben wird, weil diese entscheidend für das Öffnungsverhalten einer Entlastungsklappe bzw. eines -deckels ist. Diese Bedingung wird von der modifizierten Gauß-Funktion sehr gut erfüllt.

Mit der hier eröffneten Möglichkeit der mathematisch-empirischen Beschreibung zeitlicher Druckverläufe bei Staubexplosionen in Silo-Behältern können nun alle sicherheitstechnisch relevanten mechanischen Größen beim Druckentlastungsvorgang mittels Entlastungsklappen oder -deckeln errechnet bzw. abgeschätzt werden. Die hierfür notwendigen Formeln aus den Kapiteln 2 und 3 werden in dem einschlägigen Rechner-Programm SIMEK angewandt (siehe Kapitel 6).

Kapitel 4

Berechnungen und Zahlen

4.1 Berechnungen

4.1.1 Berechnung des Entlastungsklappenschwerpunktes

4.1.1.1 Klappenteile 1 und 2

Zwei baugleiche Klappenteile mit relativ komplizierter Geometrie befinden sich nahe an der Drehachse der Klappe. Sie dienen der Lagerung der Welle, durch welche Klappe und Klappenhaltegestell verbunden sind. Die Zahlenwerte der in den Abbildungen aufgeführten Abmessungen finden sich im Abschnitt 4.2.1.

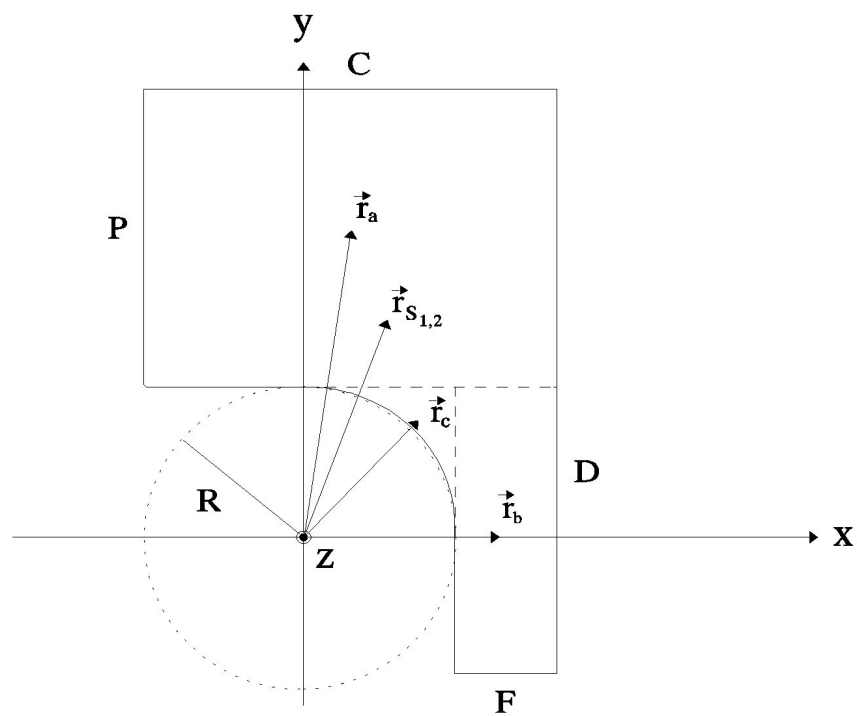


Abbildung 4.1: Skizze der Entlastungsklappenteile $n = 1, 2$. Diese werden in die drei einfacheren Körper mit den Schwerpunkten \vec{r}_a , \vec{r}_b und \vec{r}_c zerlegt.

Während die Punkte \vec{r}_a und \vec{r}_b ohne Rechnung angegeben werden können, muss \vec{r}_c mit Hilfe von (1.16) berechnet werden. Es ergibt sich für \vec{r}_c (siehe Abbildung 4.1)

$$x_c = \frac{\int_0^R \int_{\sqrt{R^2-x^2}}^R x \, dy \, dx}{\int_0^R \int_{\sqrt{R^2-x^2}}^R dy \, dx} = \frac{R}{6 - \frac{3}{2} \cdot \pi} = \frac{\int_0^R \int_{\sqrt{R^2-x^2}}^R y \, dy \, dx}{\int_0^R \int_{\sqrt{R^2-x^2}}^R dy \, dx} = y_c \quad (4.1)$$

Weil die Dichte konstant und für alle Körper gleich ist, fällt ρ in (1.16) heraus. Mit (1.17) ergibt sich schließlich als Gesamtschwerpunkt für das Klappenteil 1 bzw. 2

$$\vec{r}_{S_{1,2}} = \begin{pmatrix} 7,76 \\ 26,35 \\ 2,5 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Diese und alle folgenden Koordinatenangaben beziehen sich auf das jeweils benutzte Koordinatensystem und sind in der Einheit mm angegeben. Der Wert der z -Koordinate bezieht sich auf die aus der Papierebene zeigende (in Richtung des Betrachters) z -Achse, wobei die Körper „auf dem Papier liegen“.

4.1.1.2 Klappenteil 3

Diese Klappenkomponente lässt sich in seiner Draufsicht in zwei identische Dreiecke, zwei Rechtecke und sechs Kreise zerlegen. Für die Quader und Kreisscheiben kann der Schwerpunkt sofort angegeben werden, wie man leicht Abbildung 4.2 entnimmt.

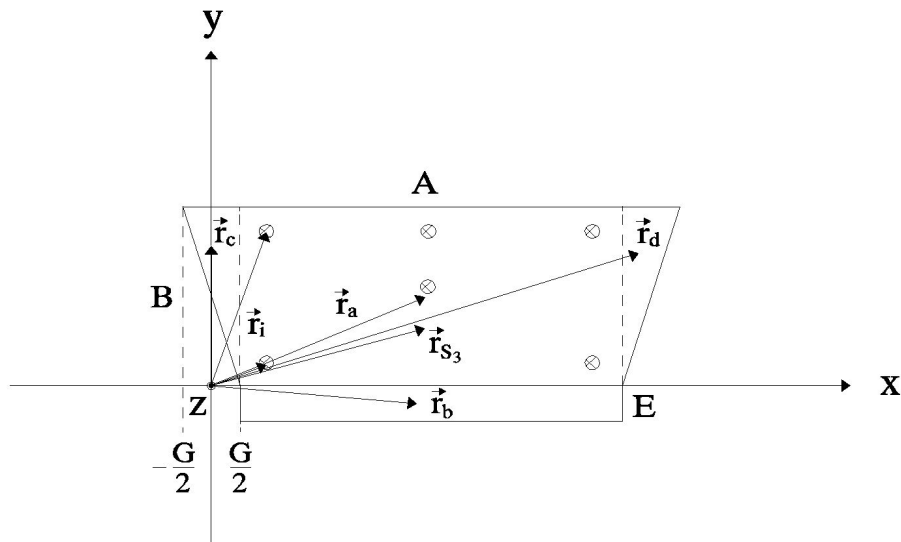


Abbildung 4.2: Skizze des Entlastungsklappenteiles $n = 3$. Es wird in zehn einfachere Körper mit den Schwerpunkten \vec{r}_a , \vec{r}_b , \vec{r}_c , \vec{r}_d und \vec{r}_i zerlegt.

Für die dreieckige Grundfläche, gekennzeichnet mit dem Index c , ergibt sich nach der Formel (1.16) für die Schwerpunktberechnung

$$x_c = \frac{\int_{-\frac{G}{2} - \frac{B}{G} \cdot x + \frac{B}{2}}^{\frac{G}{2}} \int_0^B x \, dy \, dx}{\int_{-\frac{G}{2} - \frac{B}{G} \cdot x + \frac{B}{2}}^{\frac{G}{2}} \int_0^B dy \, dx} = \frac{G}{6} \quad y_c = \frac{\int_{-\frac{G}{2} - \frac{B}{G} \cdot x + \frac{B}{2}}^{\frac{G}{2}} \int_0^B y \, dy \, dx}{\int_{-\frac{G}{2} - \frac{B}{G} \cdot x + \frac{B}{2}}^{\frac{G}{2}} \int_0^B dy \, dx} = \frac{2}{3} \cdot B \quad (4.3)$$

Mit Hilfe von (4.3) können alle zehn Schwerpunktkoordinaten der Einzelkörper angegeben werden und es folgt mit (1.17)

$$\vec{r}_{S_3} = \begin{pmatrix} 332,75 \\ 86,05 \\ 2,5 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

4.1.1.3 Klappenteile 4 und 5

Die Teile 4 und 5 schließen an die Klappenteile 1 und 2 an und sind über jeweils eine Falz mit diesen verbunden. Es handelt sich hier um zwei Quader, so dass der Schwerpunkt im Symmetriezentrum der Körper liegt.

4.1.1.4 Klappenteile 6 und 7

Dies sind ebenfalls Quader, die sich an das Teil 3 über Falzungen anschließen. Die zugehörigen Schwerpunktkoordinaten sind wieder die Symmetriezentren der Körper.

4.1.1.5 Klappenteil 8

Entlastungsklappenteil 8 grenzt unmittelbar an die kreisförmige Deckelplatte an. Mit (1.16) folgt aus Abbildung 4.3 für den Schwerpunkt des Körpers ohne Berücksichtigung der Bohrungen (Kreisscheiben)

$$x_c = \frac{\int_{-P_e}^{P_e} \int_{\sqrt{R_K^2 - x^2}}^{R_K + M} x \, dy \, dx}{\int_{-P_e}^{P_e} \int_{\sqrt{R_K^2 - x^2}}^{R_K + M} dy \, dx} = 0$$

$$y_c = \frac{\int_{-P_e}^{P_e} \int_{\sqrt{R_K^2 - x^2}}^{R_K + M} y \, dy \, dx}{\int_{-P_e}^{P_e} \int_{\sqrt{R_K^2 - x^2}}^{R_K + M} dy \, dx} = \frac{2 \cdot P_e \cdot R_K \cdot M + P_e \cdot M^2 + \frac{1}{3} \cdot P_e^3}{2 \cdot P_e \cdot (R_K + M) - P_e \cdot \sqrt{R_K^2 - P_e^2} - R_K^2 \cdot \arcsin\left(\frac{P_e}{R_K}\right)} \quad (4.5)$$

Mit den Schwerpunkten der beiden ausgebohrten Körper folgt mit (1.17)

$$\vec{r}_{S_8} = \begin{pmatrix} 0 \\ 394,95 \\ 2,5 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

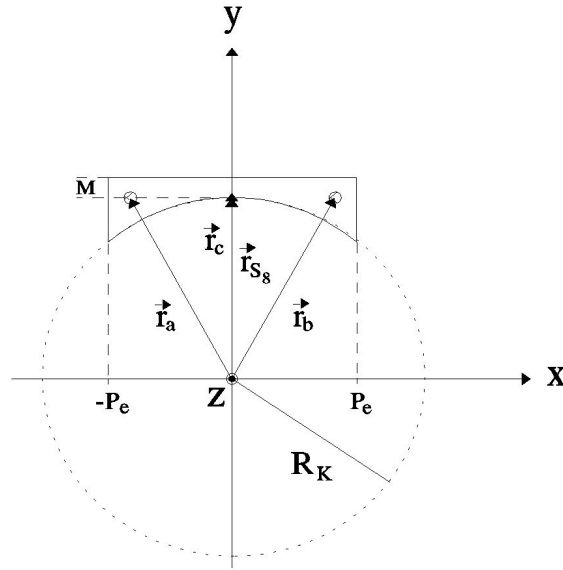


Abbildung 4.3: Skizze des Entlastungsklappenteiles $n = 8$. Eine Zerlegung in zwei Kreisseiben (Schwerpunkte \vec{r}_a, \vec{r}_b) und den Restkörper wurde durchgeführt.

4.1.1.6 Klappenteile 9 und 10

Die beiden identischen Entlastungsklappenteile 9 und 10 sind der linke und rechte Fortsatz am Klappenteil 8. Aus Abbildung 4.4 sind die Umriss der Grundflächen ersichtlich. Es folgt für den Schwerpunkt \vec{r}_a des linken Körpers

$$\begin{aligned}
 x_a &= \frac{\int_{P_a}^{P_e} \int_{\frac{N}{R_K} \cdot x + N}^{\frac{N}{R_K} \cdot x + N} x \, dy \, dx}{\int_{P_a}^{P_e} \int_{\frac{N}{R_K} \cdot x + N}^{\frac{N}{R_K} \cdot x + N} dy \, dx} \\
 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{R_K} \cdot (P_e^3 - P_a^3) + \frac{1}{2} \cdot N \cdot (P_e^2 - P_a^2) + \frac{1}{3} \cdot \left(\sqrt{(R_K^2 - P_e^2)^3} - \sqrt{(R_K^2 - P_a^2)^3} \right) \\
 &\quad \cdot \left[N \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{P_e^2 - P_a^2}{R_K} \right) + (P_e - P_a) \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(P_e \cdot \sqrt{R_K^2 - P_e^2} + R_K^2 \cdot \arcsin \left(\frac{P_e}{R_K} \right) \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \cdot \left(P_a \cdot \sqrt{R_K^2 - P_a^2} + R_K^2 \cdot \arcsin \left(\frac{P_a}{R_K} \right) \right) \right]^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_a &= \frac{\int_{P_a}^{P_e} \int_{\frac{N}{R_K} \cdot x + N}^{\frac{N}{R_K} \cdot x + N} y \, dy \, dx}{\int_{P_a}^{P_e} \int_{\frac{N}{R_K} \cdot x + N}^{\frac{N}{R_K} \cdot x + N} dy \, dx} \\
 &= \frac{\int_{P_a}^{P_e} \int_{\frac{N}{R_K} \cdot x + N}^{\frac{N}{R_K} \cdot x + N} dy \, dx}{\int_{P_a}^{P_e} \int_{\frac{N}{R_K} \cdot x + N}^{\frac{N}{R_K} \cdot x + N} dy \, dx}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\left(\frac{N}{R_K} \right)^2 + 1 \right) \cdot (P_e^3 - P_a^3) + \frac{N^2}{R_K} \cdot (P_e^2 - P_a^2) + (N^2 - R_K^2) \cdot (P_e - P_a) \right] \\
&\cdot \left[N \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{P_e^2 - P_a^2}{R_K} \right) + (P_e - P_a) \right) - \frac{1}{2} \cdot \left(P_e \cdot \sqrt{R_K^2 - P_e^2} + R_K^2 \cdot \arcsin \left(\frac{P_e}{R_K} \right) \right) \right. \\
&\left. + \frac{1}{2} \cdot \left(P_a \cdot \sqrt{R_K^2 - P_a^2} + R_K^2 \cdot \arcsin \left(\frac{P_a}{R_K} \right) \right) \right]^{-1} \quad (4.7)
\end{aligned}$$

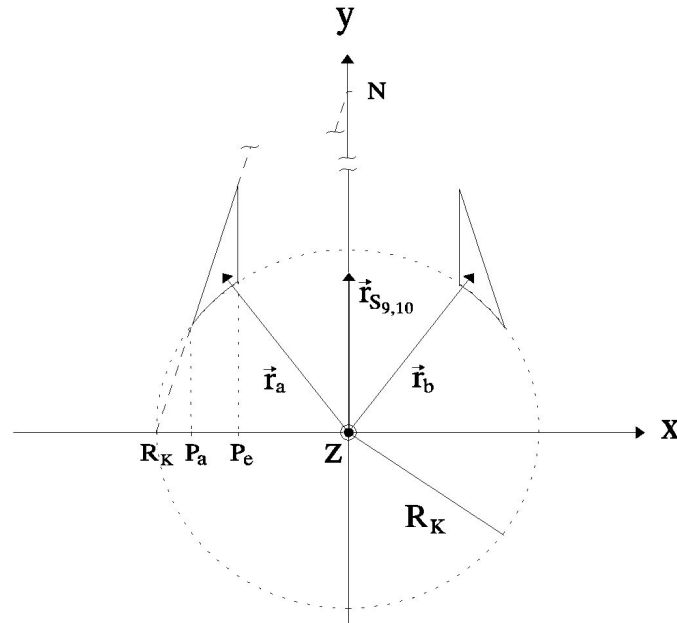


Abbildung 4.4: Skizze der Entlastungsklappenteile $n = 9, 10$. Der Gesamtschwerpunkt $\vec{r}_{S_{9,10}}$ ergibt sich aus den beiden Schwerpunkten \vec{r}_a und \vec{r}_b der dargestellten Körper.

Mit diesem, etwas unhandlichen Ergebnis errechnet sich leicht der Schwerpunkt des zweiten Körpers. Anwendung von (1.17) liefert schließlich

$$\vec{r}_{S_{9,10}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 331,27 \\ 2,5 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

4.1.1.7 Klappenteil 11

Das ist der Verstärkungsring entlang des Randes der kreisförmigen Druckentlastungsklappenfläche. Der Schwerpunkt liegt deshalb im geometrischen Zentrum dieses Körpers.

4.1.1.8 Klappenteil 12

Dieses Teil mit der Bezeichnung $n = 12$ ist eine kreisförmige Aluminiumplatte mit Bohrungen (zur Schraubenaufnahme), die die Entlastungsöffnung des Silos überdeckt. Der Schwerpunkt

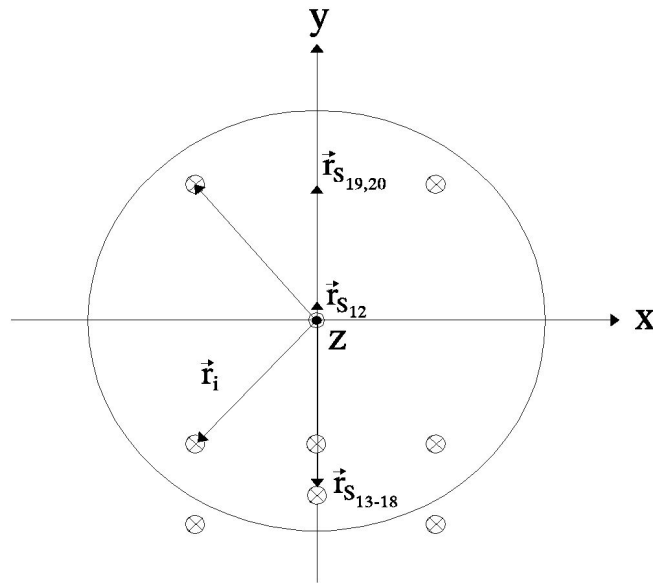


Abbildung 4.5: Skizze des Entlastungsklappenteiles $n = 12$. Der Gesamtschwerpunkt $\vec{r}_{S_{12}}$ ergibt sich aus den Schwerpunkten \vec{r}_i (innerhalb der Kreisfläche) und dem Koordinatenursprung.

$\vec{r}_{S_{12}}$ der in Abbildung 4.5 dargestellten Körper setzt sich nach (1.17) aus dem Schwerpunkt der Kreisplatte im Koordinatenursprung zusammen und den Schwerpunkten \vec{r}_i der Bohrungen, die mit negativen Vorzeichen berücksichtigt werden müssen.

$$\vec{r}_{S_{12}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,09 \\ 2,5 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

4.1.1.9 Klappenteile 13 bis 18

Dies sind die 6 Schrauben des Types M 10 \times 50 zur Verschraubung von Entlastungsklappe und den Klappenteilen $n = 3, 8, 12$ bzw. zur Befestigung von Zusatzgewichten.

4.1.1.10 Klappenteile 19 und 20

Das sind zwei weitere Schrauben des Types M 10 \times 50, die der Befestigung von Zusatzgewichten dienen. Ebenfalls aus (1.17) und Abbildung 4.5 ergibt sich für die Schwerpunktskoordinaten der Schrauben (im Koordinatensystem von Abbildung 4.5)

$$\vec{r}_{S_{13-18}} = \begin{pmatrix} 0 \\ -325,83 \\ -15,84 \end{pmatrix} \quad \vec{r}_{S_{19,20}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 270 \\ -20,84 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Damit sind die Schwerpunktkoordinaten aller Einzelkörper bekannt, wodurch eine Berechnung des Gesamtschwerpunktes der Entlastungsklappe möglich wird. Dazu müssen die Schwerpunktkoordinaten \vec{r}_{S_n} zunächst in ein gemeinsames Koordinatensystem umgerechnet werden.

In diesem System fällt die Rotationsachse der Entlastungsklappe mit der z -Achse zusammen (siehe Abbildung 4.6). In Tabelle 4.1 sind sowohl die neuen Schwerpunktkoordinaten als auch die Volumina der 20 Klappenteile zusammengestellt.

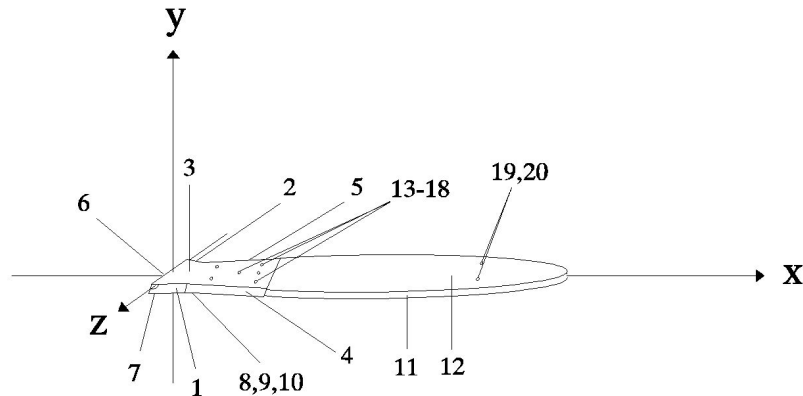


Abbildung 4.6: Skizze der Entlastungsklappe mit gekennzeichneten Einzelteilen in dem Koordinatensystem, in welchem auch die Drehbewegung beschrieben wird.

Die Anwendung der Formel (1.17) auf die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Daten der Klappenteile $n = 1, 2 \dots 20$ liefert als Koordinaten für den Gesamtschwerpunkt

$$\vec{r}_S = \begin{pmatrix} 389,7 \\ 7,5 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Damit ergibt sich für S aus den Abschnitten 1.1.2, 1.1.3 und 1.1.6 der Wert $S = \sqrt{389,7^2 + 7,5^2} = 389,8 \approx 390$ [mm].

n	x_S [mm]	y_S [mm]	z_S [mm]	Volumen [mm ³]
1+2	26,4	-7,8	0	17482,9
3	136,6	17,5	0	977632,3
4+5	166,0	-5,0	0	97200,0
6	-17,5	-5,0	0	119000,0
7	-5,0	-27,5	0	89250,0
8	100,1	12,5	0	131915,8
9+10	163,7	12,5	0	36430,6
11	495,0	-10,0	0	1055575,1
12	495,1	12,5	0	2834653,2
13+...+18	169,2	4,2	0	43312,8
19+20	765,0	-0,8	0	14437,6

Tabelle 4.1: Schwerpunktkoordinaten bzw. Volumina aller 20 Einzelteile der Entlastungsklappe bezogen auf ein gemeinsames Koordinatensystem, dargestellt in Abbildung 4.6.

4.1.2 Berechnung des Trägheitsmomentes der Klappe

Wie in Abbildung 4.6 dargestellt, fällt die Drehachse der Entlastungsklappe mit der z -Achse des Koordinatensystems zusammen. Aufgrund dieser Anordnung nimmt (1.19) die Form

$$\Theta = \int \int \int_{\text{Volumen}} \rho \cdot (x^2 + y^2) dx dy dz \quad (4.12)$$

an. Die Zerlegung der Klappe in Einzelteile wurde in Abschnitt 4.1.1 schon durchgeführt, so dass (4.12) auf dieselben Körper angewandt werden kann.

4.1.2.1 Klappenteile 1 und 2

Werden in Abbildung 4.1 die x - und y -Achse vertauscht und die Orientierung der z -Achse umgekehrt, so erhält man Abbildung 4.7. Mit Hilfe des Steiner'schen Satzes¹ folgt als Trägheitsmoment für die beiden Quader

$$\Theta_a = \frac{\rho \cdot C \cdot P \cdot H}{12} \cdot (P^2 + C^2 + 12 \cdot s^2) = \frac{\rho \cdot V}{12} \left[P^2 + C^2 + 12 \cdot \left(\left(\frac{D+P}{2} \right)^2 + \left(\frac{C}{2} - R \right)^2 \right) \right]$$

$$\Theta_b = \frac{\rho \cdot F \cdot D \cdot H}{12} \cdot \left(F^2 + D^2 + 12 \cdot \left(R + \frac{F}{2} \right)^2 \right) \quad (4.13)$$

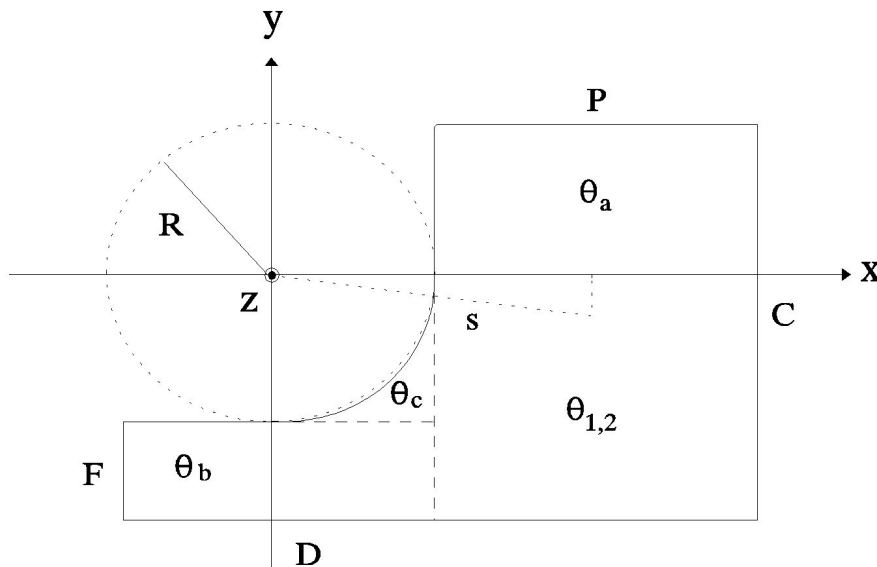


Abbildung 4.7: Skizze des Klappenteiles $n = 1$ bzw. $n = 2$.

¹Satz von Steiner: $\Theta = \Theta_S + ma^2$. Θ_S ist das Trägheitsmoment bei im Schwerpunkt liegender Drehachse, a ist der Abstand zwischen Schwerpunktdrehachse und neuer, dazu paralleler Drehachse, m ist die Körpermasse.

wobei die Größe H die Tiefe des Körpers beschreibt. Für ρ ist hier und im folgenden die Dichte von AlMg3 ($\rho = 2673 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) anzusetzen. Zur exakten Berechnung des Trägheitsmomentes Θ_c kommt man um die Verwendung von (4.12) nicht herum. Es folgt

$$\Theta_c = \rho \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-R}^{-\sqrt{R^2-x^2}} \int_0^R x^2 + y^2 dx dy dz = \rho \cdot H \cdot R^4 \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{8} \right) \quad (4.14)$$

Aus diesen drei Ergebnissen errechnet sich mit (1.20) für das Trägheitsmoment des Klappenteiles 1 bzw. 2

$$\Theta_{1,2} = \Theta_a + \Theta_b + \Theta_c = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.15)$$

4.1.2.2 Klappenteil 3

Abbildung 4.8 zeigt die Lage dieses Körpers im gemeinsamen Koordinatensystem. Die Trägheitsmomente der zwei Quader können wieder unmittelbar über den Steiner'schen Satz angegeben werden. Es gilt

$$\begin{aligned} \Theta_a &= \rho \cdot A \cdot B \cdot H \cdot \left(\frac{B^2}{12} + \left(\frac{B}{2} + Q \right)^2 + \left(\frac{H}{2} + R \right)^2 \right) \\ \Theta_b &= \rho \cdot A \cdot E \cdot H \cdot \left(\frac{E^2}{12} + R^2 + \left(R + \frac{H}{2} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Zur der Berechnung von Θ_c wird zunächst wieder Gebrauch von (4.12) gemacht, wobei das Bezugssystem in Abbildung 4.8 in den Schwerpunkt des Prismas verschoben wird (ohne Drehung). Dadurch hat man die Integration

$$\Theta_{S_c} = \rho \cdot \int_{-\frac{2 \cdot G}{3}}^{\frac{G}{3}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \int_{-\frac{B}{G} \cdot z - \frac{B}{3}}^{\frac{B}{3}} x^2 + y^2 dx dy dz = \frac{\rho \cdot B \cdot G \cdot H}{36} \cdot \left(B^2 + \frac{9}{8} \cdot H^2 \right) \quad (4.17)$$

durchzuführen. Wendet man auf Θ_{S_c} den Satz von Steiner an, so folgt

$$\Theta_c = \frac{\rho \cdot B \cdot G \cdot H}{36} \cdot \left(B^2 + \frac{9}{8} \cdot H^2 + 18 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot B + Q \right)^2 + 18 \cdot \left(\frac{H}{2} + R \right)^2 \right) \quad (4.18)$$

wobei R der Abstand zwischen Drehachse und der Unterseite des Körpers ist (siehe Abbildungen 4.6 und 4.7). Zusammen mit den Trägheitsmomenten der i „Löcher“

$$\Theta_{l_i} = \rho \cdot H \cdot \pi \cdot R_l^2 \cdot \left(\frac{R_l^2}{4} + r_i^2 \right) \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (4.19)$$

wobei r_i die Distanz des i -ten „Loches“ zur z -Achse ist, folgt als Trägheitsmoment für das Klappenteil $n = 3$

$$\Theta_3 = \Theta_a + \Theta_b + \Theta_c - \sum_{i=1}^6 \Theta_{l_i} = 6,9113 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.20)$$

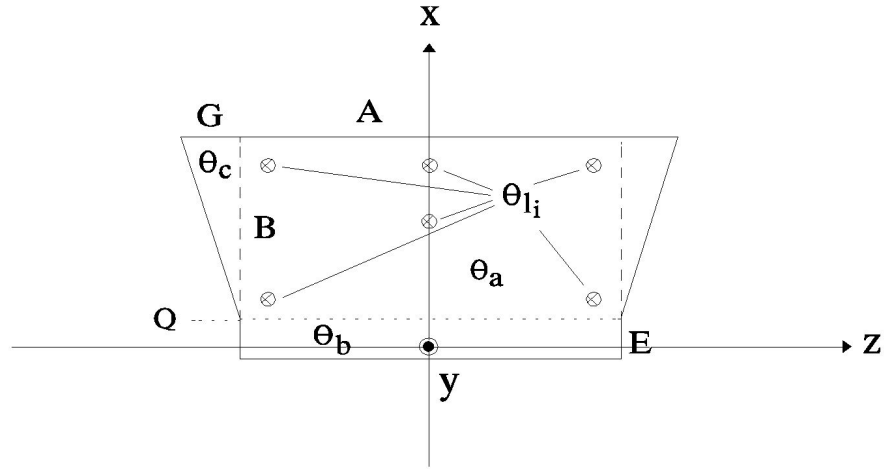


Abbildung 4.8: Skizze des Entlastungsklappenteiles $n = 3$. Es wird wie zuvor in 10 Einzelkörper zerlegt.

4.1.2.3 Klappenteile 4 und 5

Die sich an die Teile 1 und 2 anschließenden Klappenteile 4 und 5 können durch die in Abbildung 4.9 dargestellten Körper sehr gut angenähert werden. Die Grundfläche dieser Körper ist je ein Parallelogramm. C ist die Tiefe des Körpers (siehe auch Abbildung 4.7).

Wird das Bezugssystem wieder in den Körperschwerpunkt verschoben, so ergibt sich mit (4.12) für den rechten Körper in Abbildung 4.9

$$\Theta_{S_5} = \rho \cdot \int_{\frac{G}{B} \cdot x - \frac{H}{2 \cdot \cos \alpha}}^{\frac{G}{B} \cdot x + \frac{H}{2 \cdot \cos \alpha}} \int_{-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} x^2 + y^2 dx dy dz = \frac{\rho \cdot B \cdot C \cdot H}{12 \cdot \cos \alpha} \cdot (B^2 + C^2) \quad (4.21)$$

Der Steiner'schen Satz liefert dann für Θ_4 bzw. Θ_5

$$\begin{aligned} \Theta_{4,5} &= \frac{\rho \cdot B \cdot C \cdot H}{\cos \alpha} \cdot \left(\frac{B^2 + C^2}{12} + \left(\frac{B}{2} + Q \right)^2 + \left(\frac{C}{2} - R \right)^2 \right) \\ &= 4,176 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.1.2.4 Klappenteile 6 und 7

Da diese Teile Quader sind, können die entsprechenden Trägheitsmomente mit Hilfe des Steiner'schen Satzes unmittelbar angegeben werden.

$$\begin{aligned} \Theta_6 &= \rho \cdot A \cdot C \cdot H \cdot \left(\frac{C^2}{12} + \left(R + \frac{H}{2} \right)^2 + \left(\frac{C}{2} - R \right)^2 \right) = 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\ \Theta_7 &= \rho \cdot A \cdot D \cdot H \cdot \left(\frac{D^2}{12} + \left(F + R + \frac{H}{2} \right)^2 + H^2 \right) = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad (4.23)$$

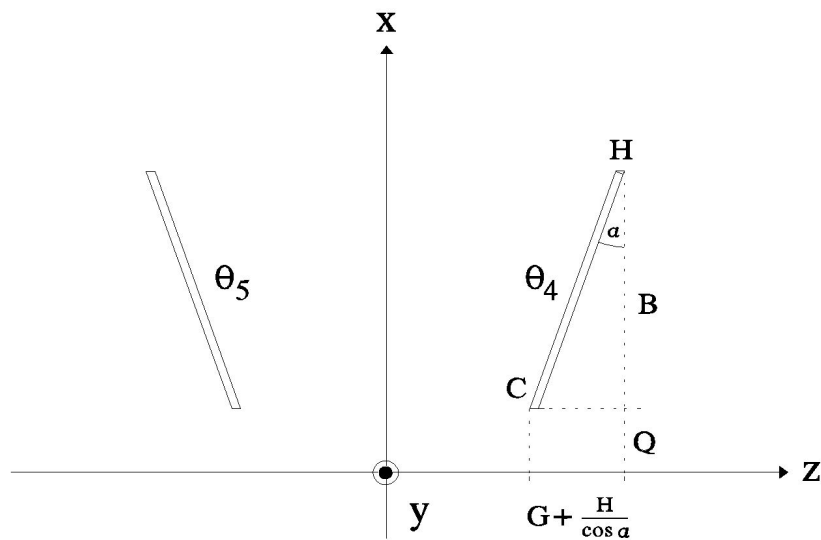


Abbildung 4.9: Skizze der Klappenteile $n = 4, 5$ im Koordinatensystem aus Abbildung 4.6, d. h. die z -Achse ist die Drehachse. C bezeichnet die Tiefe der Körper.

4.1.2.5 Klappenteil 8

Die Form dieses Klappenteiles und dessen Orientierung zur Drehachse ist in Abbildung 4.10 gezeigt.

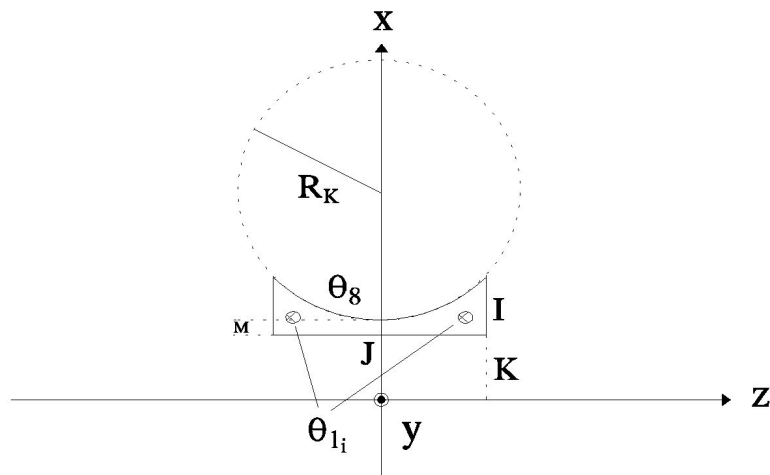


Abbildung 4.10: Entkastungsclappenteil $n = 8$ in der Draufsicht.

Mit Berücksichtigung der Bohrungen (Formel (4.19)) ist das Trägheitsmoment

$$\Theta_8 = \int_{-\frac{J}{2}}^{\frac{J}{2}} \int_{R-H}^R \int_K^{-\sqrt{R_K^2 - z^2} + K + M + R_K} x^2 + y^2 \, dx \, dy \, dz - \sum_{i=1}^2 \Theta_{l_i}$$

$$= 3,468 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.24)$$

4.1.2.6 Klappenteile 9 und 10

Diese Teile schließen links und rechts an Klappenteil 8 an. Die Lage beider Teile im Koordinatensystem zeigt Abbildung 4.11.

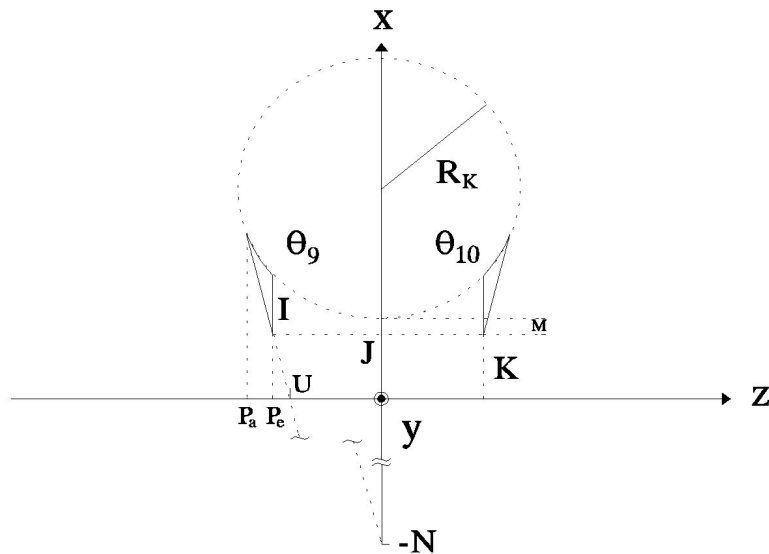


Abbildung 4.11: Skizzierte Draufsicht auf die Entlastungsklappenteile $n = 9, 10$.

Weiterhin lassen sich aus der Skizze die Integrationsgrenzen zur Berechnung des Trägheitsmomentes entnehmen, so dass folgt

$$\Theta_{9,10} = \rho \int_{P_a}^{P_e} \int_{R-H}^R \int_{-\frac{N}{U}z-N}^{-\sqrt{R_K^2-z^2}+K+M+R_K} x^2 + y^2 \, dx \, dy \, dz = 2,8268 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.25)$$

4.1.2.7 Klappenteil 11

Da es sich hier um einen Ring handelt, errechnet sich das Trägheitsmoment aus der Differenz der Trägheitsmomente zweier runder Platten mit unterschiedlichem Radius. Es gilt

$$\begin{aligned} \Theta_{11} &= \frac{C \cdot \rho \cdot \pi}{4} \cdot (R_K^4 - R_k^4) + C \cdot \rho \cdot \pi \cdot (R_K^2 - R_k^2) \\ &\quad \cdot \left((R_K + M + K)^2 + \left(\frac{C}{4} \right)^2 \right) = 0,940529 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned} \quad (4.26)$$

4.1.2.8 Klappenteil 12

Das Klappenteil 12 ist eine kreisförmige Platte mit sechs Bohrungen (Abbildung 4.5). Die Lage dieses Teiles relativ zu den Koordinatenachsen entnimmt man der Abbildung 4.10 oder 4.11 (gestrichelter Kreis). Als Trägheitsmoment ergibt sich

$$\begin{aligned}\Theta_{12} &= \rho \cdot \pi \cdot H \cdot R_K^2 \cdot \left(\frac{R_K^2}{4} + (R_K + M + K)^2 + \left(R - \frac{H}{2} \right)^2 \right) - \sum_{i=3}^8 \Theta_{l_i} \\ &= 2,195699 \text{ kg} \cdot \text{m}^2\end{aligned}\quad (4.27)$$

4.1.2.9 Klappenteile 13 bis 18

Für eine der sechs Schrauben des Types M 10 × 50 ergibt sich als Masse etwa 0,058 kg. Wegen der kleinen räumlichen Ausdehnung dieser Schrauben können diese näherungsweise als Massenpunkte betrachtet werden. Somit ergibt sich als Trägheitsmoment

$$\sum \Theta_{13-18} = \sum_{i=1}^6 m_i \cdot r_i^2 = 1,1106 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.28)$$

4.1.2.10 Klappenteile 19 und 20

Ebenso ergibt sich als Trägheitsmoment für diese beiden Schrauben (Abbildung 4.5)

$$\sum \Theta_{19,20} = \sum_{i=7}^8 m_i \cdot r_i^2 = 6,7886 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.29)$$

Das totale Trägheitsmoment der Druckentlastungsklappe errechnet aus den vorhergehenden Einzelergebnissen mit Hilfe von (1.20) zu

$$\Theta_K = 3,325 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.30)$$

Zieht man zusätzlich in Betracht, dass an der Klappe weitere Massen in Form von Schweißnähten vorhanden sind, so ist das Klappenträgheitsmoment mit einem Wert von rund 3,4 kg · m² sehr gut bestimmt.

4.2 Zahlen, Maße und Rechenergebnisse

4.2.1 Abmessungen des Druckentlastungsdeckels

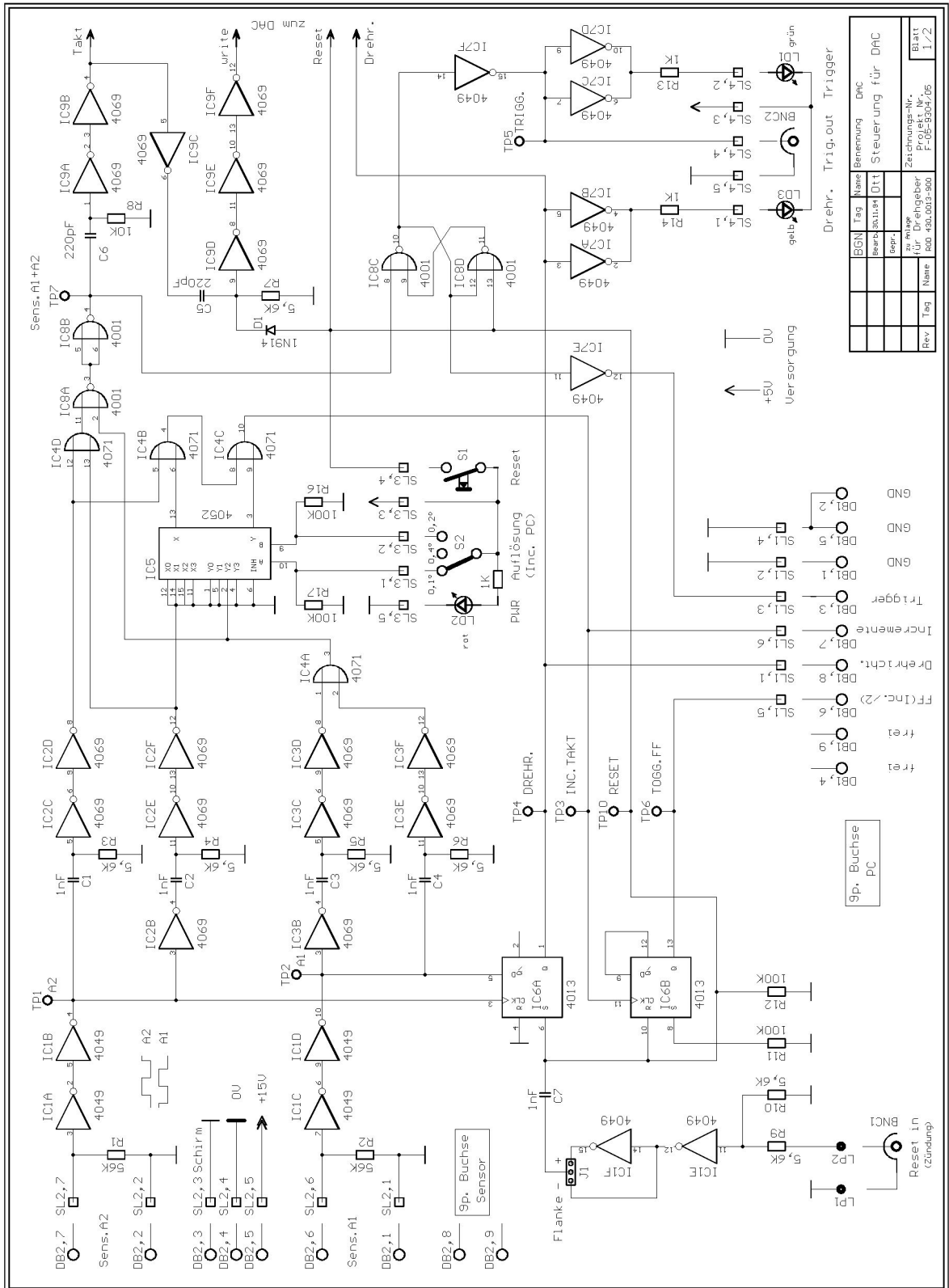
$A = 0,595 \text{ m}$	$B = 0,232 \text{ m}$	$C = 0,04 \text{ m}$	$D = 0,03 \text{ m}$
$E = 0,07 \text{ m}$	$F = 0,01 \text{ m}$	$G = 0,07 \text{ m}$	$H = 0,005 \text{ m}$
$J = 0,581 \text{ m}$	$K = 0,06 \text{ m}$	$M = 0,01 \text{ m}$	$N = 1,438 \text{ m}$
$P = 0,035 \text{ m}$	$P_a = 0,365 \text{ m}$	$P_e = 0,295 \text{ m}$	$Q = 0,05 \text{ m}$
$R = 0,015 \text{ m}$	$R_K = 0,425 \text{ m}$	$R_k = 0,415 \text{ m}$	$r_1 = 0,1 \text{ m}$
$r_2 = 0,1 \text{ m}$	$r_3 = 0,14 \text{ m}$	$r_4 = 0,225 \text{ m}$	$r_5 = 0,225 \text{ m}$
$r_6 = 0,225 \text{ m}$	$r_7 = 0,765 \text{ m}$	$r_8 = 0,765 \text{ m}$	$\alpha = 17^\circ$

4.2.2 Physikalische Eigenschaften der Entlastungsklappe

Volle Entlastungsfläche:	$A_E = 0,484 \text{ m}^2$
Dichte von AlMg3:	$\rho = 2673 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Masse:	$m = 14,3 \text{ kg}$
Abstand Schwerpunkt-Drehachse (theoretisch):	$S=389,8 \text{ mm}$
Abstand Schwerpunkt-Drehachse (experimentell):	$S=385 \pm 5 \text{ mm}$
Trägheitsmoment (theoretisch):	$\Theta_K = 3,325 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Trägheitsmoment (experimentell):	$\Theta_K = 3,56 \pm 0,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Kapitel 5

Schalt- und Konstruktionspläne



BGN	Tag	Name	Benennung	DAC
			Steuerung	für DAC
			Zuschungs-Nr.	
			Projek-Nr.	
			Fach-Nr.	
				Blatt
				1/2

Abbildung 5.1: Steuerungsschaltung für den im Experiment verwendeten Digital-Analog-Wandler (DAC).

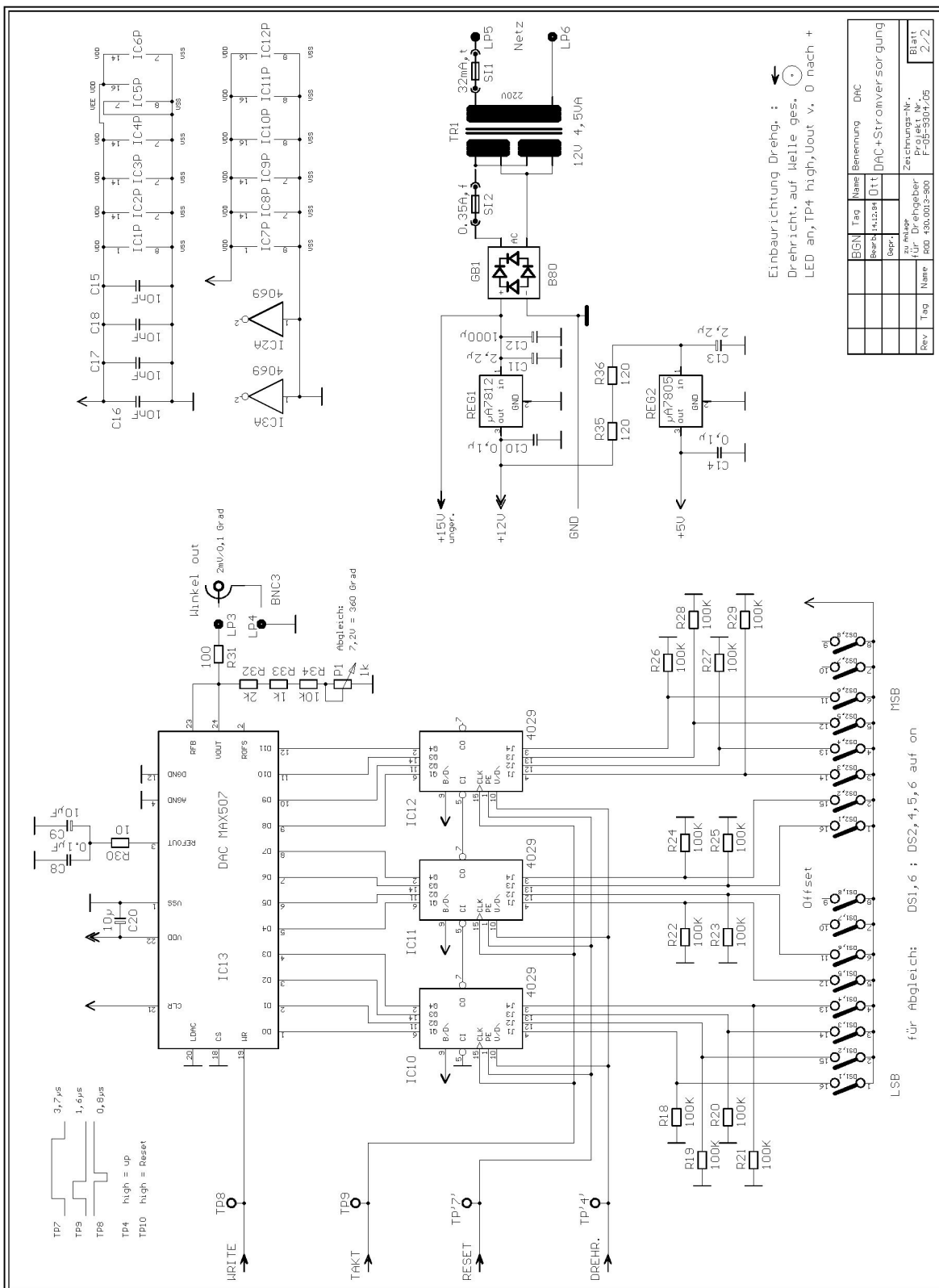


Abbildung 5.2: Schaltung des im Experiment verwendeten Digital-Analog-Wandlers (DAC) mit seiner Stromversorgung.

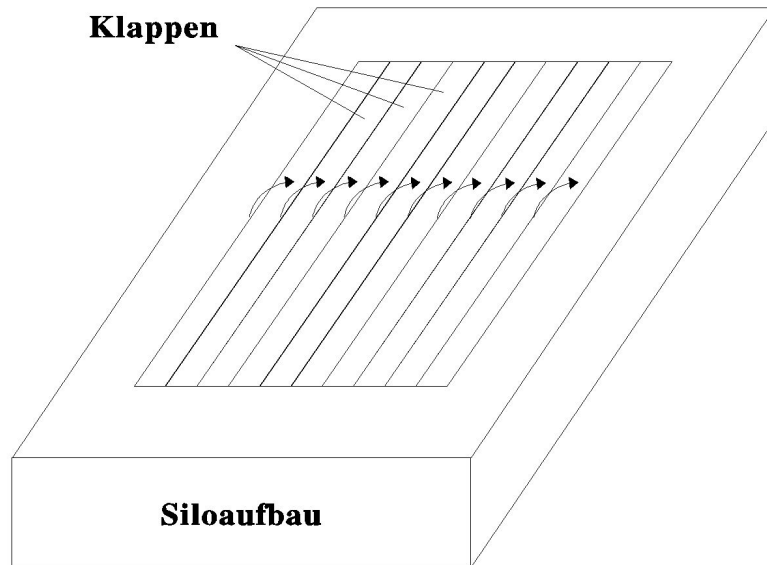


Abbildung 5.3: Skizze einer trägheitsarmen Entlastungsklappenkonstruktion. Das Entlastungselement setzt sich aus mehreren schmalen Klappen zusammen, wobei jede Einzelklappe ein sehr kleines Trägheitsmoment besitzt. Diese Gegebenheit zieht einen geringen Klappenwiderstand Q nach sich. Idee von Dr. Markus Wenzel.

Um den Vorteil dieser Konstruktion gegenüber herkömmlichen Klappen zu demonstrieren, wird der Wirkungsgrad beider Systeme auf der Grundlage von (1.19), (2.11) und (2.29) abgeschätzt. Angenommen werden folgende Entlastungsklappeneigenschaften:

- Masse $m = 10 \text{ kg}$
- Fläche $A_E = 0,5 \text{ m}^2$
- Abmessung $a \cdot b = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ m}^2$
- Die Fläche wird in 10 Lamellen zerlegt

Mit diesen Annahmen folgt für die herkömmliche Klappe:

- Trägheitsmoment $\Theta_K = 0,83\bar{3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- Klappenwiderstand $Q = 6\frac{2}{3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
- Entlastungsfähigkeit $EF \approx 84\%$

Für die Lamellenkonstruktion ergibt sich:

- Trägheitsmoment $\Theta_K = 8,3\bar{3} \cdot 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- Klappenwiderstand $Q = \frac{2}{3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$
- Entlastungsfähigkeit $EF \approx 94,6\%$

Kapitel 6

Programme


```

LOCATE 10, 12: PRINT "DIE BEANTWORTUNG DER FRAGEN IN ROTER SCHRIFT IST ZWINGEND"
LOCATE 11, 12: PRINT "ERFORDERLICH. WERDEN DIE FRAGEN IN GRÜNER SCHRIFT NICHT"
LOCATE 12, 12: PRINT "BEANTWORTET, SO SETZT DAS SIMULATIONSPROGRAMM SCHÄTZWERTE"
LOCATE 13, 12: PRINT "AN UM DIE BERECHNUNGEN DURCHFÜHREN ZU KÖNNEN."
LOCATE 15, 12: PRINT "ZUM BESSEREN VERSTÄNDNIS DER ABGEFRAGTEN DATEN ERSCHEINT"
LOCATE 16, 12: PRINT "IM VERLAUF DES PROGRAMMES EINE GRAFIK."
LOCATE 18, 12: PRINT "DIE EINGABE DER DATEN MUSS IN DER IN KLAMMERN GEZEIGTEN "
LOCATE 19, 12: PRINT "EINHEIT ERFOLGEN."
LOCATE 21, 12: PRINT "WEITER MIT DER TASTE ← ... "
hm2$ = INPUT$(1)

neustart: '
CLS 0
CLEAR , , 3000
speicher = FRE("")
REM * Eingabetafel eins: Allgemeine Angaben *
LINE (150, 7)-(480, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 21: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL EINS: ALLGEMEINE ANGABEN "
LOCATE 9, 6: COLOR 12: PRINT "BEHÄLTERVOLUMEN (m^3) ="
LOCATE 9, 45: PRINT "KST-WERT (bar*m/s) ="
LOCATE 14, 6: COLOR 10: PRINT "STAUBKONZENTRATION (kg/m^3) ="
LOCATE 14, 45: PRINT "MAXIMALER ÜBERDRUCK (bar) ="
LOCATE 19, 6: COLOR 10: PRINT "STATISCHER ANSPRECHDRUCK (bar) ="
LOCATE 19, 45: COLOR 12: PRINT "ENTLASTUNGSFLÄCHE (m^2) ="
COLOR 14
LOCATE 9, 30: INPUT "", v: LOCATE 9, 66: INPUT "", kst
LOCATE 14, 36: INPUT "", konzentration
IF konzentration = 0 THEN
LET konzentration = .75
COLOR 10: LOCATE 14, 34: PRINT ""
COLOR 14: LOCATE 14, 35: PRINT konzentration
END IF
LOCATE 14, 73: INPUT "", pmax
IF pmax = 0 THEN
LET pmax = 9
COLOR 10: LOCATE 14, 71: PRINT ""
COLOR 14: LOCATE 14, 72: PRINT pmax
END IF
LOCATE 19, 39: INPUT "", pstat
IF pstat = 0 THEN
LET pstat = CLNG(.1 * 10) / 10
COLOR 10: LOCATE 19, 37: PRINT ""
COLOR 14: LOCATE 19, 38: PRINT pstat
END IF
LOCATE 19, 71: INPUT "", ae

REM * Eingabetafel zwei: Allgemeine Tafel *
CLS 0
LINE (150, 7)-(480, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
LOCATE 2, 21: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL ZWEI: ALLGEMEINE ANGABEN "
COLOR 12

```

```

LOCATE 7, 8: PRINT "GEBEN SIE DEN QUOTIENTEN AUS BEHÄLTERHÖHE UND -DURCHMESSER"
LOCATE 8, 8: PRINT "BEZIEHUNGSWEISE -SEITENLÄNGE EIN:"
LOCATE 12, 8: PRINT "GEBEN SIE DIE ANZAHL DER ENTLASTUNGSELEMENTE EIN:"
LOCATE 16, 8: PRINT "HANDELT ES SICH BEI IHREM ENTLASTUNGSELEMENT UM EINE Klappe,"
LOCATE 17, 8: PRINT "SO GEBEN SIE k EIN. IM FALLE EINES DECKELS GEBEN SIE d EIN:"
LOCATE 21, 8: PRINT "IST IHR ENTLASTUNGSELEMENT VON RUNDER FORM, SO GEBEN SIE r EIN."
LOCATE 22, 8: PRINT "IM FALLE EINES RECHTECKIGEN ENTLASTUNGSELEMENTES GEBEN SIE e EIN:"
COLOR 14
LOCATE 8, 42: INPUT "", hzud
LOCATE 12, 58: INPUT "", aem
LOCATE 17, 68: INPUT "", typ$: LOCATE 22, 72: INPUT "", form$

IF typ$ = "k" THEN CALL Entlastungsklappe(v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, hzud, form$, typ$,
sv, sw, so, cw, fb$, m, pred, q, ef, theta, kraftmaximal, s, flaeche, rand, durchmesser)
IF typ$ = "d" THEN CALL Entlastungsdeckel(v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, hzud, form$, typ$,
sv, sw, so, cw, fb$, m, pred, q, ef, theta, kraftmaximal, s, flaeche, rand, durchmesser, fg, sz, ss,
seillaenge, e, seildehnung, mrd, med)

IF fb$ = "n" THEN GOTO drucken

REM * Eingabetafel: Flugdaten *
LINE (100, 7)-(530, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
LOCATE 2, 16: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL VIER: DATEN ZUR FLUGBAHNBERECHNUNG "
COLOR 12: LOCATE 8, 8: PRINT "GEBEN SIE DIE GRÖSSE DER DISTANZ ZWISCHEN ERDBODEN UND ENTLASTUNGS-"
LOCATE 9, 8: PRINT "ENTLASTUNGSELEMENT EIN (m):"
COLOR 10: LOCATE 12, 8: PRINT "SOLL DIE LUFTBEWEGUNG BERÜCKSICHTIGT WERDEN (j/n)?"
COLOR 14: LOCATE 9, 36: INPUT "", starthoehe
LOCATE 12, 59: INPUT "", wind$
IF wind$ = "j" THEN
COLOR 12
LOCATE 16, 8: PRINT "GEBEN SIE DEN WERT DER WINDGESCHWINDIGKEIT EIN (m/s):"
LOCATE 20, 8: PRINT "SOLL DIE WINDRICHTUNG PARALLEL (p EINGEBEN) ODER ANTIPARALLEL"
LOCATE 21, 8: PRINT "(a EINGEBEN) ZUR FLUGRICHTUNG ORIENTIERT SEIN?"
COLOR 14
LOCATE 16, 62: INPUT "", vwind
LOCATE 21, 55: INPUT "", richtung$
END IF
IF richtung$ = "a" THEN vwind = -vwind

SCREEN 12
REM * Skalierung der Grafik *
pi = 3.141593
test = 1
IF typ$ = "d" THEN LET beta = 0 ELSE LET beta = sw
t = 0
x = 0
y = starthoehe
xpunkt = sv * COS(sw * .01745)
ypunkt = sv * SIN(sw * .01745)
g = 9.81
rho = 1.2
n = 0
cx = 1
cy = cw
Ax = (rand + .01) * durchmesser
Ay = flaeche
h = .01

```

```

DO
t = n * h
rx = .5 * rho * (cx * Ax * (COS(beta * .01745 + so * t)) ^ 2 + cy * Ay
* (SIN(beta * .01745 + so * t)) ^ 2) / m
ry = .5 * rho * (cx * Ax * (SIN(beta * .01745 + so * t)) ^ 2 + cy * Ay
* (COS(beta * .01745 + so * t)) ^ 2) / m
kx1 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind) ^ 2 + ypunkt ^ 2)
* (xpunkt - vwind)) * (h ^ 2 / 2)
ky1 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind) ^ 2 + ypunkt ^ 2)
* ypunkt - g) * (h ^ 2 / 2)
kx2 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2)
* (xpunkt - vwind + kx1 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky2 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2)
* (ypunkt + ky1 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx3 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2)
* (xpunkt - vwind + kx2 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky3 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2)
* (ypunkt + ky2 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx4 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2)
* (xpunkt - vwind + 2 * kx3 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky4 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2)
* (ypunkt + 2 * ky3 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx = (1 / 3) * (kx1 + kx2 + kx3)
ky = (1 / 3) * (ky1 + ky2 + ky3)
kxstrich = (1 / 6) * (kx1 + 2 * kx2 + 2 * kx3 + kx4)
kystrich = (1 / 6) * (ky1 + 2 * ky2 + 2 * ky3 + ky4)
xpunkt = xpunkt + 2 * kxstrich / h
ypunkt = ypunkt + 2 * kystrich / h
x = x + xpunkt * h + kx
y = y + ypunkt * h + ky
y(test) = y

y(0) = 100
IF y(test) - y(test - 1) > 0 THEN LET ymax = y(test)
xmax = x
test = test + 1
IF test > 9 THEN LET test = 1
IF y < 0 THEN GOTO flugstart
n = n + 1
LOOP

flugstart: '
IF xmax < 5 THEN LET xmax = 5
IF ymax < 5 THEN LET ymax = 5
IF ymax > 5 AND ymax < 10 THEN LET ymax = 10
IF ymax > 10 AND ymax < 15 THEN LET ymax = 15
IF ymax > 15 AND ymax < 20 THEN LET ymax = 20
IF ymax > 20 AND ymax < 25 THEN LET ymax = 25
IF ymax > 25 AND ymax < 30 THEN LET ymax = 30
IF ymax > 30 AND ymax < 35 THEN LET ymax = 35
IF ymax > 35 AND ymax < 40 THEN LET ymax = 40
IF ymax > 40 AND ymax < 45 THEN LET ymax = 45
IF ymax > 45 AND ymax < 50 THEN LET ymax = 50
IF ymax > 50 AND ymax < 55 THEN LET ymax = 55
IF ymax > 55 AND ymax < 60 THEN LET ymax = 60
IF xmax > 5 AND xmax < 10 THEN LET xmax = 10
IF xmax > 10 AND xmax < 15 THEN LET xmax = 15
IF xmax > 15 AND xmax < 20 THEN LET xmax = 20
IF xmax > 20 AND xmax < 25 THEN LET xmax = 25

```

```

IF xmax > 25 AND xmax < 30 THEN LET xmax = 30
IF xmax > 30 AND xmax < 35 THEN LET xmax = 35
IF xmax > 35 AND xmax < 40 THEN LET xmax = 40
IF xmax > 40 AND xmax < 45 THEN LET xmax = 45
IF xmax > 45 AND xmax < 50 THEN LET xmax = 50
IF xmax > 50 AND xmax < 55 THEN LET xmax = 55
IF xmax > 55 AND xmax < 60 THEN LET xmax = 60
IF xmax > 60 AND xmax < 65 THEN LET xmax = 65
IF xmax > 65 AND xmax < 70 THEN LET xmax = 70
IF xmax > 70 AND xmax < 75 THEN LET xmax = 75
IF xmax > 75 AND xmax < 80 THEN LET xmax = 80
IF xmax > 80 AND xmax < 85 THEN LET xmax = 85
IF xmax > 85 AND xmax < 90 THEN LET xmax = 90
IF xmax > 90 AND xmax < 95 THEN LET xmax = 95
IF xmax > 95 AND xmax < 100 THEN LET xmax = 100
IF xmax > 100 AND xmax < 105 THEN LET xmax = 105
IF xmax > 105 AND xmax < 110 THEN LET xmax = 110
IF xmax > 110 THEN LET xmax = 150

startgeschwindigkeit = CLNG(sv * 10) / 10
anfangswinkel = CLNG(sw * 10) / 10

REM * Grafikaufbau *
COLOR 11: LOCATE 30, 34: PRINT "Flugweite in Metern"
LOCATE 30, 6: PRINT "0": LOCATE 30, 76: PRINT xmax
LOCATE 30, 3: PRINT "0": LOCATE 3, 1: PRINT ymax
LOCATE 8, 3: PRINT "F": LOCATE 9, 3: PRINT "1": LOCATE 10, 3: PRINT "u"
LOCATE 11, 3: PRINT "g": LOCATE 12, 3: PRINT "h": LOCATE 13, 3: PRINT "ö"
LOCATE 14, 3: PRINT "h": LOCATE 15, 3: PRINT "e": LOCATE 17, 3: PRINT "i"
LOCATE 18, 3: PRINT "n": LOCATE 20, 3: PRINT "M": LOCATE 21, 3: PRINT "e"
LOCATE 22, 3: PRINT "t": LOCATE 23, 3: PRINT "e": LOCATE 24, 3: PRINT "r"
LOCATE 25, 3: PRINT "n"
VIEW (40, 40)-(625, 458), 8, 15
WINDOW (0, 0)-(xmax, ymax)
COLOR 10
FOR vg = 1 TO xmax - 1 STEP 1
LINE (vg, 0)-(vg, ymax), 7
NEXT vg
FOR hg = 1 TO ymax - 1 STEP 1
LINE (0, hg)-(xmax, hg), 7
NEXT hg
FOR vg = 5 TO xmax - 5 STEP 5
LINE (vg, 0)-(vg, ymax), 15
NEXT vg
FOR hg = 5 TO ymax - 5 STEP 5
LINE (0, hg)-(xmax, hg), 15
NEXT hg
COLOR 14: LOCATE 2, 6: PRINT "Startgeschwindigkeit ="; startgeschwindigkeit; "m/s"
LOCATE 2, 40: PRINT "Startwinkel ="; anfangswinkel; "°"
LOCATE 2, 62: PRINT "Starthöhe ="; starthoehe; "m"

test = 1
t = 0
x = 0
y = starthoehe
xpunkt = sv * COS(sw * .01745)
ypunkt = sv * SIN(sw * .01745)
n = 0
h = .001

```

```

DO
t = n * h
rx = .5 * rho * (cx * Ax * (COS(beta * .01745 + so * t)) ^ 2 + cy * Ay
* (SIN(beta * .01745 + so * t)) ^ 2) / m
ry = .5 * rho * (cx * Ax * (SIN(beta * .01745 + so * t)) ^ 2 + cy * Ay
* (COS(beta * .01745 + so * t)) ^ 2) / m
kx1 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind) ^ 2 + ypunkt ^ 2)
* (xpunkt - vwind)) * (h ^ 2 / 2)
ky1 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind) ^ 2 + ypunkt ^ 2)
* ypunkt - g) * (h ^ 2 / 2)
kx2 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2)
* (xpunkt - vwind + kx1 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky2 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind + kx1 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky1 / h) ^ 2)
* (ypunkt + ky1 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx3 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2)
* (xpunkt - vwind + kx2 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky3 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind + kx2 / h) ^ 2 + (ypunkt + ky2 / h) ^ 2)
* (ypunkt + ky2 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx4 = (-rx * SQR((xpunkt - vwind + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2)
* (xpunkt - vwind + 2 * kx3 / h)) * (h ^ 2 / 2)
ky4 = (-ry * SQR((xpunkt - vwind + 2 * kx3 / h) ^ 2 + (ypunkt + 2 * ky3 / h) ^ 2)
* (ypunkt + 2 * ky3 / h) - g) * (h ^ 2 / 2)
kx = (1 / 3) * (kx1 + kx2 + kx3)
ky = (1 / 3) * (ky1 + ky2 + ky3)
kxstrich = (1 / 6) * (kx1 + 2 * kx2 + 2 * kx3 + kx4)
kystrich = (1 / 6) * (ky1 + 2 * ky2 + 2 * ky3 + ky4)
xpunkt = xpunkt + 2 * kxstrich / h
ypunkt = ypunkt + 2 * kystrich / h
x = x + xpunkt * h + kx
y = y + ypunkt * h + ky
hoehe(test) = y

hoehe(0) = 100
IF hoehe(test) - hoehe(test - 1) > 0 THEN LET hoehemax = hoehe(test)
weitemax = x
test = test + 1
IF test > 9 THEN LET test = 1

PSET (x, y), 10

IF y < 0 THEN
COLOR 10: LOCATE 1, 6: PRINT USING "Flughöhe = ###.###"; hoehemax
LOCATE 1, 24: PRINT "m"
COLOR 12: LOCATE 1, 33: PRINT USING "Flugweite = ###.###"; weitemax
LOCATE 1, 52: PRINT "m"
COLOR 15: LOCATE 1, 64: PRINT "weiter mit ←┘"
hm2$ = INPUT$(1)
GOTO drucken
END IF

n = n + 1
LOOP

drucken: '
CLS 0
SCREEN 9
LINE (160, 7)-(470, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15

```



```

COLOR , 8
LOCATE 2, 26: COLOR 14: PRINT " ZUSAMMENFASSUNG ALLER DATEN "
COLOR 10
LOCATE 6, 5: PRINT "BEHÄLTERDATEN:": LINE (32, 82)-(140, 82)
LOCATE 6, 30: PRINT "VOLUMEN ="; v; "m^3"
LOCATE 6, 63: PRINT "H/D ="; hzud
IF ae >= 10 THEN
LOCATE 7, 20: PRINT USING "ENTLASTUNGSFLÄCHE = ##.## m^2"; ae
ELSE
LOCATE 7, 20: PRINT USING "ENTLASTUNGSFLÄCHE = ##.## m^2"; ae
END IF
LOCATE 7, 62: PRINT USING "PRED = ##.## bar"; CLNG(pred * 100) / 100
COLOR 11
LOCATE 9, 5: PRINT "STAUBDATEN:": LINE (32, 124)-(116, 124)
LOCATE 9, 29: PRINT "KST-WERT ="; kst; "bar*m/s"
LOCATE 9, 62: PRINT "PMAx ="; pmax; "bar"
COLOR 12
IF typ$ = "k" THEN
LOCATE 11, 5
PRINT "KLAPPENDATEN:"
LINE (32, 152)-(132, 152)
END IF
IF typ$ = "d" THEN
IF form$ = "r" THEN LET m = mrd
IF form$ = "e" THEN LET m = med
LOCATE 11, 5
PRINT "DECKELDATEN:"
LINE (32, 152)-(124, 152)
END IF
LOCATE 11, 61: PRINT USING "PSTAT = ##.## bar"; pstat
LOCATE 12, 61: PRINT "MASSE ="; CLNG(m * 100) / 100; "kg"
IF typ$ = "d" THEN
LOCATE 11, 23
PRINT "FLÄCHENGEWICHT ="; CLNG(fg * 10) / 10; "kg/m"
LOCATE 12, 17
PRINT "ENTLASTUNGSFÄHIGKEIT ="; ef; "%"
LOCATE 13, 14
PRINT "MAXIMALE KRAFT PRO SEIL ="; CLNG(kraftmaximal / 100) / 10; "kN"
LOCATE 13, 56: PRINT "SEILANZAHL ="; sz
LOCATE 14, 27: PRINT "SEILSTÄRKE ="; ss; "m"
LOCATE 14, 57: PRINT "SEILLÄNGE ="; seillaenge; "m"
LOCATE 15, 20: PRINT USING "ELASTIZITÄTSMODUL = #^^^^ N/m^2"; e
LOCATE 15, 55: PRINT USING "SEILDEHNUNG = ###.## m"; seildehnung
COLOR 14
IF fb$ = "j" THEN
LOCATE 17, 5: PRINT "FLUGBAHNDATEN:": LINE (32, 236)-(140, 236)
LOCATE 17, 26: PRINT "STARTWINKEL ="; CLNG(sw * 10) / 10; "°"
LOCATE 17, 58: PRINT "FLUGHÖHE ="; CLNG(hoehemax * 100) / 100; "m"
LOCATE 18, 17: PRINT "STARTGESCHWINDIGKEIT ="; CLNG(sv * 10) / 10; "m/s"
LOCATE 18, 57: PRINT "FLUGWEITE ="; CLNG(weitemax * 100) / 100; "m"
IF vwind < 0 THEN LET wind = -vwind ELSE LET wind = vwind
LOCATE 19, 18: PRINT "WINDGESCHWINDIGKEIT ="; wind; "m/s"
IF wind <> 0 THEN
LOCATE 19, 54: PRINT "WINDRICHTUNG = "; richtung$
END IF
END IF
END IF

```



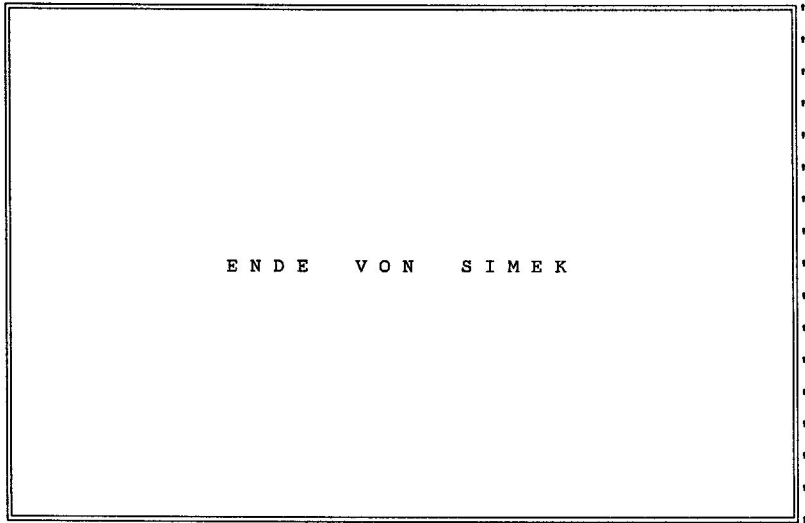
```

LPRINT
LPRINT "          MAXIMALE KRAFT AUF DAS KLAPPENSCHARNIER ="; CLNG(kraftmaximal / 100) / 10; "kN"
LPRINT
LPRINT "          TRÄGHEITSMOMENT BEZUEGLICH DER SCHARNIERACHSE ="; CLNG(theta * 100) / 100; "kg*m^2"
LPRINT
LPRINT "          ABSTAND ZWISCHEN SCHARNIERACHSE UND KLAPPENSCHWERPUNKT ="; CLNG(s * 1000) / 1000; "m"
LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT
END IF
IF typ$ = "d" THEN
LPRINT "          DECKELDATEN:                PSTAT ="; pstat; "bar"
LPRINT "          -----"
LPRINT "          DECKELMASSE ="; CLNG(m * 100) / 100; "kg"
LPRINT
LPRINT "          FLÄCHENGEWICHT ="; CLNG(fg * 10) / 10; "kg/m"
LPRINT
LPRINT "          ENTLASTUNGSFAEHIGKEIT ="; ef; "%"
LPRINT
LPRINT "          MAXIMALE KRAFT PRO SEIL ="; CLNG(kraftmaximal / 100) / 10; "kN"
LPRINT
LPRINT "          SEILANZAHL ="; sz
LPRINT
LPRINT "          SEILSTAERKE ="; ss; "m"
LPRINT
LPRINT "          SEILLAENGE ="; seillaenge; "m"
LPRINT
LPRINT "          ELASTIZITAETSMODUL ="; e; "N/m^2"
LPRINT
LPRINT "          SEILDEHNUNG ="; CLNG(seildehnung * 1000) / 1000; "m"
LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT : LPRINT
END IF
IF fb$ = "j" THEN
LPRINT "          FLUGBAHNDATEN:                FLUGWEITE ="; CLNG(weitemax * 100) / 100; "m"
LPRINT "          -----"
LPRINT "          FLUGHOEHE ="; CLNG(hoehemax * 100) / 100; "m"
LPRINT
LPRINT "          STARTWINKEL ="; CLNG(sw * 10) / 10; "Grad"
LPRINT
LPRINT "          STARTGESCHWINDIGKEIT ="; CLNG(sv * 10) / 10; "m/s"
LPRINT
LPRINT "          WINDGESCHWINDIGKEIT ="; wind; "m/s"
IF wind <> 0 THEN
LPRINT
LPRINT "          WINDRICHTUNG ="; richtung$
END IF
LOCATE 23, 13
INPUT "MÖCHTEN SIE EINE NEUE BERECHNUNG DURCHFÜHREN (j/n)"; neu$
IF neu$ = "j" THEN GOTO neustart ELSE GOTO endgrafik
END IF

neurechnung: '
LOCATE 23, 13
INPUT "MÖCHTEN SIE EINE NEUE BERECHNUNG DURCHFÜHREN (j/n)"; neu$
IF neu$ = "j" THEN GOTO neustart ELSE GOTO endgrafik

```

```
endgrafik: '  
CLS 0  
COLOR 11  
PRINT : PRINT : PRINT : PRINT  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
PRINT "  
SLEEP 1.5  
END
```



```

REM *** MODUL Klappe von SIMEK mit den Routinen Entlastungsklappe, Rundeklappe und eckige Klappe ***
DECLARE SUB EckigeKlappe (v#, kst#, konzentration#, ae#, aem#, pmax#, pstat#, form$, typ$,
mek#, kek#, aek#, bek#, krek#, asek#, thek#, sek#, qek#, ef#)
DECLARE SUB RundeKlappe (v#, kst#, konzentration#, ae#, aem#, pmax#, pstat#, form$, typ$,
mrk#, krk#, dkrk#, krrk#, dsrk#, thrk#, srk#, qrk#, ef#)

DEFDBL A-Z
REM $DYNAMIC
REM *** ROUTINE Entlastungsklappe von Modul Klappe ***
SUB Entlastungsklappe (v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, hzud, form$, typ$, sv, sw, so, cw,
fb$, m, pred, q, ef, theta, kraftmaximal, s, flaeche, rand, durchmesser)

IF typ$ = "k" THEN
DIM druck(1500)
DIM winkel(7000)
DIM omega(7000)
DIM epsilon(7000)
END IF

IF form$ = "r" THEN CALL RundeKlappe(v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$, mrk,
krk, dkrk, krrk, dsrk, thrk, srk, qrk, ef)
IF form$ = "e" THEN CALL EckigeKlappe(v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$, mek,
kek, aek, bek, krek, asek, thek, sek, qek, ef)

SCREEN 12
REM * Druckverlauf *
IF form$ = "r" THEN
LET q = qrk: LET m = mrk
END IF
IF form$ = "e" THEN
LET q = qek: LET m = mek
END IF

IF pstat < .1 THEN LET ansprechdruck = .1 ELSE LET ansprechdruck = pstat
pred = ((.00003264# * pmax * kst + .25 * (ansprechdruck - .1)) * v ^ (3 / 4) / ae) ^ (7 / 4)
* EXP(.00235# * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(q))
IF hzud >= 2 AND pred < 1.5 THEN
FOR pred = .1 TO 1.5 STEP .001
akubisch = (3.264E-05 * kst * pmax + 1 / 4 * (ansprechdruck - .1)) * v ^ (3 / 4)
* (EXP(.00235 * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(q)) / pred) ^ (4 / 7)
testflaeche = akubisch * (1 + (-4.305 * LOG(pred) / LOG(10) + .758) * LOG(hzud) / LOG(10))
IF testflaeche > ae - .02 AND testflaeche < ae + .02 THEN GOTO predermitteltklappe
NEXT pred
END IF
predermitteltklappe: '
dpdt = 1.72 * kst / v ^ (1 / 3) * pred / pmax
hwb = 1.5 * pred / dpdt
B = .637 * pred / dpdt
druck(0) = 0
FOR zeit = 0 TO 1.5 STEP .001
z = z + 1
druck(z) = pred * EXP(-.5 * (ABS(zeit - 1.75 * hwb) / B) ^ 2)
IF druck(z) > druck(z - 1) THEN
LET predmax = CLNG((druck(z) * 10 + .5)) / 10
LET endzeit = zeit * 2
LET endzeit = CLNG(endzeit * 10 + .5) * 100
END IF
NEXT zeit

```

```

IF pred <= pstat THEN
CLS 0
SCREEN 9
SOUND 1000, 10
COLOR 15, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
LOCATE 9, 14
PRINT "DER STATISCHE ANSPRECHDRUCK WIRD NACH DER VON SIMEK"
LOCATE 11, 14
PRINT "VERWENDETEN BERECHNUNGSMETHODE NICHT ERREICHT! DIE"
LOCATE 13, 14
PRINT "BERECHNUNG KANN DESHALB NICHT FORTGESETZT WERDEN."
LOCATE 15, 14
PRINT "VERKLEINERN SIE DIE ENTLASTUNGSFLÄCHE UND/ODER"
LOCATE 17, 14
PRINT "VERÄNDERN SIE DEN STATISCHEN ANSPRECHDRUCK."
SLEEP 25
END
END IF

REM * Zeitachse *
COLOR 11
LOCATE 30, 36: PRINT "Millisekunden"
LOCATE 30, 8: PRINT "0": LOCATE 30, 74: PRINT endzeit

REM * Druckachse *
COLOR 14
LOCATE 14, 4: PRINT "B": LOCATE 16, 4: PRINT "a": LOCATE 18, 4: PRINT "r":
LOCATE 5, 3: PRINT USING "#.#"; predmax: LOCATE 30, 4: PRINT "0"
COLOR 12: LOCATE 3, 14: PRINT USING "Pred = #.#"; pred: LOCATE 3, 27: PRINT "bar"
COLOR 10: LOCATE 3, 36: PRINT USING "dp/dt = #.#"; dpdt: LOCATE 3, 49: PRINT "bar/s"
COLOR 14: LOCATE 1, 14: PRINT "Geschätzter Verlauf des Explosionsüberdruckes im Behälter"
COLOR 15: LOCATE 3, 62: PRINT "weiter mit ←┘"

VIEW (60, 65)-(610, 458), 8, 15
WINDOW (0, 0)-(endzeit, predmax)
FOR vg = 100 TO endzeit - 100 STEP 100
LINE (vg, 0)-(vg, predmax), 15, , &HCCCC
NEXT vg
FOR vg = 50 TO endzeit - 50 STEP 50
LINE (vg, 0)-(vg, predmax), 7, , &H8888
NEXT vg
FOR hg = .1 TO predmax STEP .1
LINE (0, hg)-(endzeit, hg), 15, , &HCCCC
NEXT hg
FOR hg = .05 TO predmax STEP .05
LINE (0, hg)-(endzeit, hg), 7, , &H8888
NEXT hg
FOR zeit = 0 TO endzeit / 1000 STEP .0001
p = pred * EXP(-.5 * (ABS(zeit - 1.75 * hwb) / B) ^ 2)
PSET (zeit * 1000, p), 14
NEXT zeit

k1$ = INPUT$(1)
CLS 0

```

```

REM *** Berechnung der Klappenbewegungs-Datenfelder ***
WINDOW (0, 0)-(1000, 1000)
VIEW (0, 0)-(639, 449)
COLOR 10: LOCATE 9, 27: PRINT "DATENFELDER WERDEN BERECHNET..."
LINE (199, 299)-(801, 601), 12, B

REM * Konstanten *
h = .00005
g = 9.81
rholuft = 1.25
rho = rholuft + konzentration
pi = 3.141592654#

REM *** Anfangsbedingungen ***
z = 0
DO
t = z * h
p = pred * EXP(-.5 * (ABS(t - 1.5 * hwb) / B) ^ 2)
IF p <= pstat THEN LET test = 0 ELSE LET test = 1
IF test = 1 THEN GOTO oeffnungsbeginnklappe
IF test = 0 THEN
zeitfang = z * h
zeitfang = CLNG((zeitfang - .005) * 100) * 10
END IF
z = z + 1
LOOP
oeffnungsbeginnklappe: '
n = 0
fi = 0
fipunkt = 0

REM *** Klappeneigenschaften ***
IF form$ = "r" THEN
LET theta = thrk: LET s = srk
LET thetas = theta - mrk * s ^ 2
LET cw = 1.17
LET aklappe = pi * (dkrk / 2) ^ 2
LET hebel = krk - dkrk / 2
LET f = krk - dkrk
LET k = krk
LET radius = dkrk / 2
LET flaeche = (dkrk / 2) ^ 2 * pi
LET rand = krrk
LET durchmesser = dkrk
END IF

IF form$ = "e" THEN
LET theta = thek: LET s = sek
LET thetas = theta - mek * s ^ 2
IF aek >= bek THEN LET chi = aek / bek
IF aek < bek THEN LET chi = bek / aek
LET cw = 1.1549 + .01389 * chi - .06857 / chi
LET aklappe = aek * bek
LET hebel = kek - aek / 2
LET f = kek - aek
LET k = kek
LET flaeche = aek * bek
LET rand = krek
LET durchmesser = (aek + bek) / 2
END IF

```

```

LET c1 = 1 / (2 * theta)
LET c2 = m * g * s / theta
LET c3 = cw * rholuft * aklappe / (2 * theta) * hebel
LET c4 = 0 / theta

DO
REM *** Lösung der Bewegungsgleichung nach Runge-Kutta ***
t = (z + n) * h

REM *** Erste Näherung ***
p1 = pred * EXP(-.5 * (ABS(t - 1.5 * hwb) / B) ^ 2) * 100000!
IF p1 / 100000! <= pstat THEN
GOTO weiterklappe
END IF

hoeheabschnitt1 = f / COS(fi) - f
hebelgas1 = f / (2 * COS(fi)) + k / 2

IF form$ = "r" THEN
aoef1 = dsrk * pi * ((dsrk / 2 + f) * SIN(fi) - krrk)
IF (2 * hoeheabschnitt1 * radius - hoeheabschnitt1 ^ 2) <= 0 THEN
LET agas1 = 0
GOTO offen1
END IF
x1 = SQR(2 * hoeheabschnitt1 * radius - hoeheabschnitt1 ^ 2) / radius
argument1 = ATN(x1 / SQR(1 - x1 ^ 2))
agas1 = (aklappe - (radius ^ 2 * argument1 - radius * x1 * radius * COS(argument1))) * COS(fi)
END IF

offen1: '
IF form$ = "e" THEN
aoef1 = 2 * bek * asek * SIN(fi / 2) + asek ^ 2 * SIN(fi) + 2 * (aek + bek) * (f * SIN(fi) - krek)
agas1 = aklappe - hoeheabschnitt1 * bek
END IF

IF aoef1 >= ae / aem THEN LET aoef1 = ae / aem
mpunkt1 = .95 * aoef1 * SQR(2 * rho * p1) * aem
rhogas1 = rho - (mpunkt1 * h) / v
vrell = .95 * SQR(2 * p1 / rhogas1) - fipunkt * hebelgas1
Antrieb1d = (p1 * ae / aem * hebelgas1 * (COS(fi)) ^ 2) / theta
Antrieb1r = c1 * cw * (1 - fi / 1.57) * rhogas1 * agas1 * vrell ^ 2 * hebelgas1 * COS(fi)
Gravitation1 = c2 * COS(fi)
Luftreibung1 = c3 * (fipunkt * hebel) ^ 2
Scharnierreibung1 = c4
faktor1d = 1 / (1 + EXP(-((fi - .35) / -.06)))
faktor1r = 1 / (1 + EXP(-((fi - .47) / .09)))
Antrieb1 = Antrieb1d * faktor1d + Antrieb1r * faktor1r
kf11 = (Antrieb1 - Gravitation1 - Luftreibung1 - Scharnierreibung1) * (h ^ 2 / 2)

REM *** Zweite und dritte Näherung ***
p23 = pred * EXP(-.5 * (ABS((t + h / 2) - 1.5 * hwb) / B) ^ 2) * 100000!
hoeheabschnitt23 = f / COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) - f
hebelgas23 = f / (2 * COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11)) + k / 2
IF form$ = "r" THEN
aoef23 = dsrk * pi * ((dsrk / 2 + f) * SIN(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) - krrk)
IF (2 * hoeheabschnitt23 * radius - hoeheabschnitt23 ^ 2) <= 0 THEN
LET agas23 = 0
GOTO offen23
END IF

```



```

x23 = SQR(2 * hoeheabschnitt23 * radius - hoeheabschnitt23 ^ 2) / radius
argument23 = ATN(x23 / SQR(1 - x23 ^ 2))
agas23 = (aklappe - (radius ^ 2 * argument23 - radius * x23 * radius * COS(argument23)))
* COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11)
END IF

offen23: '
IF form$ = "e" THEN
aoef23 = 2 * bek * asek * SIN((fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) / 2) + asek ^ 2
* SIN(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) + 2 * (aek + bek)
* (f * SIN(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) - krek)
agas23 = aklappe - hoeheabschnitt23 * bek
END IF

IF aoef23 >= ae / aem THEN LET aoef23 = ae / aem
mpunkt23 = .95 * aoef23 * SQR(2 * rho * p23) * aem
rhogas23 = rho - (mpunkt23 * h) / v
vrel2 = .95 * SQR(2 * p23 / rhogas23) - (fipunkt + kf11 / h) * hebelgas23
Antrieb23d = (p23 * ae / aem * hebelgas23 * (COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11)) ^ 2) / theta
Antrieb2r = c1 * cw * (1 - (fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) / 1.57) * rhogas23 * agas23
* vrel2 ^ 2 * hebelgas23 * COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11)
Gravitation23 = c2 * COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11)
Luftreibung2 = c3 * ((fipunkt + kf11 / h) * hebel) ^ 2
Scharnierreibung2 = c4
faktor23d = 1 / (1 + EXP(-(((fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) - .35) / -.06)))
faktor23r = 1 / (1 + EXP(-(((fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) - .47) / .09)))
Antrieb2 = Antrieb23d * faktor23d + Antrieb2r * faktor23r
kf12 = (Antrieb2 - Gravitaion23 - Luftreibung2 - Scharnierreibung2) * (h ^ 2 / 2)

vrel3 = .95 * SQR(2 * p23 / rhogas23) - (fipunkt + kf12 / h) * hebelgas23
Antrieb3r = c1 * cw * (1 - (fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11) / 1.57) * rhogas23 * agas23
* vrel3 ^ 2 * hebelgas23 * COS(fi + .5 * fipunkt * h + .25 * kf11)
Luftreibung3 = c3 * ((fipunkt + kf12 / h) * hebel) ^ 2
Scharnierreibung3 = c4
Antrieb3 = Antrieb23d * faktor23d + Antrieb3r * faktor23r
kf13 = (Antrieb3 - Gravitation23 - Luftreibung3 - Scharnierreibung3) * (h ^ 2 / 2)

REM *** Vierte Näherung ***
p4 = pred * EXP(-.5 * (ABS((t + h) - 1.5 * hwb) / B) ^ 2) * 100000!
hoeheabschnitt4 = f / COS(fi + fipunkt * h + kf13) - f
hebelgas4 = f / (2 * COS(fi + fipunkt * h + kf13)) + k / 2
IF form$ = "r" THEN
aoef4 = dsrk * pi * ((dsrk / 2 + f) * SIN(fi + fipunkt * h + kf13) - krrk)
IF (2 * hoeheabschnitt4 * radius - hoeheabschnitt4 ^ 2) <= 0 THEN
LET agas4 = 0
GOTO offen4
END IF
x4 = SQR(2 * hoeheabschnitt4 * radius - hoeheabschnitt4 ^ 2) / radius
argument4 = ATN(x4 / SQR(1 - x4 ^ 2))
agas4 = (aklappe - (radius ^ 2 * argument4 - radius * x4 * radius * COS(argument4)))
* COS(fi + fipunkt * h + kf13)
END IF

offen4: '
IF form$ = "e" THEN
aoef4 = 2 * bek * asek * SIN((fi + fipunkt * h + kf13) / 2) + asek ^ 2
* SIN(fi + fipunkt * h + kf13) + 2 * (aek + bek) * (f * SIN(fi + fipunkt * h + kf13) - krek)
agas4 = aklappe - hoeheabschnitt4 * bek
END IF

IF aoef4 >= ae / aem THEN LET aoef4 = ae / aem
mpunkt4 = .95 * aoef4 * SQR(2 * rho * p4) * aem

```

```

rhogas4 = rho - (mpunkt4 * h) / v
vrel4 = .95 * SQR(2 * p4 / rhogas4) - (fipunkt + 2 * kfi3 / h) * hebelgas4
Antrieb4d = (p4 * ae / aem * hebelgas4 * (COS(fi + fipunkt * h + kfi3)) ^ 2) / theta
Antrieb4r = c1 * cw * (1 - (fi + fipunkt * h + kfi3) / 1.57) * rhogas4 * agas4
* vrel4 ^ 2 * hebelgas4 * COS(fi + fipunkt * h + kfi3)
Gravitation4 = c2 * COS(fi + fipunkt * h + kfi3)
Luftreibung4 = c3 * ((fipunkt + 2 * kfi3 / h) * hebel) ^ 2
Scharnierreibung4 = c4
faktor4d = 1 / (1 + EXP(-(((fi + fipunkt * h + kfi3) - .35) / -.06)))
faktor4r = 1 / (1 + EXP(-(((fi + fipunkt * h + kfi3) - .47) / .09)))
Antrieb4 = Antrieb4d * faktor4d + Antrieb4r * faktor4r
kfi4 = (Antrieb4 - Gravitation4 - Luftreibung4 - Scharnierreibung4) * (h ^ 2 / 2)

weiterklappe: '
kfi = (1 / 3) * (kfi1 + kfi2 + kfi3)
kfistrich = (1 / 6) * (kfi1 + 2 * kfi2 + 2 * kfi3 + kfi4)
fipunkt = fipunkt + 2 * kfistrich / h
fi = fi + fipunkt * h + kfi
winkel(n) = fi * 57.29578
omega(n) = fipunkt
IF n > 1 THEN
epsilon(n) = (omega(n) - omega(n - 1)) / h
IF epsilon(n) >= epsilon(n - 1) THEN
epsilonmax = epsilon(n)
tangentialnmax = n
END IF
IF omega(n) >= omega(n - 1) THEN
omegamax = omega(n)
radialnmax = n
END IF
radialkraftmax = m * s * omegamax ^ 2
tangentialkraftmax = thetas / s * epsilonmax
IF radialkraftmax > tangentialkraftmax THEN LET kraftmaximal = radialkraftmax + thetas / s
* epsilon(radialnmax)
IF radialkraftmax < tangentialkraftmax THEN LET kraftmaximal = tangentialkraftmax + m * s
* omega(tangentialnmax)
kraftmax = radialkraftmax + tangentialkraftmax
kraftmaximal = CLNG(kraftmaximal)
kraftmax = CLNG(kraftmax / 10000 + .5) * 10
END IF
mpunkt = 1 / 3 * (mpunkt1 + mpunkt23 + mpunkt4)
rho = rho - (mpunkt * h) / v
p = pred * EXP(-.5 * (ABS(t - 1.75 * hwb) / B) ^ 2)

zuwachs = 20 / 3 * fi * 57.29578
LINE (200, 300)-(200 + zuwachs, 600), 14, BF
COLOR 11: LOCATE 23, 33: PRINT CLNG(fi * 57.29578 * 10 / 9); "%"; " KOMPLETT!"

n = n + 1

IF fi * 57.29578 > 90 THEN
ende = n
zeitende = (ende + z) * h
zeitende = CLNG((zeitende + .005) * 100) * 10
CLS 0
GOTO grafikklappe
END IF

LOOP

```

```

grafikklappe: '
REM * Zeitachse *
COLOR 11
LOCATE 30, 36: PRINT "Millisekunden"
LOCATE 30, 9: PRINT "0": LOCATE 30, 74: PRINT zeitende - zeitanfang
COLOR 12: LOCATE 30, 3: PRINT "0": COLOR 10: LOCATE 30, 80: PRINT "0":

REM * Druckachse *
COLOR 14
IF predmax > 1 THEN LET druckmax = 2
IF predmax <= 1 THEN LET druckmax = 1
IF predmax <= .5 THEN LET druckmax = .5
IF predmax > 1 THEN LET druckmax = 2
LOCATE 3, 11: PRINT "Überdruck im Behälter"
LOCATE 15, 6: PRINT "B": LOCATE 17, 6: PRINT "a": LOCATE 19, 6: PRINT "r":
LOCATE 30, 6: PRINT "0"
IF predmax <= .5 THEN
LOCATE 3, 5
PRINT USING "#.#"; druckmax
END IF
IF predmax > .5 THEN
LOCATE 3, 5
PRINT druckmax
END IF

REM * Winkelachse *
COLOR 10
LOCATE 2, 35: PRINT "Klappenöffnungswinkel"
LOCATE 13, 80: PRINT "G": LOCATE 15, 80: PRINT "r": LOCATE 17, 80: PRINT "a":
LOCATE 19, 80: PRINT "d"
LOCATE 3, 78: PRINT "100"

REM * Kraftachse *
COLOR 12
LOCATE 2, 60: PRINT "Scharnierkraft"
LOCATE 12, 3: PRINT "K": LOCATE 13, 3: PRINT "i": LOCATE 14, 3: PRINT "l":
LOCATE 15, 3: PRINT "o": LOCATE 16, 3: PRINT "N": LOCATE 17, 3: PRINT "e"
LOCATE 18, 3: PRINT "w": LOCATE 19, 3: PRINT "t": LOCATE 20, 3: PRINT "o"
LOCATE 21, 3: PRINT "n": LOCATE 3, 1: PRINT kraftmax

VIEW (65, 55)-(610, 458), 8, 15
WINDOW (zeitanfang, 0)-(zeitende, 100)
FOR vg = zeitanfang + 10 TO zeitende - 10 STEP 10
LINE (vg, 0)-(vg, 100), 15, , &HCCCC
NEXT vg
FOR vg = zeitanfang + 5 TO zeitende - 5 STEP 5
LINE (vg, 0)-(vg, 100), 7, , &H8888
NEXT vg
FOR hg = 10 TO 90 STEP 10
LINE (zeitanfang, hg)-(zeitende, hg), 15, , &HCCCC
NEXT hg
FOR hg = 5 TO 95 STEP 10
LINE (zeitanfang, hg)-(zeitende, hg), 7, , &H8888
NEXT hg

FOR n = 1 TO ende
p = pred * EXP(-.5 * (ABS((z + n) * h - 1.5 * hwb) / B) ^ 2)
radialkraft = m * s * omega(n) ^ 2
tangentialkraft = thetas / s * epsilon(n)
scharnierkraft = SQR(radialkraft ^ 2 + tangentialkraft ^ 2)

```

```

PSET ((z + n) * h * 1000, winkel(n)), 10
PSET ((z + n) * h * 1000, p * 100 / druckmax), 14
PSET ((z + n) * h * 1000, scharnierkraft / (10 * kraftmax)), 12
NEXT n
COLOR 13: LOCATE 1, 11: PRINT "Maximalkraft auf Klappenscharnier ="; kraftmaximal; "N"
COLOR 15: LOCATE 1, 60: PRINT "weiter mit ←┘"

k3$ = INPUT$(1)
CLS 0

REM * Flugvorbereitung *
SCREEN 9
COLOR 10, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
LOCATE 10, 10: PRINT "IST IHNEN DIE MAXIMALE KRAFT BEKANNT, FÜR WELCHE DAS SCHARNIER"
LOCATE 12, 10: PRINT "IHRER DRUCKENTLASTUNGSKLAPPE AUSGELEGT IST (j/n)?"
COLOR 14, 8: LOCATE 12, 60: INPUT "", klappfrage$

IF klappfrage$ = "n" THEN
CLS 0
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 10, 8
LOCATE 6, 10: PRINT "AUFGRUND DER UNKENNTNIS DER SCHARNIERBELASTBARKEIT KANN HIER"
LOCATE 8, 10: PRINT "KEINE ENTSCHEIDUNG DARÜBER GEFÄLLT WERDEN, OB DIE Klappe DER"
LOCATE 10, 10: PRINT "AUFTRETENDEN BELASTUNG STANDHALTEN WIRD. DIESES PROGRAMM IST"
LOCATE 12, 10: PRINT "ABER DAZU IN DER LAGE, AUF DER BASIS DER BISHER BEKANNTEN DA-"
LOCATE 14, 10: PRINT "TEN DIE MAXIMAL ERREICHBARE FLUGWEITE DER ENTLASTUNGSKLAPPE"
LOCATE 16, 10: PRINT "FÜR DEN FALL EINES KLAPPENABRISSES ZU ERRECHNEN."
SLEEP 5
COLOR 11
LOCATE 20, 10: PRINT "SOLL EINE FLUGWEITENBERECHNUNG DURCHGEFÜHRT WERDEN (j/n)?"
COLOR 14, 8: LOCATE 20, 68: INPUT "", fb$
IF fb$ = "n" THEN GOTO klappzurueckhauptmodul
IF fb$ = "j" THEN

maximalreichweiteklappe:
n = 0
sw = 45
DO UNTIL winkel(n) > 45
sv = SQR((theta - thetas) * omega(n) ^ 2 / m)
so = omega(n)
n = n + 1
LOOP
END IF
GOTO klappzurueckhauptmodul
END IF
IF klappfrage$ = "j" THEN
COLOR 12, 8
LOCATE 16, 10: PRINT "GEBEN SIE DEN BETRAG DIESER MAXIMALKRAFT EIN (N):"
COLOR 14, 8: LOCATE 16, 60: INPUT "", scharnierbelastbarkeit
END IF

IF scharnierbelastbarkeit - kraftmaximal > 3000 THEN
CLS 0
COLOR 11, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B

```

```

COLOR 10, 8
LOCATE 9, 15: PRINT "ALLER VORAUSSICHT NACH WIRD DIE KONSTRUKTION IHRER"
LOCATE 11, 15: PRINT "ENTLASTUNGSKLAPPE DEN ZU ERWARTENDEN BELASTUNGEN"
LOCATE 13, 15: PRINT "STANDHALTEN KÖNNEN. DIE GEFAHR EINES KLAPPENAB-"
LOCATE 15, 15: PRINT "RISSES BESTEHT DEMNACH NICHT!"
SLEEP 3
LOCATE 18, 15: PRINT "WEITER MIT DER TASTE ← ..."
k4$ = INPUT$(1)
fb$ = "n"
GOTO klappezurueckhauptmodul
END IF
IF scharnierbelastbarkeit - kraftmaximal < 3000 THEN
CLS 0
COLOR 11, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 14, 8
LOCATE 5, 10: PRINT "DIE ERECHNETE MAXIMALE KRAFT AUF DAS KLAPPENSCHARNIER LIEGT"
LOCATE 7, 10: PRINT "IN DER GLEICHEN GRÖSSENORDNUNG WIE DIE VON IHNEN EINGEGEBENE"
LOCATE 9, 10: PRINT "MAXIMALE BELASTBARKEIT DES KLAPPENSCHARNIERES ODER GAR DARÜBER."
SLEEP 5
alarm = 12
DO UNTIL tut = 3
IF alarm = 13 THEN LET alarm = 11
COLOR alarm
LOCATE 12, 10: PRINT "ES BESTEHT DESHALB DIE GEFAHR DES KLAPPENABRISSES!!!"
SOUND 1000, 5
SLEEP 1
alarm = alarm + 1
tut = tut + 1
LOOP
SLEEP 1
COLOR 10, 8
LOCATE 15, 10: PRINT "DIESES PROGRAMM IST DAZU IN DER LAGE, AUF DER BASIS DER BISHER"
LOCATE 17, 10: PRINT "BEKANNTEN DATEN DIE ERREICHBARE FLUGWEITE DER ENTLASTUNGSKLAPPE"
LOCATE 19, 10: PRINT "FÜR DEN FALL EINES KLAPPENABRISSES ZU ERRECHNEN."
SLEEP 5
COLOR 11, 8
LOCATE 22, 10: PRINT "SOLL EINE FLUGWEITENBERECHNUNG DURCHGEFÜHRT WERDEN (j/n)?"
COLOR 14, 8: LOCATE 22, 68: INPUT "", fb$
IF fb$ = "n" THEN GOTO klappezurueckhauptmodul
IF fb$ = "j" THEN
n = 0
DO UNTIL scharnierkraft >= scharnierbelastbarkeit
IF scharnierbelastbarkeit - kraftmaximal > 0
AND scharnierbelastbarkeit - kraftmaximal < 3000 THEN GOTO maximalreichweiteklappe
radialkraft = m * s * omega(n) ^ 2
tangentialkraft = thetas / s * epsilon(n)
scharnierkraft = SQR(radialkraft ^ 2 + tangentialkraft ^ 2)
sv = SQR((theta - thetas) * omega(n) ^ 2 / m)
sw = winkel(n)
so = omega(n)
n = n + 1
LOOP
END IF
END IF
klappezurueckhauptmodul: '
CLS 0
END SUB

```

```

REM *** ROUTINE ECKIGEKLAPPE VON MODUL Klappe ***
SUB EckigeKlappe (v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$,
mek, kek, aek, bek, krek, asek, thek, sek, gek, ef)

REM * Einführungstext *
CLS
COLOR 15, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 14, 8
LOCATE 6, 11: PRINT "IM FOLGENDEN WERDEN SIE EINE SKIZZE DER SEITENANSICHT EINER"
LOCATE 8, 11: PRINT "ENTLASTUNGSKLAPPE SEHEN. MESSEN UND NOTIEREN SIE SICH DIE MIT"
LOCATE 10, 11: PRINT "PFEILEN GEKENNZEICHNETEN ABMESSUNGEN DER KLAPPENAUSDEHNUNG K,"
LOCATE 12, 11: PRINT "DER KLAPPENSEITENLÄNGEN AK UND BK, DES KLAPPENRANDES KR UND"
LOCATE 14, 11: PRINT "DER SEITENLÄNGE AS DER ENTLASTUNGSÖFFNUNG! MESSEN SIE AUCH"
LOCATE 16, 11: PRINT "DIE KLAPPENMASSE! SIE WERDEN IN DER NÄCHSTEN EINGABETAFEL"
LOCATE 18, 11: PRINT "ZUR EINGABE DIESER DATEN AUFGEFORDERT."
LOCATE 20, 11: PRINT "WEITER STETS MIT DER TASTE ← ... "

ek1$ = INPUT$(1)

REM * Grafik *
CLS
SCREEN 9
COLOR 15, 0
PRINT "      SKIZZE DER SEITENANSICHT EINER RECHTECKIGEN DRUCKENTLASTUNGSKLAPPE"
LINE (147, 270)-(450, 330), , B
LINE (450, 270)-(500, 300), , B
CIRCLE (500, 270), 5
PAINT (501, 271): PAINT (499, 271)
LINE (500, 270)-(180, 150): LINE (500, 267)-(183, 148)
LINE (500, 270)-(500, 267): LINE (180, 150)-(183, 148)
PAINT (185, 151)
LINE (180, 150)-(172, 160): LINE (185, 148)-(175, 161)
LINE (173, 160)-(175, 161): LINE (180, 150)-(185, 148)
PAINT (180, 153)
LINE (457, 253)-(449, 263): LINE (461, 253)-(452, 264)
LINE (457, 253)-(461, 253): LINE (449, 263)-(452, 264)
PAINT (457, 256)
LINE (180, 150)-(260, 40), , , &HCCCC
LINE (500, 270)-(585, 160), , , &HCCCC
LINE (460, 253)-(540, 145), , , &HCCCC
LINE (320, 200)-(400, 92), , , &HCCCC
LINE (180, 150)-(158, 141), , , &HCCCC
LINE (175, 161)-(150, 151), , , &HCCCC

REM * Obere Abmessung *
COLOR 11, 0
LINE (253, 50)-(578, 170)
LINE (253, 50)-(260, 50): LINE (253, 50)-(256, 54): LINE (260, 50)-(256, 54)
PAINT (257, 51): PAINT (256, 52)
LINE (578, 170)-(570, 170): LINE (578, 170)-(574, 166): LINE (570, 170)-(574, 166)
PAINT (573, 169): PAINT (576, 169): PAINT (574, 167)

REM * Mittlere Abmessung *
COLOR 10, 0
LINE (230, 80)-(510, 185)
LINE (231, 81)-(238, 81): LINE (231, 81)-(234, 85): LINE (238, 81)-(234, 85)

```

```

PAINT (235, 81): PAINT (234, 83): PAINT (233, 82): PAINT (236, 82)
LINE (510, 185)-(502, 185): LINE (510, 185)-(506, 181): LINE (502, 185)-(506, 181)
PAINT (505, 184): PAINT (506, 182): PAINT (508, 184)

```

```

REM * Untere Abmessung *

```

```

COLOR 13, 0
LINE (350, 160)-(530, 230)
LINE (350, 160)-(357, 160): LINE (350, 160)-(353, 164): LINE (357, 160)-(353, 164)
PAINT (353, 162): PAINT (354, 161)
LINE (530, 230)-(522, 230): LINE (530, 230)-(526, 226): LINE (522, 230)-(526, 226)
PAINT (525, 229): PAINT (527, 228)

```

```

REM * Rand *

```

```

COLOR 12, 0
LINE (159, 153)-(164, 145)
LINE (158, 154)-(158, 150): LINE (158, 154)-(162, 152): LINE (158, 150)-(162, 152)
PAINT (160, 151): PAINT (159, 152)
LINE (166, 144)-(166, 148): LINE (166, 144)-(162, 146): LINE (166, 148)-(162, 146)
PAINT (165, 146): PAINT (163, 146)

```

```

REM * Öffnung *

```

```

COLOR 9, 0
LINE (147, 282)-(450, 282)
LINE (147, 282)-(154, 279): LINE (147, 282)-(154, 285): LINE (154, 279)-(154, 285)
PAINT (152, 281): PAINT (152, 283)
LINE (450, 282)-(443, 279): LINE (450, 282)-(443, 285): LINE (443, 279)-(443, 285)
PAINT (445, 281): PAINT (445, 283)

```

```

REM * Halterung *

```

```

COLOR 14, 0
LINE (450, 282)-(500, 282)
LINE (450, 282)-(457, 279): LINE (450, 282)-(457, 285): LINE (457, 279)-(457, 285)
PAINT (455, 281): PAINT (455, 283)
LINE (500, 282)-(493, 279): LINE (500, 282)-(493, 285): LINE (493, 279)-(493, 285)
PAINT (495, 281): PAINT (495, 283)

```

```

REM * Beschriftung *

```

```

COLOR 11, 0: LOCATE 8, 58: PRINT "Klappenausdehnung K"
COLOR 10, 0: LOCATE 6, 7: PRINT "Klappenseitenlänge AK"
COLOR 12, 0: LOCATE 11, 3: PRINT "Klappenrand KR"
COLOR 9, 0: LOCATE 22, 20: PRINT "Seitenlänge AS der Entlastungsöffnung"
COLOR 14, 0: LOCATE 21, 68: PRINT "L=K-AK"
COLOR 13, 0: LOCATE 17, 72: PRINT "H=K-AK/2"

```

```

COLOR 15, 0
ek2$ = INPUT$(1)
CLS

```

```

REM * Eingabetafel: Maße einer rechteckigen Entlastungsklappe *

```

```

LINE (150, 7)-(480, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 24: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL DREI: KLAPPENDATEN "
LOCATE 7, 7: COLOR 12: PRINT "KLAPPENMASSE (kg) ="
LOCATE 7, 44: PRINT "KLAPPENAUSDEHNUNG K (m) ="
LOCATE 10, 7: PRINT "KLAPPENSEITE AK (m) ="
LOCATE 10, 44: PRINT "KLAPPENSEITE BK (m) ="

```

```

LOCATE 13, 7: PRINT "KLAPPENRAND KR (m) ="
LOCATE 13, 44: PRINT "ÖFFNUNGSEITE AS (m) ="
LOCATE 16, 7: COLOR 10: PRINT "SCHWERPUNKT (m) ="
LOCATE 16, 44: PRINT "TRÄGHEITSMOMENT BEZÜGLICH"
LOCATE 17, 44: PRINT "DER DREHACHSE (kg*m^2) ="
COLOR 14
LOCATE 7, 27: INPUT "", mek: LOCATE 7, 70: INPUT "", kek
LOCATE 10, 29: INPUT "", aek: LOCATE 10, 66: INPUT "", bek
LOCATE 13, 28: INPUT "", krek: LOCATE 13, 66: INPUT "", asek
LOCATE 16, 25: INPUT "", sek
IF sek = 0 THEN
LET sek = kek - aek / 2
LOCATE 16, 23: COLOR 10: PRINT "~"
LOCATE 16, 25: COLOR 14: PRINT USING "##.###"; sek
LET gleich$ = "etwa"
END IF
LOCATE 17, 69: INPUT "", thek
IF thek = 0 THEN
LET thek = mek / 12 * aek ^ 2 + mek * (aek / 2 + kek - aek) ^ 2
LOCATE 17, 67: COLOR 10: PRINT "~"
COLOR 14
IF thek < 100 THEN LOCATE 17, 69: PRINT USING "##.###"; thek
IF thek >= 100 THEN LOCATE 17, 69: PRINT USING "###.###"; thek
IF thek >= 1000 THEN LOCATE 17, 69: PRINT USING "####.###"; thek
LET gleich$ = "etwa"
END IF

qek = thek / (ae / aem * (kek - aek / 2))
ef = CLNG((EXP(.00235# * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(qek))) ^ (-(4 / 7)) * 100)

LOCATE 20, 25
PRINT "MIT DIESEN DATEN ERGIBT SICH:"
LOCATE 22, 45: PRINT USING "ENTLASTUNGSFÄHIGKEIT ≈ ###"; ef: LOCATE 22, 72: PRINT "%"
IF gleich$ = "etwa" THEN
LOCATE 22, 6
PRINT USING "KLAPPENWIDERSTAND ≈ ##.###"; qek: LOCATE 22, 33: PRINT "kg/m"
ELSE
LOCATE 22, 6
PRINT USING "KLAPPENWIDERSTAND = ##.###"; qek: LOCATE 22, 33: PRINT "kg/m"
END IF

ek3$ = INPUT$(1)

END SUB

```



```

REM *** ROUTINE RUNDEKLAPPE VON MODUL Klappe ***
SUB RundeKlappe (v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$,
mrk, krk, dkrk, krrk, dsrk, thrk, srk, qrk, ef)

REM * Einführungstext *
CLS
COLOR 15, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 14, 8
LOCATE 6, 14: PRINT "IM FOLGENDEN WERDEN SIE EINE SKIZZE DER SEITENANSICHT"
LOCATE 8, 14: PRINT "EINER ENTLASTUNGSKLAPPE SEHEN. MESSEN UND NOTIEREN SIE"
LOCATE 10, 14: PRINT "SICH DIE MIT PFEILEN GEKENNZEICHNETEN ABMESSUNGEN DER"
LOCATE 12, 14: PRINT "KLAPPENAUSDEHNUNG K, DES KLAPPENDURCHMESSERS DK UND"
LOCATE 14, 14: PRINT "DES KLAPPENRANDES KR! MESSEN SIE AUCH DIE KLAPPEN-"
LOCATE 16, 14: PRINT "MASSE! SIE WERDEN IN DER NÄCHSTEN EINGABETAFEL ZUR"
LOCATE 18, 14: PRINT "EINGABE DIESER DATEN AUFGEFORDERT."
LOCATE 20, 14: PRINT "WEITER STETS MIT DER TASTE ← ..."

rk1$ = INPUT$(1)

REM * Grafik *
CLS
SCREEN 9
COLOR 15, 0
PRINT "          SKIZZE DER SEITENANSICHT EINER RUNDEN DRUCKENTLASTUNGSKLAPPE"
LINE (147, 270)-(450, 330), , B
LINE (450, 270)-(500, 300), , B
CIRCLE (500, 270), 5
PAINT (501, 271): PAINT (499, 271)
LINE (500, 270)-(180, 150): LINE (500, 267)-(183, 148)
LINE (500, 270)-(500, 267): LINE (180, 150)-(183, 148)
PAINT (185, 151)
LINE (180, 150)-(172, 160): LINE (185, 148)-(175, 161)
LINE (173, 160)-(175, 161): LINE (180, 150)-(185, 148)
PAINT (180, 153)
LINE (457, 253)-(449, 263): LINE (461, 253)-(452, 264)
LINE (457, 253)-(461, 253): LINE (449, 263)-(452, 264)
PAINT (457, 256)
LINE (180, 150)-(260, 40), , , &HCCCC
LINE (500, 270)-(585, 160), , , &HCCCC
LINE (460, 253)-(540, 145), , , &HCCCC
LINE (320, 200)-(400, 92), , , &HCCCC
LINE (180, 150)-(158, 141), , , &HCCCC
LINE (175, 161)-(150, 151), , , &HCCCC

REM * Obere Abmessung *
COLOR 11, 0
LINE (253, 50)-(578, 170)
LINE (253, 50)-(260, 50): LINE (253, 50)-(256, 54): LINE (260, 50)-(256, 54)
PAINT (257, 51): PAINT (256, 52)
LINE (578, 170)-(570, 170): LINE (578, 170)-(574, 166): LINE (570, 170)-(574, 166)
PAINT (573, 169): PAINT (576, 169): PAINT (574, 167)

REM * Mittlere Abmessung *
COLOR 10, 0
LINE (230, 80)-(510, 185)
LINE (231, 81)-(238, 81): LINE (231, 81)-(234, 85): LINE (238, 81)-(234, 85)
PAINT (235, 81): PAINT (234, 83): PAINT (233, 82): PAINT (236, 82)

```

```
LINE (510, 185)-(502, 185): LINE (510, 185)-(506, 181): LINE (502, 185)-(506, 181)
PAINT (505, 184): PAINT (506, 182): PAINT (508, 184)
```

```
REM * Untere Abmessung *
```

```
COLOR 13, 0
LINE (350, 160)-(530, 230)
LINE (350, 160)-(357, 160): LINE (350, 160)-(353, 164): LINE (357, 160)-(353, 164)
PAINT (353, 162): PAINT (354, 161)
LINE (530, 230)-(522, 230): LINE (530, 230)-(526, 226): LINE (522, 230)-(526, 226)
PAINT (525, 229): PAINT (527, 228)
```

```
REM * Rand *
```

```
COLOR 12, 0
LINE (159, 153)-(164, 145)
LINE (158, 154)-(158, 150): LINE (158, 154)-(162, 152): LINE (158, 150)-(162, 152)
PAINT (160, 151): PAINT (159, 152)
LINE (166, 144)-(166, 148): LINE (166, 144)-(162, 146): LINE (166, 148)-(162, 146)
PAINT (165, 146): PAINT (163, 146)
```

```
REM * Öffnung *
```

```
COLOR 9, 0
LINE (147, 282)-(450, 282)
LINE (147, 282)-(154, 279): LINE (147, 282)-(154, 285): LINE (154, 279)-(154, 285)
PAINT (152, 281): PAINT (152, 283)
LINE (450, 282)-(443, 279): LINE (450, 282)-(443, 285): LINE (443, 279)-(443, 285)
PAINT (445, 281): PAINT (445, 283)
```

```
REM * Halterung *
```

```
COLOR 14, 0
LINE (450, 282)-(500, 282)
LINE (450, 282)-(457, 279): LINE (450, 282)-(457, 285): LINE (457, 279)-(457, 285)
PAINT (455, 281): PAINT (455, 283)
LINE (500, 282)-(493, 279): LINE (500, 282)-(493, 285): LINE (493, 279)-(493, 285)
PAINT (495, 281): PAINT (495, 283)
```

```
REM * Beschriftung *
```

```
COLOR 11, 0: LOCATE 8, 58: PRINT "Klappenausdehnung K"
COLOR 10, 0: LOCATE 6, 7: PRINT "Klappendurchmesser DK"
COLOR 12, 0: LOCATE 11, 3: PRINT "Klappenrand KR"
COLOR 9, 0: LOCATE 22, 20: PRINT "Durchmesser DS der Entlastungsöffnung"
COLOR 14, 0: LOCATE 21, 67: PRINT "L=K-DK"
COLOR 13, 0: LOCATE 17, 71: PRINT "H=K-DK/2"
```

```
COLOR 15, 0
rk2$ = INPUT$(1)
CLS
```

```
REM * Eingabetafel: Maße einer runden Entlastungsklappe *
```

```
LINE (150, 7)-(480, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 24: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL DREI: KLAPPENDATEN "
LOCATE 7, 6: COLOR 12: PRINT "KLAPPENMASSE (kg) ="
LOCATE 7, 45: PRINT "KLAPPENAUSDEHNUNG K (m) ="
LOCATE 10, 6: PRINT "KLAPPENDURCHMESSER DK (m) ="
LOCATE 10, 45: PRINT "KLAPPENRAND KR (m) ="
LOCATE 13, 6: COLOR 10: PRINT "SCHWERPUNKT (m) ="
```

```

LOCATE 13, 45: PRINT "TRÄGHEITSMOMENT BEZÜGLICH"
LOCATE 14, 45: PRINT "DER DREHACHSE (kg*m^2) ="
COLOR 14
LOCATE 7, 26: INPUT "", mrk: LOCATE 7, 71: INPUT "", krk
LOCATE 10, 34: INPUT "", dkrk: LOCATE 10, 66: INPUT "", krrk
LOCATE 13, 24: INPUT "", srk
dsrk = 2 * SQR(ae / 3.141593)
IF srk = 0 THEN
LET srk = krk - dkrk / 2
LOCATE 13, 22: COLOR 10: PRINT "~"
LOCATE 13, 24: COLOR 14: PRINT USING "##.###"; srk
LET gleich$ = "etwa"
END IF
LOCATE 14, 70: INPUT "", thrk
IF thrk = 0 THEN
LET thrk = mrk / 4 * (dkrk / 2) ^ 2 + mrk * (dkrk / 2 + krk - dkrk) ^ 2
LOCATE 14, 68: COLOR 10: PRINT "~"
COLOR 14
IF thrk < 100 THEN LOCATE 14, 70: PRINT USING "##.###"; thrk
IF thrk >= 100 THEN LOCATE 14, 70: PRINT USING "###.###"; thrk
IF thrk >= 1000 THEN LOCATE 14, 70: PRINT USING "####.###"; thrk
LET gleich$ = "etwa"
END IF

qrk = thrk / (ae / aem * (krk - dkrk / 2))
ef = CLNG((EXP(.00235# * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(qrk))) ^ (-(4 / 7)) * 100)

LOCATE 19, 25
PRINT "MIT DIESEN DATEN ERGIBT SICH:"
LOCATE 22, 45: PRINT USING "ENTLASTUNGSFÄHIGKEIT ≈ ###"; ef: LOCATE 22, 72: PRINT "%"
IF gleich$ = "etwa" THEN
LOCATE 22, 6
PRINT USING "KLAPPENWIDERSTAND ≈ ##.##"; qrk: LOCATE 22, 33: PRINT "kg/m"
ELSE
LOCATE 22, 6
PRINT USING "KLAPPENWIDERSTAND = ##.##"; qrk: LOCATE 22, 33: PRINT "kg/m"
END IF

rk3$ = INPUT$(1)
END SUB

```

```

REM *** MODUL DECKEL VON SIMEK MIT DEN ROUTINEN RUNDERDECKEL UND ECKIGERDECKEL ***
DECLARE SUB RunderDeckel (v#, kst#, konzentration#, ae#, aem#, pmax#, pstat#, form$, typ$,
mrd#, drd#, drrd#, smrd#, slrd#, ssrd#, sard#, erd#, qrd#, ef#, fgrd#)
DECLARE SUB EckigerDeckel (v#, kst#, konzentration#, ae#, aem#, pmax#, pstat#, form$, typ$,
med#, aed#, bed#, dred#, smed#, sled#, ssed#, saed#, eed#, qed#, ased#, ef#, fged#)

REM $DYNAMIC
REM *** ROUTINE ENTLASTUNGSDECKEL VON MODUL DECKEL ***
SUB Entlastungsdeckel (v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, hzud, form$, typ$, sv, sw, so, cw,
fb$, m, pred, q, ef, theta, kraftmaximal, s, flaeche, rand, durchmesser, fg, sz, ss, seillaenge, E,
seildehnung, mrd, med)

IF typ$ = "d" THEN
DIM druck(1500)
DIM weg(7000)
DIM geschwindigkeit(7000)
DIM seilkraft(7000)
END IF

IF form$ = "r" THEN CALL RunderDeckel(v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$, mrd,
drd, drrd, smrd, slrd, ssrd, sard, erd, qrd, ef, fgrd)
IF form$ = "e" THEN CALL EckigerDeckel(v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$, med,
aed, bed, dred, smed, sled, ssed, saed, eed, qed, ased, ef, fged)

SCREEN 12
REM * Druckverlauf *
IF form$ = "r" THEN
LET q = qrd: LET m = mrd
END IF
IF form$ = "e" THEN
LET q = qed: LET m = med
END IF
IF pstat < .1 THEN LET ansprechdruck = .1 ELSE LET ansprechdruck = pstat
pred = ((.00003264# * pmax * kst + .25 * (ansprechdruck - .1)) * v ^ (3 / 4) / ae) ^ (7 / 4)
* EXP(.00235# * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(q))
IF hzud >= 2 AND pred < 1.5 THEN
FOR pred = .1 TO 1.5 STEP .001
akubisch = (3.264E-05 * kst * pmax + 1 / 4 * (ansprechdruck - .1)) * v ^ (3 / 4)
* (EXP(.00235 * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(q)) / pred) ^ (4 / 7)
testflaeche = akubisch * (1 + (-4.305 * LOG(pred) / LOG(10) + .758) * LOG(hzud) / LOG(10))
IF testflaeche > ae - .02 AND testflaeche < ae + .02 THEN GOTO predermitteltdeckel
NEXT pred
END IF
predermitteltdeckel: '
dpdt = 1.72 * kst / v ^ (1 / 3) * pred / pmax
hwb = 1.5 * pred / dpdt
B = .637 * pred / dpdt
druck(0) = 0
FOR zeit = 0 TO 1.5 STEP .001
z = z + 1
druck(z) = pred * EXP(-.5 * (ABS(zeit - 1.5 * hwb) / B) ^ 2)
IF druck(z) > druck(z - 1) THEN
LET predmax = CLNG((druck(z) * 10 + .5)) / 10
LET endzeit = zeit * 2
LET endzeit = CLNG(endzeit * 10 + .5) * 100
END IF
NEXT zeit

```

```

IF pred <= pstat THEN
CLS 0
SCREEN 9
SOUND 1000, 10: COLOR 15, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
LOCATE 9, 14
PRINT "DER STATISCHE ANSPRECHDRUCK WIRD NACH DER VON SIMEK"
LOCATE 11, 14
PRINT "VERWENDETEN BERECHNUNGSMETHODE NICHT ERREICHT! DIE"
LOCATE 13, 14
PRINT "BERECHNUNG KANN DESHALB NICHT FORTGESETZT WERDEN."
LOCATE 15, 14
PRINT "VERKLEINERN SIE DIE ENTLASTUNGSFLÄCHE UND/ODER"
LOCATE 17, 14
PRINT "VERÄNDERN SIE DEN STATISCHEN ANSPRECHDRUCK."
SLEEP 25: END
END IF

REM * Zeitachse *
COLOR 11
LOCATE 30, 36: PRINT "Millisekunden"
LOCATE 30, 8: PRINT "0": LOCATE 30, 74: PRINT "endzeit"

REM * Druckachse *
COLOR 14
LOCATE 14, 4: PRINT "B": LOCATE 16, 4: PRINT "a": LOCATE 18, 4: PRINT "r":
LOCATE 5, 3: PRINT USING "#.#"; predmax: LOCATE 30, 4: PRINT "0"
COLOR 12: LOCATE 3, 14: PRINT USING "Pred = #.#"; pred: LOCATE 3, 27: PRINT "bar"
COLOR 10: LOCATE 3, 36: PRINT USING "dp/dt = #.#"; dpdt: LOCATE 3, 49: PRINT "bar/s"
COLOR 14: LOCATE 1, 14: PRINT "Geschätzter Verlauf des Explosionsüberdruckes im Behälter"
COLOR 15: LOCATE 3, 62: PRINT "weiter mit ←┘"

VIEW (60, 65)-(610, 458), 8, 15
WINDOW (0, 0)-(endzeit, predmax)
FOR vg = 100 TO endzeit - 100 STEP 100
LINE (vg, 0)-(vg, predmax), 15, , &HCCCC
NEXT vg
FOR vg = 50 TO endzeit - 50 STEP 50
LINE (vg, 0)-(vg, predmax), 7, , &H8888
NEXT vg
FOR hg = .1 TO predmax STEP .1
LINE (0, hg)-(endzeit, hg), 15, , &HCCCC
NEXT hg
FOR hg = .05 TO predmax STEP .05
LINE (0, hg)-(endzeit, hg), 7, , &H8888
NEXT hg
FOR zeit = 0 TO endzeit / 1000 STEP .0001
p = pred * EXP(-.5 * (ABS(zeit - 1.75 * hwb) / B) ^ 2)
PSET (zeit * 1000, p), 14
NEXT zeit
d1$ = INPUT$(1)
CLS 0

REM *** Berechnung der Deckelbewegungs-Datenfelder ***
WINDOW (0, 0)-(1000, 1000)
VIEW (0, 0)-(639, 449)
COLOR 10: LOCATE 9, 27: PRINT "DATENFELDER WERDEN BERECHNET..."
LINE (199, 299)-(801, 601), 12, B

```

```

REM *** Konstanten ***
h = .00005
g = 9.81
rholuft = 1.25
rho = rholuft + konzentration
pi = 3.141592654#

REM *** Deckeigenschaften ***
IF form$ = "r" THEN
LET dradius = drd / 2
LET cw = 1.17
LET adeckel = pi * (drd / 2) ^ 2
LET sradius = ssrd / 2
LET rhoseil = smrd / (sradius ^ 2 * pi * slrd)
LET seillaenge = slrd
LET sz = sard
LET ss = ssrd
LET E = erd
LET fg = fgrd
LET flaeche = (drd / 2) ^ 2 * pi
LET rand = drrd
LET durchmesser = drd
END IF

IF form$ = "e" THEN
LET s = aed / 2
IF aed >= bed THEN LET chi = aed / bed
IF aed < bed THEN LET chi = bed / aed
LET cw = 1.1549 + .01389 * chi - .06857 / chi
LET adeckel = aed * bed
LET sradius = ssed / 2
LET rhoseil = smed / (sradius ^ 2 * pi * sled)
LET seillaenge = sled
LET sz = saed
LET ss = ssed
LET E = eed
LET fg = fged
LET flaeche = aed * bed
LET rand = dred
LET durchmesser = (aed + bed) / 2
END IF

REM *** Anfangsbedingungen ***
z = 0
DO
t = z * h
p = pred * EXP(-.5 * (ABS(t - 1.5 * hwb) / B) ^ 2)
IF p <= pstat THEN LET test = 0 ELSE LET test = 1
IF test = 1 THEN GOTO oeffnungsbeginndeckel
IF test = 0 THEN
zeitanfang = z * h
zeitanfang = CLNG((zeitanfang - .005) * 100) * 10
END IF
z = z + 1
LOOP
oeffnungsbeginndeckel: '
n = 0
y = 0
ypunkt = 0
seilflaeche = pi * sradius ^ 2

```

```

REM *** Lösung der Bewegungsgleichung nach Runge-Kutta ***
DO
c1 = 1 / (2 * m)
c2 = g
c3 = cw * rholuft * adeckel / (2 * m)

t = (z + n) * h

REM *** Erste Näherung ***
p1 = pred * EXP(-.5 * (ABS(t - 1.5 * hwb) / B) ^ 2) * 100000!
IF p1 <= pstat * 100000 THEN GOTO weiterdeckel
IF form$ = "r" THEN LET aoef1 = SQR(4 * pi * ae / aem) * (y - drrd)
IF form$ = "e" THEN LET aoef1 = (2 * ased + 2 * ae / (ased * aem)) * (y - dred)
IF aoef1 >= ae / aem THEN LET aoef1 = ae / aem
IF aoef1 < 0 THEN LET aoef1 = 0
mpunkt1 = .95 * SQR(2 * p1 * rho) * aoef1 * aem
rho1 = rho - (mpunkt1 * h) / v
vrel1 = .95 * SQR(2 * p1 / rho1) - ypunkt
Antrieb1d = (p1 * ae / aem) / m
Antrieb1r = c1 * cw * rho1 * adeckel * vrel1 ^ 2
Gravitation1 = c2
Luftreibung1 = c3 * ypunkt ^ 2
IF ypunkt < 0 THEN LET Luftreibung1 = -Luftreibung1
IF y >= seillaenge THEN LET seilzug1 = (sz * E * seilflaeche) / (m * seillaenge)
* (y - seillaenge) ELSE seilzug1 = 0
faktor1d = 1 / (1 + EXP(-((y - .2) / -.06)))
faktor1r = 1 / (1 + EXP(-((y - .3) / .09))) - 1 / (1 + EXP(-((y - 2) / .3)))
Antrieb1 = Antrieb1d * faktor1d + Antrieb1r * faktor1r
ky1 = (Antrieb1 - Gravitation1 - Luftreibung1 - seilzug1) * (h ^ 2 / 2)

REM *** Zweite und dritte Näherung ***
p23 = pred * EXP(-.5 * (ABS((t + h / 2) - 1.5 * hwb) / B) ^ 2) * 100000!
IF form$ = "r" THEN aoef23 = SQR(4 * pi * ae / aem) * ((y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) - drrd)
IF form$ = "e" THEN aoef23 = (2 * ased + 2 * ae / (ased * aem)) * ((y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) - dred)
IF aoef23 >= ae / aem THEN LET aoef23 = ae / aem
IF aoef23 < 0 THEN LET aoef23 = 0
mpunkt23 = .95 * SQR(2 * p23 * rho) * aoef23 * aem
rho23 = rho - (mpunkt23 * h) / v
vrel2 = .95 * SQR(2 * p23 / rho23) - (ypunkt + ky1 / h)
Antrieb23d = (p23 * ae / aem) / m
Antrieb2r = c1 * cw * rho23 * adeckel * vrel2 ^ 2
Gravitation23 = c2
Luftreibung2 = c3 * (ypunkt + ky1 / h) ^ 2
IF ypunkt < 0 THEN LET Luftreibung2 = -Luftreibung2
IF (y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) >= seillaenge THEN LET seilzug23 = (sz * E * seilflaeche)
/ (m * seillaenge) * ((y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) - seillaenge) ELSE seilzug23 = 0
faktor23d = 1 / (1 + EXP(-((y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) - .2) / -.06)))
faktor23r = 1 / (1 + EXP(-((y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) - .3) / .09))) - 1
/ (1 + EXP(-((y + .5 * ypunkt * h + .25 * ky1) - 2) / .3)))
Antrieb2 = Antrieb23d * faktor23d + Antrieb2r * faktor23r
ky2 = (Antrieb2 - Gravitation23 - Luftreibung2 - seilzug23) * (h ^ 2 / 2)

vrel3 = .95 * SQR(2 * p23 / rho23) - (ypunkt + ky2 / h)
Antrieb3r = c1 * cw * rho23 * adeckel * vrel3 ^ 2
Luftreibung3 = c3 * (ypunkt + ky2 / h) ^ 2
IF ypunkt < 0 THEN LET Luftreibung3 = -Luftreibung3
Antrieb3 = Antrieb23d * faktor23d + Antrieb3r * faktor23r
ky3 = (Antrieb3 - Gravitation23 - Luftreibung3 - seilzug23) * (h ^ 2 / 2)

```

```

REM *** Vierte Näherung ***
p4 = pred * EXP(-.5 * (ABS((t + h) - 1.5 * hwb) / B) ^ 2) * 1000001
IF form$ = "r" THEN aoef4 = SQR(4 * pi * ae / aem) * ((y + ypunkt * h + ky3) - drrd)
IF form$ = "e" THEN aoef4 = (2 * ased + 2 * ae / (ased * aem)) * ((y + ypunkt * h + ky3) - dred)
IF aoef4 >= ae / aem THEN LET aoef4 = ae / aem
IF aoef4 < 0 THEN LET aoef4 = 0
mpunkt4 = .95 * SQR(2 * p4 * rho) * aoef4 * aem
rho4 = rho - (mpunkt4 * h) / v
vrel4 = .95 * SQR(2 * p4 / rho4) - (ypunkt + 2 * ky3 / h)
Antrieb4d = (p4 * ae / aem) / m
Antrieb4r = c1 * cw * rho4 * adeckel * vrel4 ^ 2
Gravitation4 = c2
Luftreibung4 = c3 * ypunkt ^ 2
IF ypunkt < 0 THEN LET Luftreibung4 = -Luftreibung4
IF (y + ypunkt * h + ky3) >= seillaenge THEN LET seilzug4 = (sz * E * seilflaeche)
/ (m * seillaenge) * ((y + ypunkt * h + ky3) - seillaenge) ELSE seilzug4 = 0
faktor4d = 1 / (1 + EXP(-((y + ypunkt * h + ky3) - .2) / -.06))
faktor4r = 1 / (1 + EXP(-((y + ypunkt * h + ky3) - .3) / .09)) - 1
/ (1 + EXP(-((y + ypunkt * h + ky3) - 2) / .3))
Antrieb4 = Antrieb4d * faktor4d + Antrieb4r * faktor4r
ky4 = (Antrieb4 - Gravitation4 - Luftreibung4 - seilzug4) * (h ^ 2 / 2)

weiterdeckel: '
ky = (1 / 3) * (ky1 + ky2 + ky3)
kypunkt = (1 / 6) * (ky1 + 2 * ky2 + 2 * ky3 + ky4)
ypunkt = ypunkt + 2 * kypunkt / h
y = y + ypunkt * h + ky
mpunkt = (mpunkt1 + mpunkt23 + mpunkt4) / 3
rho = rho - (mpunkt * h) / v
weg(n) = y
geschwindigkeit(n) = ypunkt

IF n = 0 THEN GOTO hoehenkontrolle
IF hoehenkontrollzahl = 1 THEN GOTO hoehenkontrolle
IF weg(n) < weg(n - 1) THEN
hoehenkontrollzahl = 1
wegmax = CLNG(weg(n - 1) * 10 + .5) / 10
seildehnung = weg(n - 1) - seillaenge
relativdehnung = seildehnung / seillaenge * 100
END IF
hoehenkontrolle: '
IF n > 0 THEN
IF y >= seillaenge THEN GOTO massekonstant
m = m + sz * seilflaeche * (weg(n) - weg(n - 1)) * rhoseil
massekonstant: '
END IF

IF y > seillaenge THEN
LET seilkraft(n) = E * seilflaeche / seillaenge * (y - seillaenge)
IF hoehenkontrollzahl = 1 THEN GOTO zweitesmaximum
IF seilkraft(n) >= seilkraft(n - 1) THEN
LET kraftmax = CLNG(seilkraft(n) / 100000 + .5) * 100
LET kraftmaximal = CLNG(seilkraft(n))
END IF
END IF

zweitesmaximum: '
IF n > 0 THEN
IF weg(n) < weg(n - 1) THEN
ende = n

```



```

zeitende = (z + ende) * h
zeitende = CLNG((zeitende + .005) * 100) * 10
IF kontrollzahl >= 300 THEN GOTO grafikdeckel
kontrollzahl = kontrollzahl + 1
END IF
END IF

zuwachs = (n + kontrollzahl) / (n + 300) * 600
LINE (200, 300)-(200 + zuwachs, 600), 14, BF
COLOR 11: LOCATE 23, 33: PRINT CLNG(zuwachs / 6); "%"; " KOMPLETT!"

n = n + 1
LOOP

grafikdeckel: '
CLS 0
REM * Zeitachse *
COLOR 11
LOCATE 30, 36: PRINT "Millisekunden"
LOCATE 30, 9: PRINT "0": LOCATE 30, 74: PRINT zeitende - zeitanfang
COLOR 12: LOCATE 30, 3: PRINT "0": COLOR 10: LOCATE 30, 80: PRINT "0":

REM * Wegachse *
COLOR 10
IF wegmax > 4 THEN
LET wegmax = 5
GOTO wegachsemaximum
END IF
IF wegmax > 3 THEN
LET wegmax = 4
GOTO wegachsemaximum
END IF
IF wegmax > 2 THEN
LET wegmax = 3
GOTO wegachsemaximum
END IF
IF wegmax > 1 THEN
LET wegmax = 2
GOTO wegachsemaximum
END IF
IF wegmax > .5 THEN LET wegmax = 1
IF wegmax < .5 THEN LET wegmax = .5
wegachsemaximum: '
LOCATE 3, 38: PRINT "Deckelsteighöhe"
LOCATE 13, 80: PRINT "M": LOCATE 15, 80: PRINT "e": LOCATE 17, 80: PRINT "t":
LOCATE 19, 80: PRINT "e": LOCATE 21, 80: PRINT "r"
LOCATE 4, 78: PRINT wegmax

REM * Kraftachse *
COLOR 12
LOCATE 3, 60: PRINT "Kraft pro Seil"
LOCATE 12, 3: PRINT "K": LOCATE 13, 3: PRINT "I": LOCATE 14, 3: PRINT "I":
LOCATE 15, 3: PRINT "o": LOCATE 16, 3: PRINT "N": LOCATE 17, 3: PRINT "e"
LOCATE 18, 3: PRINT "w": LOCATE 19, 3: PRINT "t": LOCATE 20, 3: PRINT "o"
LOCATE 21, 3: PRINT "n": LOCATE 4, 1: PRINT kraftmax

REM * Druckachse *
COLOR 14
IF predmax > 1 THEN LET predmax = 2
IF predmax <= 1 THEN LET druckmax = 1

```

```

IF predmax < .5 THEN LET druckmax = .5
IF predmax > 1 THEN LET druckmax = 2
LOCATE 3, 11: PRINT "Überdruck im Behälter"
LOCATE 15, 6: PRINT "B": LOCATE 17, 6: PRINT "a": LOCATE 19, 6: PRINT "r":
LOCATE 30, 6: PRINT "0"
IF predmax <= .5 THEN
LOCATE 3, 6
PRINT USING "#.#"; druckmax
END IF
IF predmax > .5 THEN
LOCATE 3, 5
PRINT druckmax
END IF

VIEW (65, 55)-(610, 458), 8, 15
WINDOW (zeitanfang, 0)-(zeitende, 100)
FOR vg = zeitanfang + 10 TO zeitende - 10 STEP 10
LINE (vg, 0)-(vg, 100), 15, , &HCCCC
NEXT vg
FOR vg = zeitanfang + 5 TO zeitende - 5 STEP 5
LINE (vg, 0)-(vg, 100), 7, , &H8888
NEXT vg
FOR hg = 10 TO 90 STEP 10
LINE (zeitanfang, hg)-(zeitende, hg), 15, , &HCCCC
NEXT hg
FOR hg = 5 TO 95 STEP 10
LINE (zeitanfang, hg)-(zeitende, hg), 7, , &H8888
NEXT hg

FOR n = 1 TO ende
p = pred * EXP(-.5 * (ABS((n + z) * h - 1.5 * hwb) / B) ^ 2)
PSET ((z + n) * h * 1000, weg(n) * 100 / wegmax), 10
PSET ((z + n) * h * 1000, p * 100 / druckmax), 14
PSET ((z + n) * h * 1000, seilkraft(n) / (10 * kraftmax)), 12
LINE ((z + n) * h * 1000, seilkraft(n) / (10 * kraftmax))-((z + n - 1) * h * 1000,
seilkraft(n - 1) / (10 * kraftmax)), 12
NEXT n
COLOR 13: LOCATE 1, 11: PRINT "Maximalkraft auf Halteseil ="; kraftmaximal; "N"
COLOR 15: LOCATE 1, 60: PRINT "weiter mit ←┘"
d3$ = INPUT$(1)
CLS 0

REM * Flugvorbereitung *
SCREEN 9
COLOR 10, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
LOCATE 10, 12: PRINT "IST IHNEN DIE MAXIMALE BELASTBARKEIT EINES HALTESEILES"
LOCATE 12, 12: PRINT "BEKANNT (j/n)?"
COLOR 14, 8: LOCATE 12, 27: INPUT "", deckelfrage$
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15

IF deckelfrage$ = "n" AND relativdehnung < 10 THEN
CLS 0
COLOR 10, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B

```

```

PAINT (1, 1), 15
LOCATE 4, 10: PRINT "GEMÄSS DER DURCHGEFÜHRTEN BERECHNUNG DEHNEN SICH DIE DECKEL-"
LOCATE 6, 10: PRINT "FANGSEILE BEIM DECKELABFANGVORGANG UM WENIGER ALS 10 % IHRER"
LOCATE 8, 10: PRINT "GESAMTLÄNGE. DESHALB WERDEN DIE FANGSEILE ALLER VORAUSSICHT"
LOCATE 10, 10: PRINT "NACH DER AUFTRETENDEN BELASTUNG GEWACHSEN SEIN."
SLEEP 5
COLOR 12
LOCATE 13, 10: PRINT "DIESES PROGRAMM IST DAZU IN DER LAGE, AUF DER BASIS DER BISHER"
LOCATE 15, 10: PRINT "BEKANNTEN DATEN DIE MAXIMAL ERREICHBARE FLUGWEITE DES ENTLAST-"
LOCATE 17, 10: PRINT "UNGSDECKELS (WORST-CASE-BETRACHTUNG) FÜR DEN FALL EINES DECKEL-"
LOCATE 19, 10: PRINT "ABRISSES ZU ERRECHNEN."
SLEEP 5: COLOR 14
LOCATE 22, 10: PRINT "SOLL EINE FLUGWEITENBERECHNUNG DURCHGEFÜHRT WERDEN (j/n)?"
COLOR 14, 8: LOCATE 22, 68: INPUT "", fb$
IF fb$ = "n" THEN GOTO deckelzurueckhauptmodul
IF fb$ = "j" THEN

maximalreichweitedeckel: '
n = 0
DO UNTIL weg(n) >= seillaenge
sv = geschwindigkeit(n)
so = 0
sw = 45
n = n + 1
LOOP
END IF
GOTO deckelzurueckhauptmodul
END IF

IF deckelfrage$ = "j" THEN
COLOR 12, 8
LOCATE 16, 12: PRINT "GEBEN SIE DEN BETRAG DIESER MAXIMALKRAFT EIN (N):"
COLOR 14, 8: LOCATE 16, 62: INPUT "", seilbelastbarkeit
END IF

IF seilbelastbarkeit - kraftmaximal > 5000 THEN
CLS 0
COLOR 11, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 10, 8
LOCATE 9, 15: PRINT "ALLER VORAUSSICHT NACH WIRD DIE KONSTRUKTION IHRES"
LOCATE 11, 15: PRINT "ENTLASTUNGSDECKELS DEN ZU ERWARTENDEN BELASTUNGEN"
LOCATE 13, 15: PRINT "STANDHALTEN KÖNNEN. DIE GEFAHR EINES DECKELAB-"
LOCATE 15, 15: PRINT "RISSES BESTEHT DEMNACH NICHT!"
SLEEP 3
LOCATE 18, 15: PRINT "WEITER MIT DER TASTE ← ..."
d4$ = INPUT$(1)
fb$ = "n"
GOTO deckelzurueckhauptmodul
END IF

IF deckelfrage$ = "n" AND relativdehnung > 10 THEN
CLS 0
COLOR 11, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15: COLOR 14, 8

```

```

LOCATE 5, 10: PRINT "GEMÄSS DER DURCHGEFÜHRTEN BERECHNUNG DEHNEN SICH DIE DECKEL-"
LOCATE 7, 10: PRINT "FANGSEILE NEIM DECKELABFANGVORGANG UM MEHR ALS 10 % IHRER"
LOCATE 9, 10: PRINT "GESAMTLÄNGE!"
riss$ = "j"
GOTO alarm
END IF
IF seilbelastbarkeit - kraftmaximal < 5000 THEN
CLS 0
COLOR 11, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 14, 8
LOCATE 5, 10: PRINT "DIE ERECHNETE MAXIMALE KRAFT AUF EIN DECKELHALTESEIL LIEGT"
LOCATE 7, 10: PRINT "IN DER GLEICHEN GRÖSSENORDNUNG WIE DIE VON IHNEN EINGEGEBENE"
LOCATE 9, 10: PRINT "MAXIMALE BELASTBARKEIT EINES HALTESEILES ODER GAR DARÜBER."
alarm: '
SLEEP 5
alarm = 12
DO UNTIL tut = 3
IF alarm = 13 THEN LET alarm = 11
COLOR alarm
LOCATE 12, 10: PRINT "ES BESTEHT DESHALB DIE GEFAHR DES DECKELABRISSES!!!"
SOUND 1000, 5
SLEEP 1
alarm = alarm + 1
tut = tut + 1
LOOP
SLEEP 1
COLOR 10, 8
LOCATE 15, 10: PRINT "DIESES PROGRAMM IST DAZU IN DER LAGE, DIE MAXIMAL ERREICH-"
LOCATE 17, 10: PRINT "BARE FLUGWEITE DES ENTLASTUNGSDECKEL (WORST-CASE-BETRACHTUNG)"
LOCATE 19, 10: PRINT "FÜR DEN FALL EINES DECKELABRISSES ZU ERRECHNEN."
SLEEP 5
COLOR 11, 8
LOCATE 22, 10: PRINT "SOLL EINE FLUGWEITENBERECHNUNG DURCHGEFÜHRT WERDEN (j/n)?"
COLOR 14, 8: LOCATE 22, 68: INPUT "", fb$
IF fb$ = "n" THEN GOTO deckelzurueckhauptmodul
IF fb$ = "j" THEN
IF riss$ = "j" THEN GOTO maximalreichweitedeckel
n = 0
so = 0
sw = 45
DO UNTIL seilkraft(n) >= seilbelastbarkeit
IF seilbelastbarkeit - kraftmaximal > 0
AND seilbelastbarkeit - kraftmaximal < 5000 THEN GOTO maximalreichweitedeckel
sv = geschwindigkeit(n)
n = n + 1
LOOP
END IF
END IF

deckelzurueckhauptmodul: '
CLS 0
END SUB

```

```

DEFDBL A-Z
REM *** ROUTINE ECKIGERDECKEL VON MODUL DECKEL ***
SUB EckigerDeckel (v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$,
med, aed, bed, dred, smed, sled, ssed, saed, eed, qed, ased, ef, fged)

REM * Einführungstext *
CLS
COLOR 15, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 14, 8
LOCATE 5, 14: PRINT "IM FOLGENDEN WERDEN SIE EINE SKIZZE DER SEITENANSICHT"
LOCATE 7, 14: PRINT "EINES ENTLASTUNGSDECKELS SEHEN. MESSEN UND NOTIEREN"
LOCATE 9, 14: PRINT "SIE SICH DIE MIT PFEILEN GEKENNZEICHNETEN ABMESSUNGEN"
LOCATE 11, 14: PRINT "DER DECKELSEITEN DA UND DB, DES DECKELRANDES DR, DER"
LOCATE 13, 14: PRINT "SEITENLÄNGE AS DER ENTLASTUNGSÖFFNUNG, DER SEILLÄNGE"
LOCATE 15, 14: PRINT "SL UND DER SEILSTÄRKE SS. MESSEN SIE AUCH DIE DECKEL-"
LOCATE 17, 14: PRINT "UND SEILMASSE! SIE WERDEN IN DER NÄCHSTEN EINGABE-"
LOCATE 19, 14: PRINT "TAFEL ZUR EINGABE DIESER DATEN AUFGEFORDERT!"
LOCATE 21, 14: PRINT "WEITER STETS MIT DER TASTE ← ..."

ed1$ = INPUT$(1)

REM * Grafik *
CLS
SCREEN 9
COLOR 15, 0
PRINT "      SKIZZE DER SEITENANSICHT EINES RECHTECKIGEN DRUCKENTLASTUNGSDECKELS"
LINE (154, 270)-(457, 330), , B
LINE (153, 269)-(458, 331), , B
LINE (150, 100)-(458, 103), , B: PAINT (151, 102)
LINE (147, 100)-(152, 110), , B: PAINT (148, 105)
LINE (459, 100)-(464, 110), , B: PAINT (461, 105)
CIRCLE (149, 115), 5: CIRCLE (149, 115), 3
PAINT (153, 115): PAINT (145, 115): PAINT (148, 112): PAINT (146, 117)
CIRCLE (462, 115), 5: CIRCLE (462, 115), 3
PAINT (466, 115): PAINT (458, 115): PAINT (461, 112): PAINT (461, 118)
CIRCLE (149, 285), 5: CIRCLE (149, 285), 3
PAINT (153, 285): PAINT (145, 285): PAINT (149, 282): PAINT (146, 287)
CIRCLE (462, 285), 5: CIRCLE (462, 285), 3
PAINT (466, 285): PAINT (458, 285): PAINT (461, 282): PAINT (461, 288)
LINE (461, 284)-(463, 116), , B: PAINT (462, 200)
LINE (148, 284)-(150, 116), , B: PAINT (149, 200)

REM * Begrenzungen *
LINE (461, 284)-(520, 284), , , &HCCCC
LINE (461, 116)-(520, 116), , , &HCCCC
LINE (100, 111)-(148, 111), , , &HCCCC
LINE (100, 103)-(148, 103), , , &HCCCC
LINE (147, 50)-(147, 100), , , &HCCCC
LINE (464, 50)-(464, 100), , , &HCCCC

REM * Deckeldurchmesser *
COLOR 11, 0
LINE (147, 85)-(464, 85)
LINE (147, 85)-(154, 82): LINE (147, 85)-(154, 88): LINE (154, 82)-(154, 88)
PAINT (152, 84): PAINT (152, 86)
LINE (464, 85)-(457, 82): LINE (464, 85)-(457, 88): LINE (457, 82)-(457, 88)
PAINT (458, 84): PAINT (458, 86)

```

```

REM * Seilabmessung *
COLOR 10, 0
LINE (480, 116)-(480, 284)
LINE (480, 116)-(485, 121): LINE (480, 116)-(475, 121): LINE (485, 121)-(475, 121)
PAINT (482, 119): PAINT (478, 119)
LINE (480, 284)-(485, 279): LINE (480, 284)-(475, 279): LINE (485, 279)-(475, 279)
PAINT (482, 281): PAINT (478, 281)

REM * Abmessung des Deckelrandes *
COLOR 12, 0
LINE (125, 111)-(125, 103)
LINE (125, 111)-(129, 108): LINE (125, 111)-(121, 108): LINE (129, 108)-(121, 108)
PAINT (124, 109): PAINT (126, 109)
LINE (125, 103)-(129, 106): LINE (125, 103)-(121, 106): LINE (129, 106)-(121, 106)
PAINT (124, 105): PAINT (126, 105)

REM * Seildurchmesser *
COLOR 14, 0
LINE (110, 189)-(147, 189): LINE (151, 189)-(188, 189)
LINE (147, 189)-(140, 192): LINE (147, 189)-(140, 186): LINE (140, 192)-(140, 186)
PAINT (142, 190): PAINT (142, 188)
LINE (151, 189)-(158, 192): LINE (151, 189)-(158, 186): LINE (158, 192)-(158, 186)
PAINT (154, 190): PAINT (154, 188)

REM * Öffnung *
COLOR 13, 0
LINE (155, 280)-(456, 280)
LINE (155, 280)-(162, 283): LINE (155, 280)-(162, 277): LINE (162, 283)-(162, 277)
PAINT (158, 281): PAINT (158, 279)
LINE (456, 280)-(449, 283): LINE (456, 280)-(449, 277): LINE (449, 283)-(449, 277)
PAINT (451, 281): PAINT (451, 279)

REM * Beschriftung *
COLOR 11, 0: LOCATE 6, 30: PRINT "Deckelseitelänge DA"
COLOR 12, 0: LOCATE 10, 5: PRINT "Deckelrand DR"
COLOR 13, 0: LOCATE 22, 21: PRINT "Seitelänge AS der Entlastungsöffnung"
COLOR 14, 0: LOCATE 14, 27: PRINT "Seilstärke SS"
COLOR 10, 0: LOCATE 15, 63: PRINT "Seillänge SL"

COLOR 15, 0
ed2$ = INPUT$(1)
CLS

REM * Eingabetafel: Maße eines rechteckigen Druckentlastungsdeckels *
LINE (150, 7)-(472, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 24: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL DREI: DECKELDATEN "
LOCATE 6, 10: COLOR 12: PRINT "DECKELMASSE (kg) ="
LOCATE 6, 43: PRINT "DECKELSEITE DA (m) ="
LOCATE 9, 10: PRINT "DECKELSEITE DB (m) ="
LOCATE 9, 43: PRINT "DECKELRAND DR (m) ="
LOCATE 12, 10: PRINT "MASSE PRO SEIL (kg) ="
LOCATE 12, 43: PRINT "SEILLÄNGE SL (m) ="
LOCATE 15, 10: PRINT "SEILSTÄRKE SS (m) ="
LOCATE 15, 43: PRINT "SEILANZAHL ="
LOCATE 18, 10: PRINT "ÖFFNUNGSSEITE AS (m) ="

```

```

LOCATE 18, 43: COLOR 10: PRINT "ELASTIZITÄTSMODUL (N/m^2) ="
COLOR 14
LOCATE 6, 29: INPUT "", med: LOCATE 6, 64: INPUT "", aed
LOCATE 9, 31: INPUT "", bed: LOCATE 9, 63: INPUT "", dred
LOCATE 12, 32: INPUT "", smed: LOCATE 12, 62: INPUT "", sled
LOCATE 15, 30: INPUT "", ssed: LOCATE 15, 56: INPUT "", saed
LOCATE 18, 33: INPUT "", ased: LOCATE 18, 71: INPUT "", eed
IF eed = 0 THEN
LET eed = 1E+10
LOCATE 18, 69: COLOR 10: PRINT "=": COLOR 14
LOCATE 18, 71: PRINT USING "#^"; eed
END IF

qed = 2 / 3 * med * aed / (ae / aem)
fged = CLNG(med / (aed * bed) * 100) / 100
ef = CLNG((EXP(.00235# * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(qed))) ^ (-(4 / 7)) * 100)

LOCATE 21, 25
PRINT "MIT DIESEN DATEN ERGIBT SICH:"
LOCATE 23, 45: PRINT USING "ENTLASTUNGSFÄHIGKEIT ≈ ###"; ef: LOCATE 23, 72: PRINT "%
LOCATE 23, 10
PRINT USING "FLÄCHENGEWICHT = ###.###"; fged: LOCATE 23, 34: PRINT "kg/m"

ed3$ = INPUT$(1)
CLS

END SUB

```

```

REM *** ROUTINE RUNDERDECKEL VON MODUL DECKEL ***
SUB RunderDeckel (v, kst, konzentration, ae, aem, pmax, pstat, form$, typ$,
mrd, drd, drrd, smrd, slrd, ssrd, sard, erd, qrd, ef, fgrd)

REM * Einführungstext *
CLS
COLOR 15, 8
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR 14, 8
LOCATE 6, 14: PRINT "IM FOLGENDEN WERDEN SIE EINE SKIZZE DER SEITENANSICHT"
LOCATE 8, 14: PRINT "EINES ENTLASTUNGSDECKELS SEHEN. MESSEN UND NOTIEREN"
LOCATE 10, 14: PRINT "SIE SICH DIE MIT PFEILEN GEKENNZEICHNETEN ABMESSUNGEN"
LOCATE 12, 14: PRINT "DES DECKELDURCHMESSERS DD, DES DECKELRANDES DR, DER"
LOCATE 14, 14: PRINT "SEILLÄNGE SL UND DER SEILSTÄRKE SS! MESSEN SIE AUCH"
LOCATE 16, 14: PRINT "DIE DECKEL- UND SEILMASSE! SIE WERDEN IN DER FOLGENDEN"
LOCATE 18, 14: PRINT "EINGABETAFEL ZUR EINGABE DIESER DATEN AUFGEFORDERT."
LOCATE 20, 14: PRINT "WEITER STETS MIT DER TASTE ← ..."

rd1$ = INPUT$(1)

REM * Grafik *
CLS
SCREEN 9
COLOR 15, 0
PRINT "          SKIZZE DER SEITENANSICHT EINES RUNDEN DRUCKENTLASTUNGSDECKELS"
LINE (154, 270)-(457, 330), , B
LINE (153, 269)-(458, 331), , B
LINE (150, 100)-(458, 103), , B: PAINT (151, 102)
LINE (147, 100)-(152, 110), , B: PAINT (148, 105)
LINE (459, 100)-(464, 110), , B: PAINT (461, 105)
CIRCLE (149, 115), 5: CIRCLE (149, 115), 3
PAINT (153, 115): PAINT (145, 115): PAINT (148, 112): PAINT (146, 117)
CIRCLE (462, 115), 5: CIRCLE (462, 115), 3
PAINT (466, 115): PAINT (458, 115): PAINT (461, 112): PAINT (461, 118)
CIRCLE (149, 285), 5: CIRCLE (149, 285), 3
PAINT (153, 285): PAINT (145, 285): PAINT (149, 282): PAINT (146, 287)
CIRCLE (462, 285), 5: CIRCLE (462, 285), 3
PAINT (466, 285): PAINT (458, 285): PAINT (461, 282): PAINT (461, 288)
LINE (461, 284)-(463, 116), , B: PAINT (462, 200)
LINE (148, 284)-(150, 116), , B: PAINT (149, 200)

REM * Begrenzungen *
LINE (461, 284)-(520, 284), , , &HCCCC
LINE (461, 116)-(520, 116), , , &HCCCC
LINE (100, 111)-(148, 111), , , &HCCCC
LINE (100, 103)-(148, 103), , , &HCCCC
LINE (147, 50)-(147, 100), , , &HCCCC
LINE (464, 50)-(464, 100), , , &HCCCC

REM * Deckeldurchmesser *
COLOR 11, 0
LINE (147, 85)-(464, 85)
LINE (147, 85)-(154, 82): LINE (147, 85)-(154, 88): LINE (154, 82)-(154, 88)
PAINT (152, 84): PAINT (152, 86)
LINE (464, 85)-(457, 82): LINE (464, 85)-(457, 88): LINE (457, 82)-(457, 88)
PAINT (458, 84): PAINT (458, 86)

```



```

REM * Seilabmessung *
COLOR 10, 0
LINE (480, 116)-(480, 284)
LINE (480, 116)-(485, 121): LINE (480, 116)-(475, 121): LINE (485, 121)-(475, 121)
PAINT (482, 119): PAINT (478, 119)
LINE (480, 284)-(485, 279): LINE (480, 284)-(475, 279): LINE (485, 279)-(475, 279)
PAINT (482, 281) : PAINT (478, 281)

REM * Abmessung des Deckelrandes *
COLOR 12, 0
LINE (125, 111)-(125, 103)
LINE (125, 111)-(129, 108): LINE (125, 111)-(121, 108): LINE (129, 108)-(121, 108)
PAINT (124, 109): PAINT (126, 109)
LINE (125, 103)-(129, 106): LINE (125, 103)-(121, 106): LINE (129, 106)-(121, 106)
PAINT (124, 105): PAINT (126, 105)

REM * Seildurchmesser *
COLOR 14, 0
LINE (110, 189)-(147, 189): LINE (151, 189)-(188, 189)
LINE (147, 189)-(140, 192): LINE (147, 189)-(140, 186): LINE (140, 192)-(140, 186)
PAINT (142, 190): PAINT (142, 188)
LINE (151, 189)-(158, 192): LINE (151, 189)-(158, 186): LINE (158, 192)-(158, 186)
PAINT (154, 190) : PAINT (154, 188)

REM * Öffnung *
COLOR 13, 0
LINE (155, 280)-(456, 280)
LINE (155, 280)-(162, 283): LINE (155, 280)-(162, 277): LINE (162, 283)-(162, 277)
PAINT (158, 281): PAINT (158, 279)
LINE (456, 280)-(449, 283): LINE (456, 280)-(449, 277): LINE (449, 283)-(449, 277)
PAINT (451, 281): PAINT (451, 279)

REM * Beschriftung *
COLOR 11, 0: LOCATE 6, 30: PRINT "Deckeldurchmesser DD"
COLOR 12, 0: LOCATE 10, 5: PRINT "Deckelrand DR"
COLOR 13, 0: LOCATE 22, 21: PRINT "Durchmesser DS der Entlastungsöffnung"
COLOR 14, 0: LOCATE 14, 27: PRINT "Seilstärke SS"
COLOR 10, 0: LOCATE 15, 63: PRINT "Seillänge SL"

COLOR 15, 0
rd2$ = INPUT$(1)
CLS

REM * Eingabetafel: Maße einer runden Entlastungsklappe *
LINE (150, 7)-(472, 34), 15, BF
LINE (0, 0)-(639, 349), 15, B
LINE (3, 2)-(636, 347), 15, B
PAINT (1, 1), 15
COLOR , 8
LOCATE 2, 24: COLOR 14: PRINT " EINGABETAFEL DREI: DECKELDATEN "
LOCATE 7, 9: COLOR 12: PRINT "DECKELMASSE (kg) ="
LOCATE 7, 43: PRINT "DECKELDURCHMESSER DD (m) ="
LOCATE 10, 9: PRINT "DECKELRAND DR (m) ="
LOCATE 10, 43: PRINT "MASSE PRO SEIL (kg) ="
LOCATE 13, 9: PRINT "SEILLÄNGE SL (m) ="
LOCATE 13, 43: PRINT "SEILSTÄRKE SS (m) ="
LOCATE 16, 9: PRINT "SEILANZAHL ="
LOCATE 16, 43: COLOR 10: PRINT "ELASTIZITÄTSMODUL (N/m^2) ="

```

```

COLOR 14
LOCATE 7, 28: INPUT "", mrd: LOCATE 7, 70: INPUT "", drd
LOCATE 10, 29: INPUT "", drrd
LOCATE 10, 65: INPUT "", smrd
LOCATE 13, 28: INPUT "", slrd: LOCATE 13, 63: INPUT "", ssrd
LOCATE 16, 22: INPUT "", sard: LOCATE 16, 71: INPUT "", erd
IF erd = 0 THEN
LET erd = 1E+10
LOCATE 16, 69: COLOR 10: PRINT "=: COLOR 14
LOCATE 16, 71: PRINT USING "#^^^^"; erd
ELSE
LOCATE 16, 71: PRINT USING "#^^^^"; eed
END IF

qrd = 5 / 8 * mrd * drd / (ae / aem)
fgrd = mrd / (3.14159 * (drd / 2) ^ 2)
ef = CLNG((EXP(.00235# * kst / v ^ (3 / 5) * SQR(qrd))) ^ (-(4 / 7)) * 100)

LOCATE 19, 25
PRINT "MIT DIESEN DATEN ERGIBT SICH:"
LOCATE 22, 46: PRINT USING "ENTLASTUNGSFÄHIGKEIT ≈ ###"; ef: LOCATE 22, 73: PRINT "%
LOCATE 22, 9
PRINT USING "FLÄCHENGEWICHT = ###.###"; fgrd: LOCATE 22, 33: PRINT "kg/m"

rd3$ = INPUT$(1)
CLS

END SUB

```

Literaturverzeichnis

- [1] M. SEITHEL: *Deckelabsprengung am liegenden und stehenden 1 m³-Behälter mit unterschiedlichen Deckelmassen*; Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 1993.
- [2] F. KOSSEBAU: *9 m³-Behälter: Erforderliche Zündverzögerungszeiten für ungetrocknete Maisstärke zur Anpassung an die Gleichung zur Berechnung von Druckentlastungsflächen in der Richtlinie VDI 3673*; Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1993.
- [3] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 0,5*; Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1994.
- [4] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 1*; Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1993.
- [5] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 1,5*; Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1993.
- [6] F. KOSSEBAU: *Private Mitteilung*
- [7] R. SIWEK; O. SKOV: *Modellberechnung zur Dimensionierung von Explosionsklappen auf der Basis von praxisnahen Explosionsversuchen*; VDI Berichte Nr. 701, 1988.
- [8] A. HARMANNY: *Einfluss der Massenträgheitskräfte auf die Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen*; VDI Berichte Nr. 975, 1992.
- [9] VDI 3673: *Druckentlastung von Staubexplosionen*; 1992.
- [10] W. GREINER: *Mechanik, Teil 1*; Verlag Harry Deutsch, 6. Auflage, 1993.
- [11] W. GREINER: *Mechanik, Teil 2*; Verlag Harry Deutsch, 5. Auflage, 1989.
- [12] W. WALCHER: *Praktikum der Physik*; Teubner Studienbücher, 4. Auflage, 1979.
- [13] R. ZURMÜHL: *Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker*; Springer Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 5. Auflage, 1965.
- [14] I. N. BRONSTEIN; K. A. SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*; Verlag Harry Deutsch
- [15] M. FABER: *Private Mitteilung*