

Am Markt orientierte
Weiterentwicklung
von ExProtect

G-05-9802

Projekt Nr. G-05-9802

Am Markt orientierte Weiterentwicklung von ExProtect

Dirk Lorenz
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten
Bereich Prävention, Zentrallabor

Hermann Schiebler
Diplom-Physiker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten
Bereich Prävention, Zentrallabor

Mannheim, August 2005

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Einleitung	2
1 Mathematische Methoden hinter ExProtect	5
1.1 SIMEK	5
1.2 STS	9
1.3 Vent	11
1.4 Vessel	12
1.5 ExTools	12
2 Die Anwendung von ExProtect	13
2.1 SIMEK	14
2.2 STS	21
2.3 Vent	22
2.4 Vessel	24
2.5 ExTools	24
Literaturverzeichnis	25

Liste der Symbole

a	Variable oder Koeffizient
a_s	Seitenlänge eines Trümmerfragments
A_E	Entlastungsfläche
A_S	Innere Oberfläche eines Raumes oder Querschnittsfläche eines Drahtseiles
A_x	Kleinste Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
A_y	Größte Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
b	Variable oder Koeffizient
b_s	Seitenlänge eines Trümmerfragments
c	Variable oder Koeffizient
C	Koeffizient
c_s	Wandstärke eines Behälters bzw. Seitenlänge eines Trümmerfragments
c_v	Spezifische Wärmekapazität (der Luft)
c_w	Reibungskoeffizient bei der Newton-Reibung
c_x	Reibungskoeffizient der kleinsten Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
c_y	Reibungskoeffizient der größten Querschnittsfläche eines flachen Körpers mit zwei Symmetrieachsen
\vec{e}_3	Einheitsvektor in Richtung der Vertikalen
E	Elastizitätsmodul
F_D	Kraftbelastung der Fangseile eines Entlastungsdeckels
F_K	Kraftbelastung der Scharniere oder Seile einer Entlastungsklappe
F_{Ex}	Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe bzw. eines Entlastungsdeckels aufgrund der Explosionswirkung
F_{Gr}	Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe bzw. des Entlastungsdeckels aufgrund der Gravitation
F_{LR}	Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe bzw. des Entlastungsdeckels aufgrund des Luftwiderstandes
F_{SR}	Kraft auf den Schwerpunkt einer Entlastungsklappe aufgrund der Scharnierreibung
g	Beschleunigung des Erdgravitationsfeldes
h	Länge eines Hebels oder Starthöhe eines Trümmerfragments
K_{St}	Staubspezifische Kenngröße zur Charakterisierung des maximalen Druckanstieges bei einer Staubexplosion in einem geschlossenen, kubischen Behälter
l	Seillänge oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
Δl	Seildehnung beim Abfangen von Entlastungsdeckeln
m	Masse
n	Anzahl der Fangseile an einem Entlastungsdeckel

\hat{N}	Tensor zur Beschreibung von Querschnittsflächen und Reibungskoeffizienten in Richtung der Koordinatenachsen bei einem frei fliegenden Körper
p	Druck
p_0	Normdruck
p_b	Berstdruck eines Behälters
p_{bem}	Bemessungsdruck für die Druckentlastung von Räumen
p_{max}	Maximaler Überdruck einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter
p_{stat}	Statischer Ansprechdruck einer Druckentlastungseinrichtung
$p_{red,max}$	Maximaler Überdruck einer entlasteten Staubexplosion bei optimalem Staub/Luft-Gemisch
$\left. \frac{dp}{dt} \right _{red,max}$	Maximaler zeitlicher Druckanstieg einer Staubexplosion bei optimalem Staub/Luft-Gemisch
Q	Widerstand einer Druckentlastungsklappe oder Abmessung an der im Versuch verwendeten Druckentlastungsklappe
\vec{r}, r	Ortsvektors und dessen Betrag
$\dot{\vec{r}}, \dot{r}$	Erste zeitliche Ableitung des Ortsvektors und dessen Betrag
$\ddot{\vec{r}}, \ddot{r}$	Zweite zeitliche Ableitung des Ortsvektors und dessen Betrag
S	Abstand zwischen Rotationsachse und Schwerpunkt bei einer Entlastungsklappe
t	Zeit
T_0	Normtemperatur
v_0	Startgeschwindigkeit eines Trümmerfragments
V	Volumen
\ddot{y}	Vertikale Komponente der Beschleunigung
α	Startwinkel eines Trümmerfragments
$\beta, \dot{\beta}$	Rotationswinkel bzw. Rotationswinkelgeschwindigkeit eines Trümmerfragments
ρ_L	Dichte der Luft
ρ_s	Dichte eines Staub/Luft-Gemisches
ρ_w	Dichte eines Trümmerfragments bzw. einer berstenden Behälterwand
$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$	Klappenöffnungswinkel, -winkelgeschwindigkeit und -winkelbeschleunigung oder Startwinkel beim Trümmerflug
Θ_K	Trägheitsmoment einer Entlastungsklappe bei am Klappenrand liegender Rotationsachse

Zusammenfassung

ExProtect ist ein erweiterbares Programm-Paket für alle Microsoft Windows-Betriebssysteme, welches aus den Programmteilen SIMEK, STS, Vent, Vessel und ExTools¹ besteht. Durch die numerische Lösung der entsprechenden Bewegungsgleichungen berechnet SIMEK den zeitlichen Kraftverlauf, der bei der Druckentlastung von Silo-Behältern über Druckentlastungsklappen oder -deckel auf deren Halterungsscharniere oder -seile wirkt. Dabei werden Zeit-Druck-Kurven verwendet, die mit Hilfe erweiterter Varianten des kubischen Gesetzes und Formeln aus der VDI-Richtlinie 3673 abgeleitet werden. SIMEK bietet anschließend die Möglichkeit, Scharniere oder Stahlseile der auftretenden Belastung anzupassen. Im Fall zu schwacher Verankerungen der Entlastungselemente (Abriss) können die Flugbahnen dieser Elemente berechnet werden. Außerdem wird die Entlastungsfähigkeit des Entlastungselementes, der auftretende reduzierte Überdruck und die reduzierte Druckanstiegsgeschwindigkeit abgeschätzt. STS berechnet die wahrscheinlichste und die maximal mögliche Flugweite von Trümmern, wenn große Teile von Gebäuden oder Behältern durch die Wirkung von Staubexplosionen in deren Inneren zerstört werden. Dabei wird die Anfangsgeschwindigkeit der Trümmer mit Hilfe der Gleichungen von Gurney bestimmt und die Flugbahn numerisch berechnet. Berechnete und experimentell bestimmte Flugweiten stimmen gut überein. Vent dient der Berechnung von Druckentlastungsflächen oder reduzierten Überdrucken bei explosionsgefährdeten Räumen und Silos. Die dabei angewandten Rechenmethoden basieren auf Formeln, die aus der einschlägigen Literatur bekannt sind. Vessel unterstützt die Dimensionierung von Druckbehältern, wobei ebenfalls auf bekannte Methoden aus der Literatur zurückgegriffen wird. Mit ExTools können diverse Berechnungen angestellt werden im Zusammenhang mit explosionstechnischen Kenngrößen.

¹ExTools ist eine Freeware, die von den Firmen Kühner AG und FireEx GmbH entwickelt wurde.

Einleitung

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 Behältnis 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 an 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 verschiedener Massen von einem 1 m^3 -Behälter bei unterschiedlichen Explosionsparametern war.

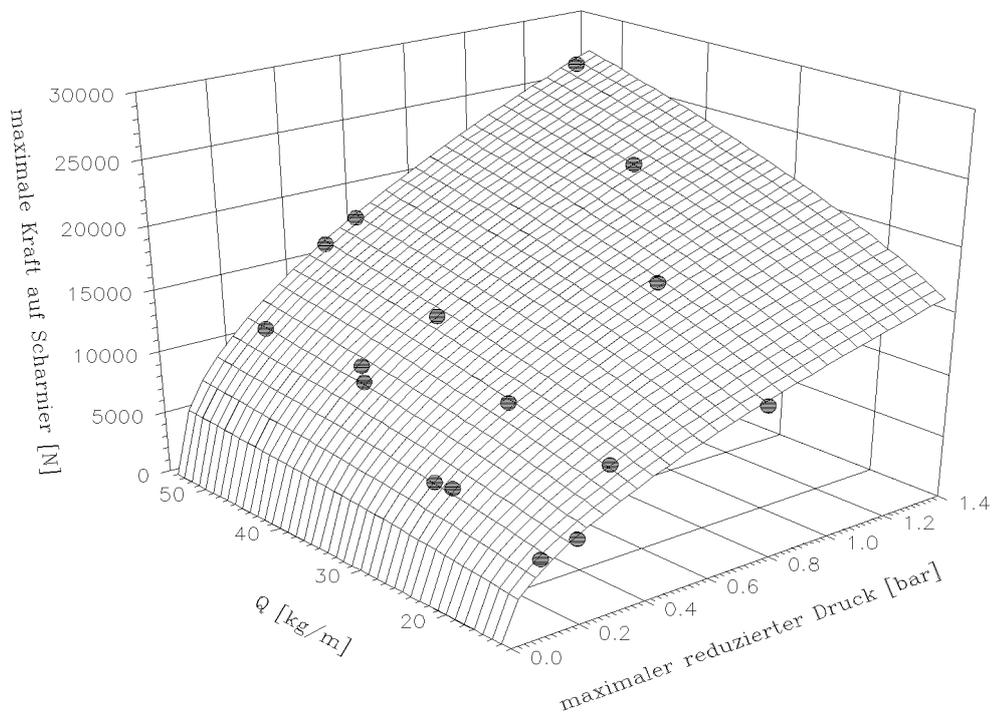


Abbildung 1: Auf das Klappenscharnier wirkende maximale Kraft in Abhängigkeit des maximalen reduzierten Überdruckes und dem Klappenwiderstand Q . Jeder eingezeichnete Punkt ist das Mittel aus drei Messungen.

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. Später wurde an dieses Projekt angeknüpft und die Fragestellung auf Entlastungsklappen erweitert. An einem 9,4 m³-Silo wurden Entlastungsklappen veränderlicher Masse der Wirkung verschieden heftiger Staubexplosionen ausgesetzt und der Öffnungswinkel der Klappen mit Hilfe eines Inkremental-Drehgebers als Funktion der Zeit aufgenommen. Daraus konnten alle interessierenden Größen abgeleitet werden. Abb. 1 zeigt als Beispiel die erhaltenen maximalen Kräfte auf das Klappenscharnier als Funktion des maximalen reduzierten Überdrucks $p_{\text{red,max}}$ und des Klappenwiderstandes Q . Das Endergebnis war eine umfangreiche Studie [2], die sich theoretisch und experimentell mit der Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln auseinandersetzt, wobei auch Messdaten aus Klappenprüfungen mit größeren Versuchsbehältern eingeflossen sind. Klappen sind dabei einseitig durch ein Scharnier, Deckel durch mehrere Seile am zu entlastenden Behälter befestigt (siehe Abb. 2). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen [1] und [2] wurden im Programm SIMEK² umgesetzt, welches dazu in der Lage ist, Befestigungen und Flächen von Druckentlastungsklappen und -deckeln für Behälter, wie sie in der VDI 3673 beschrieben werden, zu dimensionieren. Quasi als Nebenprodukt ergeben sich Näherungswerte für die Entlastungsfähigkeiten der berechneten Entlastungselemente. Darüber hinaus können die Flugweiten von abreißen den Entlastungselementen berechnet werden.

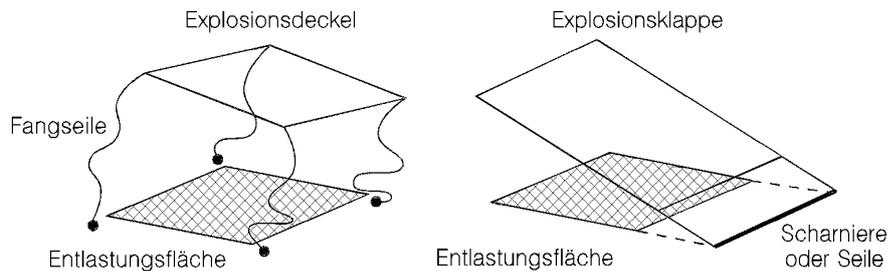


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Druckentlastungsklappe und eines -deckels.

Bei der Planung oder Begutachtung von Industrieanlagen stellt sich häufig die Frage, wie groß der Sicherheitsabstand zu benachbarten Gebäuden sein muss, damit diese bei Explosionsunglücken keinen Schaden nehmen. Ein Aspekt ist dabei die Abschätzung der Flugweiten und kinetischen Energien von Explosionstrümmern. Eine allgemein anerkannte Lösung für diese Problemstellung gibt es bisher nicht. Deshalb wurden die Erfahrungen aus [1] und [2] zusammen mit dem Know How aus [14] als Grundlage dazu benutzt, um eine entsprechende Berechnungsmethode aufzustellen. Das Ergebnis dieser Anstrengungen war das Programm STS³, welches auf der Grundlage gängiger Daten über das betrachtete Gebäude und den bekannten Staubkennzahlen die wahrscheinliche und die maximal mögliche Flugweite von Explosionstrümmern errechnen kann. Vergleiche mit Experimenten zu diesem Themenkreis [13] und die Analyse von Explosionsunglücken haben gezeigt, dass die mit STS erhaltenen Trümmerflugweiten gut bis befriedigend mit den Beobachtungen übereinstimmen [12]. Diese Aussage gilt jedoch nur für die Fälle, bei denen relativ große Bereiche der Gebäudewand zerstört bzw. fortgeschleudert werden.

²Simulationsrechnung zur Mechanik von Druckentlastungsklappen

³Simulationsrechnung zum Trümmerflug bei Staubexplosionen

Beide Programme sollten potentiellen Anwendern in einer benutzerfreundlichen Oberfläche zur Verfügung gestellt werden, weshalb eine solche Programmierung in Angriff genommen wurde. Diese Oberfläche wurde so konzipiert, dass weitere Programme ganz einfach in sie implementiert werden können. Weitere Programme kamen dann auch bald hinzu in Form von **Vent** und **Vessel**.

Vent kann sowohl zur Berechnung von Druckentlastungsflächen als auch zur Berechnung des maximalen reduzierten Überdruckes in explosionsgefährdeten Behältnissen verwendet werden. In der Regel kommen dabei massenträgheitslose Entlastungselemente zum Einsatz. In **Vent** finden diverse Formeln aus der einschlägigen Literatur Anwendung [10], [11], [22] - [24], [26].

Hinter dem Programm **Vessel** verbergen sich Formeln zur Dimensionierung von Druckbehältern, wie sie z. B. in [25] abgedruckt sind. **Vessel** ist als Tool dafür gedacht, die oft aufwendige Berechnung von Druckbehältern durch die Automatisierung der eigentlichen Rechnung zu erleichtern.

ExTools enthält zum einen Datenbanken von explosionstechnischen Kenngrößen von Gasen und Flüssigkeiten. Zum anderen sind mit diesem Programm diverse Berechnungen möglich, wie sich Änderungen der Randbedingungen – z. B. der Temperatur – auf explosionstechnische Kenngrößen auswirken. Das Programm enthält noch weitere Berechnungstools. **ExTools** ist kein Programm der FSA, sondern eine Freeware, die von den Firmen Kühner AG und FireEx GmbH entwickelt wurde.

Kapitel 1

Mathematische Methoden hinter ExProtect

1.1 SIMEK

Aus den eingegebenen Daten wie Behältervolumen V , Entlastungsfläche A_E , K_{St} -Wert, Masse des Entlastungselementes m_E etc. schätzt SIMEK zunächst den zeitlichen Druckverlauf im Behälter ab, wobei dies nach der modifizierten Gaußfunktion

$$p(t) = p_{\text{red}_{\text{max}}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|t - a|}{0,637 \cdot p_{\text{red}_{\text{max}}} \cdot \left(\frac{dp}{dt} \Big|_{\text{red}_{\text{max}}} \right)^{-1}} \right)^2 \right) \quad (1.1)$$

geschieht. Mit (1.1) lassen sich zumindest die aufsteigenden Druckflanken, und diese sind letztendlich wichtig für die Berechnung des Öffnungsvorganges des Entlastungselementes, bei druckentlasteten Behältern, in denen Staubexplosionen stattfinden, in guter Näherung beschreiben. Das zeigen umfangreiche Experimente auf unserem Versuchsgelände mit Silo-Behältern zwischen 1 m³ und 60 m³ Volumen [1], [2], [5], [6], [7]. Die Variable a in (1.1) kennzeichnet die Lage des Druckmaximums auf der Zeitachse und ist deshalb hier nicht von Bedeutung. Für $p_{\text{red}_{\text{max}}}$ ist in (1.1) einzusetzen:

$$p_{\text{red}_{\text{max}}} \approx \left[\left(3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\text{max}} \cdot K_{St} + \frac{1}{4} \cdot (p_{\text{stat}} - 0,1) \right) \cdot \frac{\sqrt[4]{V^3}}{A_E} \right]^{\frac{7}{4}} \cdot \exp \left(2,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{K_{St}}{V^{\frac{3}{5}}} \cdot \sqrt{Q} \right) \quad Q = \frac{\Theta_K}{A_E \cdot h} \quad (1.2)$$

Q ist dabei der Klappenwiderstand und setzt sich aus dem Trägheitsmoment Θ_K bezüglich der Rotationsachse der (runden oder rechteckigen) Klappe, der Klappenfläche A_E und dem wirksamen Hebel h zusammen. Wie man sieht, ist (1.2) eine Variante der Formel zur Berechnung von Druckentlastungsflächen aus der VDI Richtlinie 3673. Mit Hilfe des angehängte Exponentialfaktors ist es möglich, alle Versuchsergebnisse bezüglich des $p_{\text{red}_{\text{max}}}$ aus [1], [2], [5], [6], [7] zu beschreiben (siehe hierzu auch Abb. 1.1). Bei der Berechnung von $p_{\text{red}_{\text{max}}}$ gemäß (1.2) nimmt das V im Exponentialfaktor nie einen Wert über 60 m³ an, da dies experimentell nicht abgesichert ist. Da die Trägheit von massenbehafteten Entlastungselementen aber mit zunehmendem Behältervolumen an Einfluss verliert, sind die Berechnungsergebnisse in

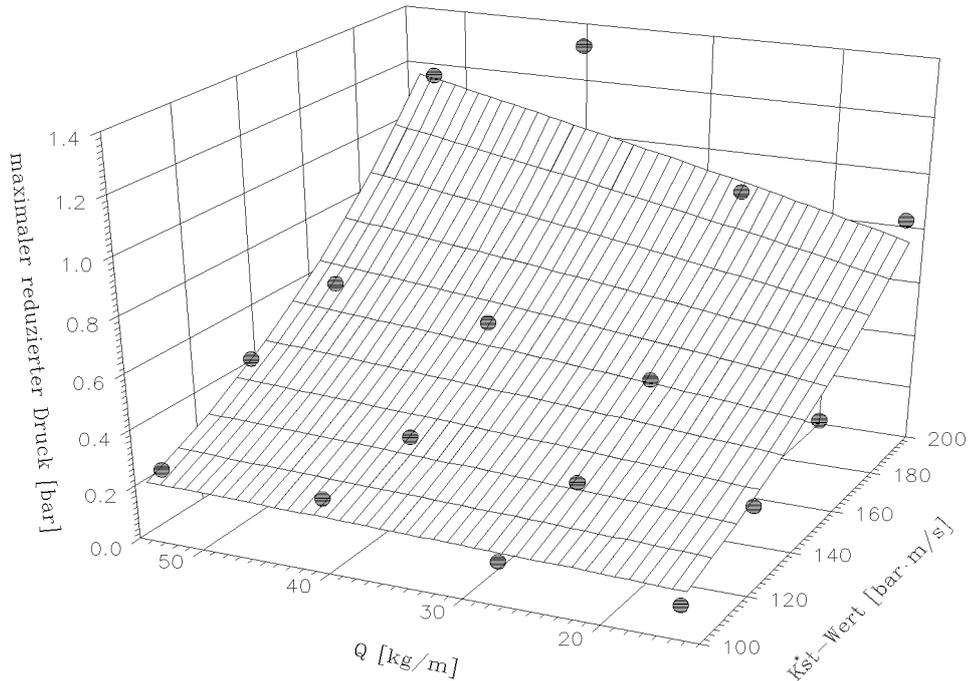


Abbildung 1.1: Beobachter maximaler reduzierter Überdruck als Funktion von K_{St} -Wert und Klappenwiderstand Q . Jeder Punkt ist das Mittel dreier Versuchsergebnisse am $9,4 \text{ m}^3$ -Behälter. Die in die Messpunkte eingepasste Fläche wird durch (1.2) beschrieben ($R^2 \approx 0,9$).

jedem Fall für die Praxis anwendbar. Außerdem hat der Exponentialfaktor die Eigenschaft, für gegen Null gehende Masse des Entlastungselementes erwartungsgemäß zu verschwinden.

Für den zeitlichen Druckanstieg wird näherungsweise angesetzt:

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{red}_{\max}} \approx 1,72 \cdot \frac{K_{St}}{\sqrt[3]{V}} \cdot \frac{p_{\text{red}_{\max}}}{p_{\max}} \quad (1.3)$$

Auch Gleichung 1.3 ergab sich durch anpassen an oben erwähnte Versuchsergebnisse, wie man demonstrativ aus Abb. 1.2 entnimmt.

Handelt es sich bei dem Entlastungselement um einen Deckel, so wird dieser zur Berechnung von $p_{\text{red}_{\max}}$ und $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{red}_{\max}}$ wie eine Klappe behandelt.

Mit dem so gewonnen zeitlichen Druckverlauf wird die Kraft F_{Ex} bestimmt, die aufgrund der Explosionswirkung auf das Entlastungselement wirkt. Dabei ergibt sich in der Anfangsphase der Entlastung diese Kraft einfach aus dem Druck auf die Fläche gemäß $F_{Ex} = p(t) \cdot A_E$. Zu späteren Zeitpunkten wird diese Kraft durch einen veränderlichen Faktor ausgeblendet und langsam durch eine Reibungskraft (Newton-Reibung) ersetzt, die durch das Anströmen des abgeblasenen Siloinhaltes gegen das Entlastungselement erzeugt wird. Die Ausströmgeschwindigkeit des Siloinhaltes wird dabei mit Hilfe des zeitlichen Druckverlaufes berechnet. Schließlich ergibt sich der Öffnungswinkel $\varphi(t)$ der Entlastungsklappen über der Zeit bzw. die Steighöhe des Entlastungsdeckels $y(t)$ über der Zeit als Lösung der Differentialgleichungen

$$\ddot{\varphi}(t) = \frac{S}{\Theta_K} \cdot \left((F_{Ex}(t) + F_{Gr}) \cdot \cos \varphi(t) + F_{LR}(t) + F_{SR} \right) \quad (\text{Klappe}) \quad (1.4)$$

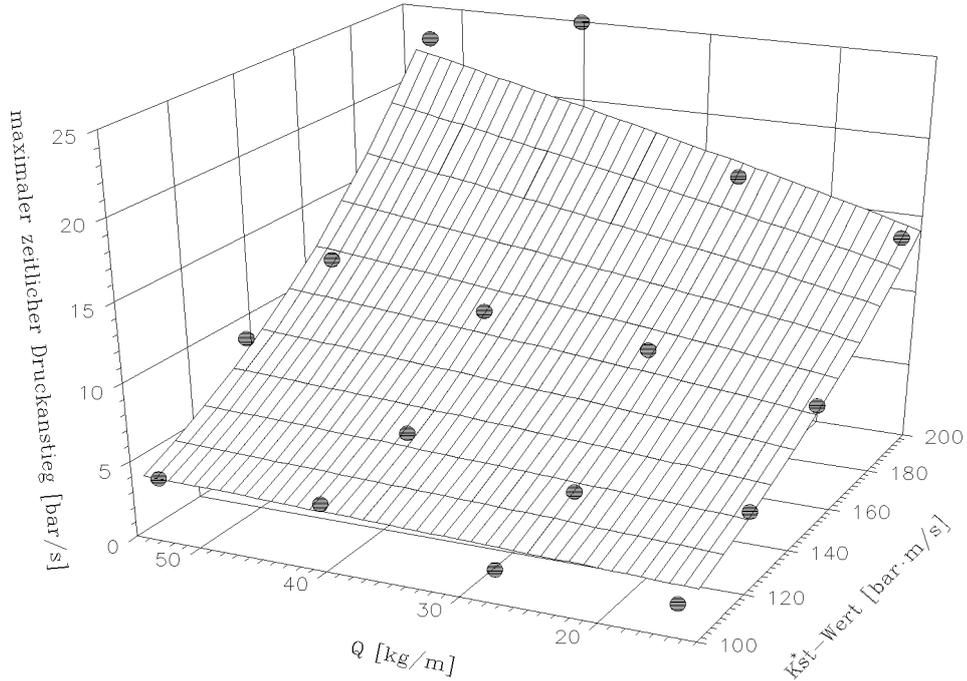


Abbildung 1.2: Beobachtete maximale reduzierte Druckanstiegsgeschwindigkeit als Funktion von K_{St} -Wert und Klappenwiderstand Q . Jeder Punkt ist das Mittel dreier Versuchsergebnisse am $9,4 \text{ m}^3$ -Behälter. Die in die Messpunkte eingepasste Fläche wird durch (1.3) beschrieben ($R^2 \approx 0,9$).

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m(t)} \cdot \left(F_{Ex}(t) + F_{Gr} + F_{LR}(t) \right) \quad (\text{Deckel}) \quad (1.5)$$

mit Θ_K als auf die Drehachse bezogenes Trägheitsmoment der Klappe, S als Abstand Klappenschwerpunkt – Drehachse und $m(t)$ als Deckel- plus Fangseilmasse. Die wirkenden Kräfte F sind durch Indizes gekennzeichnet: Ex=Kraft aufgrund der Explosionswirkung, Gr=Gravitation, LR=Luftwiderstand und SR=Scharnierreibung. Die zuletzt erwähnten Kräfte werden aus den Angaben über die Entlastungselemente (Masse, Vermaßung) berechnet.

Die Lösung von (1.4) bzw. (1.5) wird mit Hilfe des bekannten Runge-Kutta Verfahrens [15] numerisch durchgeführt, wobei die physikalischen Größen innerhalb des Silos wie z. B. die Dichte stets angeglichen werden. Aus dem errechneten Klappenöffnungswinkel bzw. der Deckelsteighöhe in Abhängigkeit der Zeit können auf einfache Weise die gesuchten Scharnier- oder Seilbelastungen $F_K(t)$ bei Klappen oder die Seilbelastungen $F_D(t)$ bei Deckeln berechnet werden:

$$F_K(t) = \sqrt{\left(m \cdot S \cdot \dot{\varphi}^2(t) \right)^2 + \left(\frac{\Theta_S}{S} \cdot \ddot{\varphi}^2(t) \right)^2} \quad (\text{Klappe}) \quad (1.6)$$

$$F_D(t) = n \cdot E \cdot A_S \cdot \frac{\Delta l(t)}{l} \quad (\text{Deckel}) \quad (1.7)$$

In (1.6) steht m für die Masse und Θ_S für das Trägheitsmoment der Entlastungsklappe, wobei sich letzteres auf die Rotationsachse durch den Schwerpunkt der Klappe bezieht. $\dot{\varphi}$ und $\ddot{\varphi}$ sind die zeitabhängige Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung der Entlastungsklappe.

In (1.7) steht n für die Anzahl, E für das Elastizitätsmodul, A_S für die Querschnittsfläche und l für die Länge der Deckfangseile. $\Delta l(t)$ ist die Seildehnung während des Abfangvorganges. Aus der Lösung von (1.4) oder (1.5) werden die Anfangsbedingungen für den Fall abgeleitet werden, dass die Befestigung der Entlastungselemente unterdimensioniert sind und es zu einem Abriss kommt. Mit den Bedingungen Startgeschwindigkeit, Starthöhe und Startwinkel kann die Bewegungsgleichung für den schiefen Wurf mit Newton-Reibung

$$m \cdot \ddot{\vec{r}}(t) = -\frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot \hat{N}(t) \cdot \dot{r}(t) \cdot \dot{\vec{r}}(t) - m \cdot g \cdot \vec{e}_3 \quad (1.8)$$

durch numerische Integration gelöst und damit die Flugbahn abreißender Entlastungselemente berechnet werden. Es steht ρ_L für die Dichte der Luft, $\vec{r}(t)$, $\dot{\vec{r}}(t)$ und $\ddot{\vec{r}}(t)$ für den zeitabhängigen Ortsvektor und dessen zeitliche Ableitungen, m für die Masse des abgerissenen Entlastungselementes und g für die Erdbeschleunigung. Das fliegende Entlastungselement wird stets als rotierende runde Platte betrachtet. Diese Annahme wird in (1.8) durch den veränderlichen Tensors $\hat{N}(t)$ berücksichtigt wie im folgenden erläutert wird. Im Newton'schen Reibungsgesetz treten neben den oben genannten Größen noch ein körpercharakteristischer Widerstandsbeiwert c_w und die Körperquerschnittsfläche auf. Eine durch die Luft fliegende Platte mit kreisförmigem Querschnitt besitzt zwei sich wesentlich unterscheidende Querschnittsflächen A_x, A_y bzw. Reibungskoeffizienten c_x, c_y , wie man leicht Abb. 1.3 entnimmt. Dieser Umstand kann in guter Näherung durch den Tensor

$$\hat{N}(t) = \begin{pmatrix} c_x \cdot A_x \cdot \cos^2 \beta(t) + & 0 \\ c_y \cdot A_y \cdot \sin^2 \beta(t) & \\ & c_x \cdot A_x \cdot \sin^2 \beta(t) + \\ 0 & c_y \cdot A_y \cdot \cos^2 \beta(t) \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

beschrieben werden. Dieser Betrachtungsweise liegt die legitime Annahme zugrunde, dass die Platte starr um die horizontale z-Achse rotiert und dass der Geschwindigkeitsvektor $\vec{v}(t) = \dot{\vec{r}}(t)$ stets in der xy-Ebene liegt. Die Sinus- und Cosinusfunktionen des Winkels $\beta(t)$ in $\hat{N}(t)$

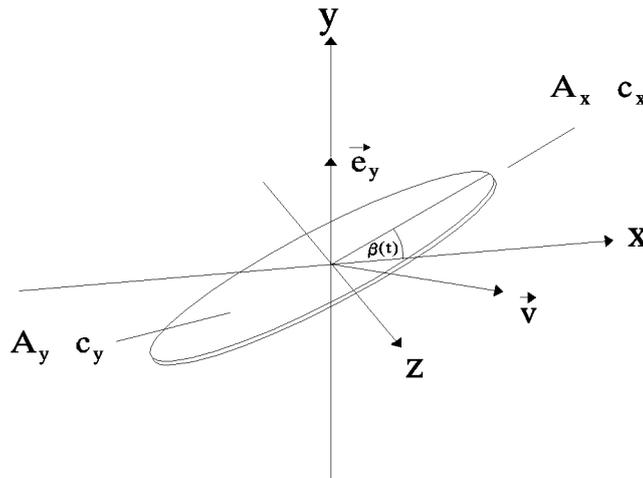


Abbildung 1.3: Skizze einer, mit der Geschwindigkeit \vec{v} durch die Luft fliegenden Platte mit der momentanen Neigung $\beta(t)$ zur Horizontalen.

bringen die zeitabhängige Orientierung des Körpers¹ in Bezug auf die ebenfalls horizontale x-Achse 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. Im Gegensatz zu STS, das der Berechnung von Trümmerflugbahnen bei großflächiger Wandabsprengung dient, erlaubt also SIMEK eine Abschätzung der Flugweite bei Absprengung kleiner Wandflächen.

1.2 STS

STS dient der Flugbahnberechnung von Bruchstücken, die als Folge einer Staubexplosion in einem Behältnis fortgeschleudert werden. Damit STS anwendbar ist, muss ein größerer Teil der Behälterwand zerstört werden. Als Berechnungsergebnis erhält man dann die Flugbahn mit der wahrscheinlichsten und mit der maximal möglichen Flugweite zusammen mit den jeweiligen kinetischen Einschlagenergien der betrachteten Trümmer. Die Grundlage für die Berechnung von Trümmerflugbahnen bei berstenden Gebäuden infolge von Staubexplosionen beruht - wie bei SIMEK - auf der numerischen Lösung der Gleichung (1.8). Allerdings besteht im Fall von STS die Schwierigkeit, die zur Bahnberechnung notwendigen Anfangsbedingungen wie Startgeschwindigkeit, Startwinkel, Starthöhe etc. der Trümmer zu bestimmen. Im folgenden werden die Formeln für die Bestimmung der Anfangsbedingungen kurz aufgezeigt. Die Ableitung dieser Formeln ist in [12] detailliert beschrieben.

Die Berechnung der Startgeschwindigkeit v_0 der Trümmer erfolgt mit Hilfe einer Kombination der Gurney- und Gasgleichung sowie dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre:

$$v_0 \approx \sqrt{2 \cdot c_v \cdot T_0 \cdot \left(\frac{p_b}{p_0} - 1\right)} \cdot \left(\frac{m}{((p_b - p_0) \cdot p_{\max}^{-1} \cdot \rho_s \cdot V) + \frac{1}{2}}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.10)$$

Hier ist p_b der Druck im Gebäude zum Berstzeitpunkt, T_0 bzw. p_0 die Normtemperatur bzw. der Normdruck, c_v die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Volumen, ρ_s die Dichte des Staub/Luft-Gemisches, V das mit Brennstoff ausgefüllte Volumen, m die abgesprengte Masse und p_{\max} die staubspezifische Kenngröße des maximalen Überdruckes. Ist $p_{\text{red,max}} > p_b$, so wird ersterer in (1.10) anstelle von p_b eingesetzt. ρ_s wird im Programm näherungsweise mit $2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ angesetzt. Alle weiteren Größen können für ein gegebenes Gebäude ohne größere Schwierigkeiten angegeben werden. Die Formel (1.10) gilt für zylindrische Gebäude. Ist das betreffende Gebäude von quaderförmiger Geometrie, so ist der Bruch $\frac{1}{2}$ innerhalb der Klammer von (1.10) durch den Bruch $\frac{3}{5}$ zu ersetzen.

Für die Flugbahn mit maximaler Reichweite wird der Startwinkel α (bezogen auf die Horizontale) der Trümmer durch

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\sqrt{2 \cdot (v_0^4 + 3 \cdot v_0^2 \cdot h \cdot g + 2 \cdot h^2 \cdot g^2)}}{2 \cdot (v_0^2 + h \cdot g)} \right) \quad (1.11)$$

beschrieben. Darin ist h die Starthöhe, g die Erdbeschleunigung und v_0 die Startgeschwindigkeit der Trümmer. Zur Berechnung der am wahrscheinlichsten auftretenden Trümmerflugbahn wird $\alpha = 0$ rad gesetzt (Absprengung senkrecht zur Behälterwand). Die Starthöhe h ergibt sich aus der Lage der Oberkante der Berstfläche (maximale Reichweite) bzw. aus der Lage des Zentrums der Berstfläche (wahrscheinlichste Reichweite).

¹In der Regel bekommt ein abgerissenes Entlastungselement einen Drehimpuls mit.

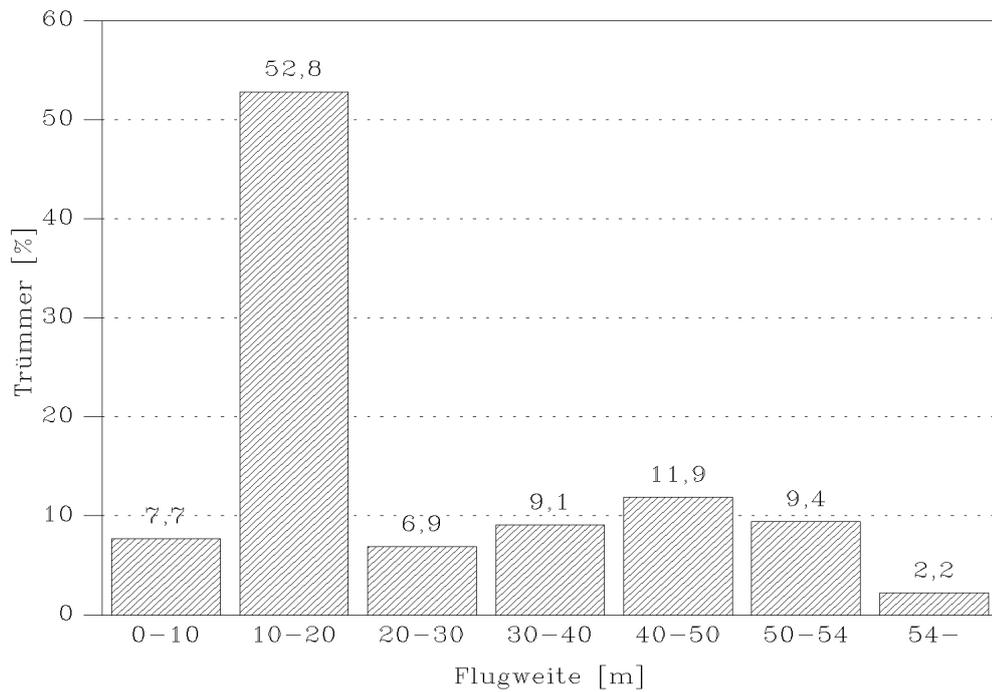


Abbildung 1.4: Ergebnis einer experimentellen Untersuchung über Glastrümmer-Flugweiten [13].

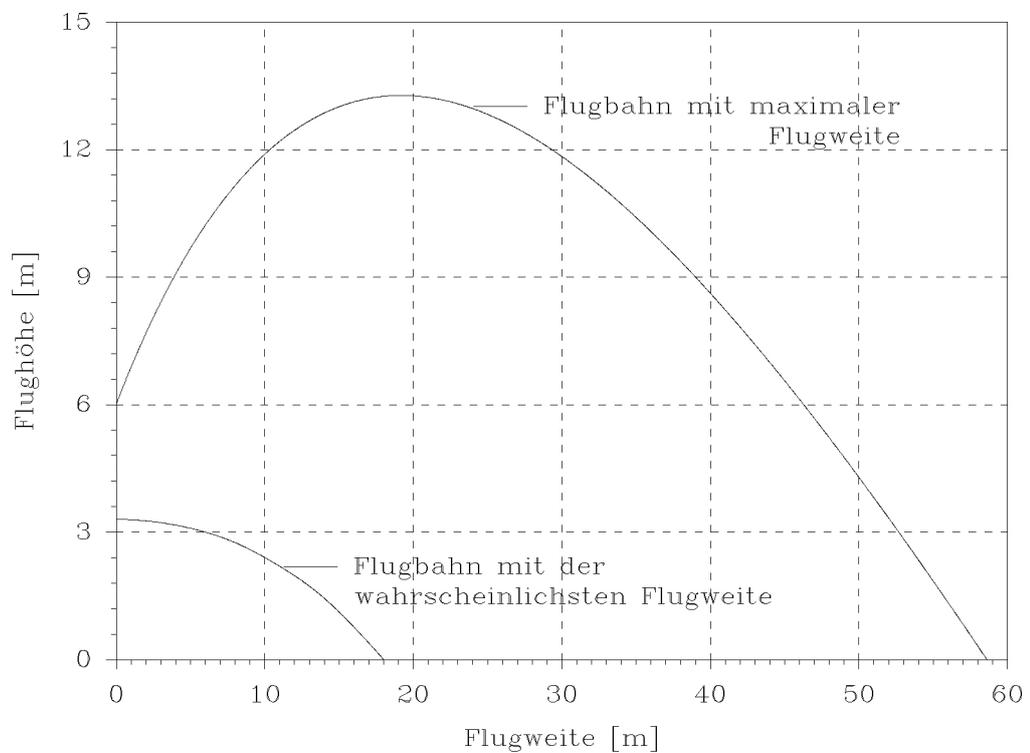


Abbildung 1.5: Mit STS berechnete Glastrümmer-Flugbahnen für die Versuchsbedingungen aus [13].

Mit der bekannten Dichte ρ_s und Stärke des Wandmaterials c_s des Gebäudes und mit der Fläche eines Trümmerstückes $a_s \cdot b_s$ ergibt sich dessen Masse aus

$$m = \rho_w \cdot a_s \cdot b_s \cdot c_s \quad (1.12)$$

Für den Flug durch die Luft werden die Trümmer – wie bei SIMEK als runde, rotierende Scheiben betrachtet. Die Berechnung der Flugbahnen und der kinetischen Einschlagenergien erfolgt dann wie unter Abschnitt 1.1 beschrieben durch numerische Integration der Gleichung (1.8).

Um die Leistungsfähigkeit dieser Berechnungsmethode zu demonstrieren, sei hier ein Vergleich zwischen experimentellen Ergebnissen aus [13] und dazu durchgeführten Berechnungen mit STS gezeigt. Bei den Versuchen in [13] wurde ein 17,6 m² großer und 7 mm starker Bereich aus Glas aus der Wand eines kubischen Raumes mit einem Volumen von 324 m³ durch Staubexplosion herausgesprengt. Mit $p_{\max} = 8,8$ bar, $m = 280$ kg und dem gemessenen $p_{\text{red,max}} = 0,082$ bar errechnete STS die Flugbahnen aus Abb. 1.5. Die bei den Experimenten beobachtete Trümmerverteilung ist in Abb. 1.4 dargestellt. Ein Vergleich beider Abbildungen macht die gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnung deutlich (siehe [12]).

1.3 Vent

Vent berechnet parallel nach mehreren Methoden Entlastungsflächen für vorgegebene maximale reduzierte Überdrücke für staubexplosionsgefährdete Behälter und explosionsgefährdete Räume. Gleichzeitig werden Druck-Flächen-Kurven für die eingegebenen Parameter generiert. In der Regel gelten die mit Vent erhaltenen Ergebnisse für massenträgheitslose Entlastungselemente.

Zur Berechnung von Entlastungsflächen bei staubexplosionsgefährdeten Behältern benutzt Vent parallel zu den einschlägigen Formeln aus [10], [11], [26] die Formel von Radandt

$$A_E = \left(a + \frac{b}{p_{\text{red}}} \right) \cdot V^c \quad (1.13)$$

mit $a = 0,011$, $b = 0,069$ und $c = 0,776$ für die Staubexplosionsklasse 1. Für die Staubexplosionsklasse 2 nehmen diese Koeffizienten die Werte $a = 0,012$, $b = 0,114$ und $c = 0,72$ an [24].

Die Berechnung von Entlastungsflächen A_E für Räume wird neben den allgemein bekannten Formeln aus [10], [11] und [26] durchgeführt mit

$$A_E = \frac{0,75 \cdot A_S}{p_{\text{bem}} \cdot 100} \quad (1.14)$$

$$A_E = \frac{C \cdot A_S}{\sqrt{p_{\text{bem}} \cdot 100}} \quad (1.15)$$

A_S ist hier die Fläche der Innenwände des betrachteten Raumes. Der reduzierte Druck p_{bem} ist hier als der Druck definiert, dem die schwächste Struktur innerhalb der Wand des Raumes gerade noch standhält [23], [22]. In (1.15) ist $C = 0,26 \sqrt{\text{kPa}}$ für $100 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} < K_{\text{St}} \leq 200 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$, $C = 0,3 \sqrt{\text{kPa}}$ für $200 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} < K_{\text{St}} \leq 300 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ und $C = 0,51 \sqrt{\text{kPa}}$ für $200 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}} < K_{\text{St}}$ [22].

1.4 Vessel

Im Programmteil *Vessel* finden ausschließlich Formeln Verwendung, die in der allgemein bekannten Literatur zum Thema Druckbehälterdimensionierung veröffentlicht wurden. Stellvertretend für die zahlreichen Veröffentlichungen seien hier [25] und [26] genannt.

1.5 ExTools

Die in diesem Programmteil verarbeiteten Formeln können bei den Entwicklern des Programms erfragt werden:

Kühner AG
Dinkelbergstraße 1
4127 Birsfelden
Schweiz
Telefon: +41 (0)61 319 93 93

FireEx Consultant GmbH
Dinggrabenstraße 5
4304 Giebenbach
Schweiz
Telefon: +41 (0)61 813 91 57

Kapitel 2

Die Anwendung von ExProtect

Die aktuelle Version ExProtect 4.2.0 ist eine normale Anwendung unter Windows 9X/NT/2000/ME/XP. Die Installation erfolgt wie bei solchen Programmen üblich über eine Installationsroutine, welche Verzeichnisse erstellt, Programmeintragungen vornimmt und Icons erstellt. Ein Mausklick auf das ExProtect-Icon öffnet das Hauptmenü, das in Abb. 2.1 gezeigt ist. Die zwölf zentralen Tasten, von denen die ersten fünf durch SIMEK, STS, Vent, Vessel und ExTools belegt sind, dienen dem Start der implementierten Unterprogramme. Wie allgemein üblich, kann mit der Taste „F1“ eine ausführliche Hilfe aufgerufen werden, in der Anwendungsmöglichkeiten, Programmhandhabung und Berechnungsmethoden erläutert werden (Abb. 2.2). Mit Hilfe einiger Beispiele wird nun der Umgang mit ExProtect erläutert.

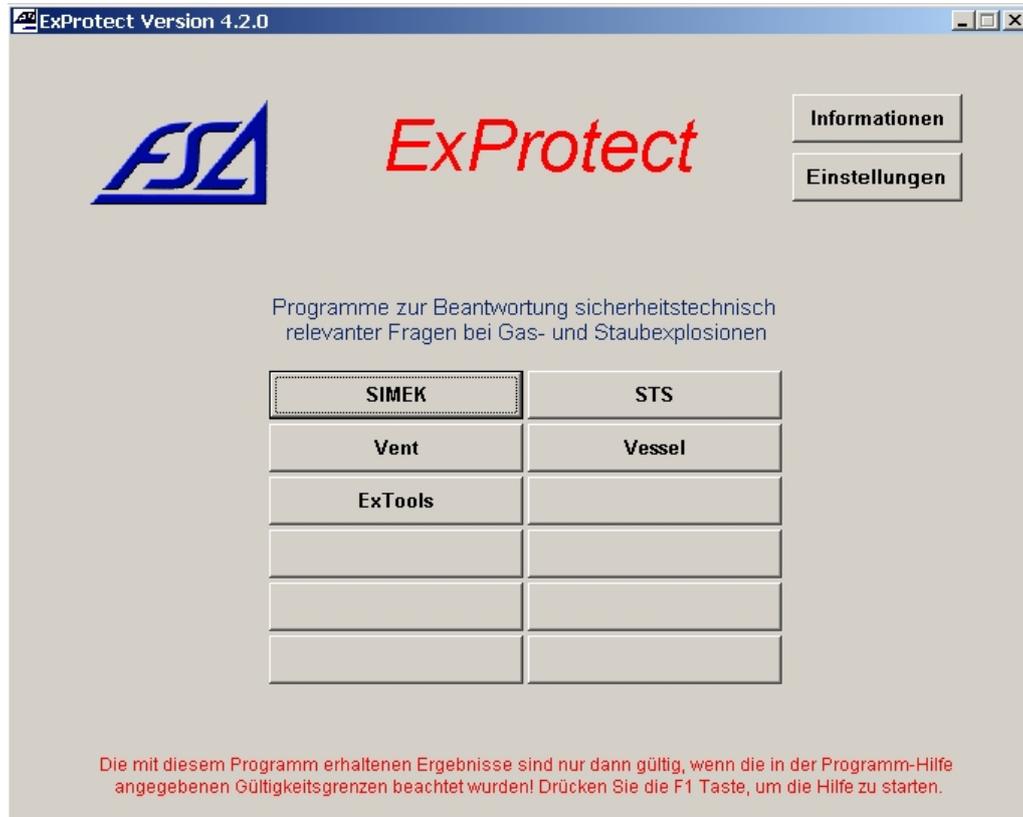


Abbildung 2.1: Das Hauptmenü von ExProtect 4.2.0.

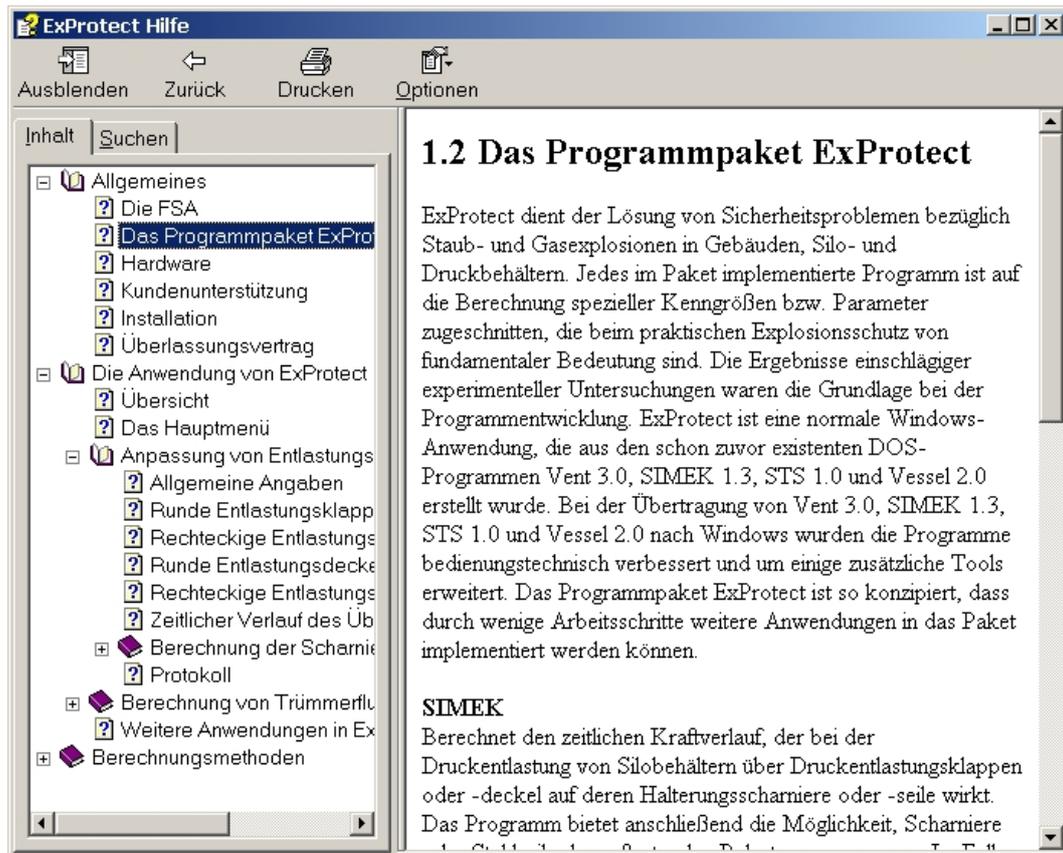


Abbildung 2.2: Die HTML-Hilfe von ExProtect.

2.1 SIMEK

Ein Silo, in dem brennbarer Staub gelagert wird, wird wegen fehlender Explosionsschutzmaßnahmen bemängelt und es sollen mit möglichst geringem planerischen Aufwand druckentlastende Explosionsklappen in die Silowand eingebaut werden. Für solche und ähnliche Problemstellungen wurde SIMEK konzipiert: Ein Mausklick auf die „SIMEK“-Taste startet das Programm und es erscheint die Maske für die Eingabe der allgemeinen Problem-Parameter (Abb. 10). Um eine Problemlösung anbieten zu können, benötigt SIMEK mindestens 4 Parameter, nämlich das Behältervolumen V , den K_{St} -Wert, das Verhältnis H/D und den reduzierten Überdruck p_{red} , den es einzuhalten gilt. Die ersten drei dieser Werte müssen hier eingetragen und die Art des Entlastungselementes gewählt werden. Für das im Beispiel betrachtete Silo sollen rechteckige Explosionsklappen benutzt werden und es soll gelten: $V = 100 \text{ m}^3$, $K_{St} = 200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $H/D = 1$ und $p_{red} = 0,5 \text{ bar}$. Durch einen Mausklick auf die Taste „Fläche berechnen“ wird nun ein Fenster geöffnet, in dem der Anpassungsprozess der Entlastungsflächen durchgeführt wird. Nach Eintragung des reduzierten Überdruckes in das dafür vorgesehene Feld, wird die Flächenanpassung automatisch gestartet. Wie man Abb. 2.4 entnimmt, errechnet SIMEK für das Silo im Beispiel eine Entlastungsfläche von $3,188 \text{ m}^2$, welche sich auf zwei Entlastungsklappen verteilt. Als Berechnungsgrundlage werden dabei Riffelbleche mit 5 mm Stärke¹ angenommen. Mit einem Mausklick auf die Taste

¹Das entspricht einem Flächengewicht von rund $38,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$. Dieser Parameter ist veränderbar.

„übernehmen“ werden die errechneten Werte in den weiteren Programmablauf übernommen und man gelangt in das Fenster, in dem die physikalischen Eigenschaften einer Explosionsklappe eingegeben werden (Abb. 2.5). Weil in unserem Beispiel die automatische Flächenanpassung zum Einsatz kam, sind diese Parameter schon alle gesetzt. In diesem

Abbildung 2.3: SIMEK-Fenster zur Eingabe der allgemeinen Problem-Parameter.

Abbildung 2.4: SIMEK-Fenster zur Berechnung der notwendigen Entlastungsfläche.

The screenshot shows the 'SIMEK - rechteckige Klappe' window with the following data:

notwendige Eingaben	
Masse	[kg] : 68.39
Ausdehnung	[m] : 1.41
Seite A	[m] : 1.26
Seite B	[m] : 1.26
Rand	[m] : 0
Öffnung	[m] : 1.26

optionale Eingaben	
Schwerpunkt	[m] : 0.77
Trägheitsmoment	[kg·m ²] : 50.65

Buttons: weiter, zurück, Standard-Klappe, Scharnier (selected), Seil, Scharnier, Bild, Neuanfang.

Abbildung 2.5: SIMEK-Fenster zur Eingabe der physikalischen Eigenschaften einer Explosionsklappe.

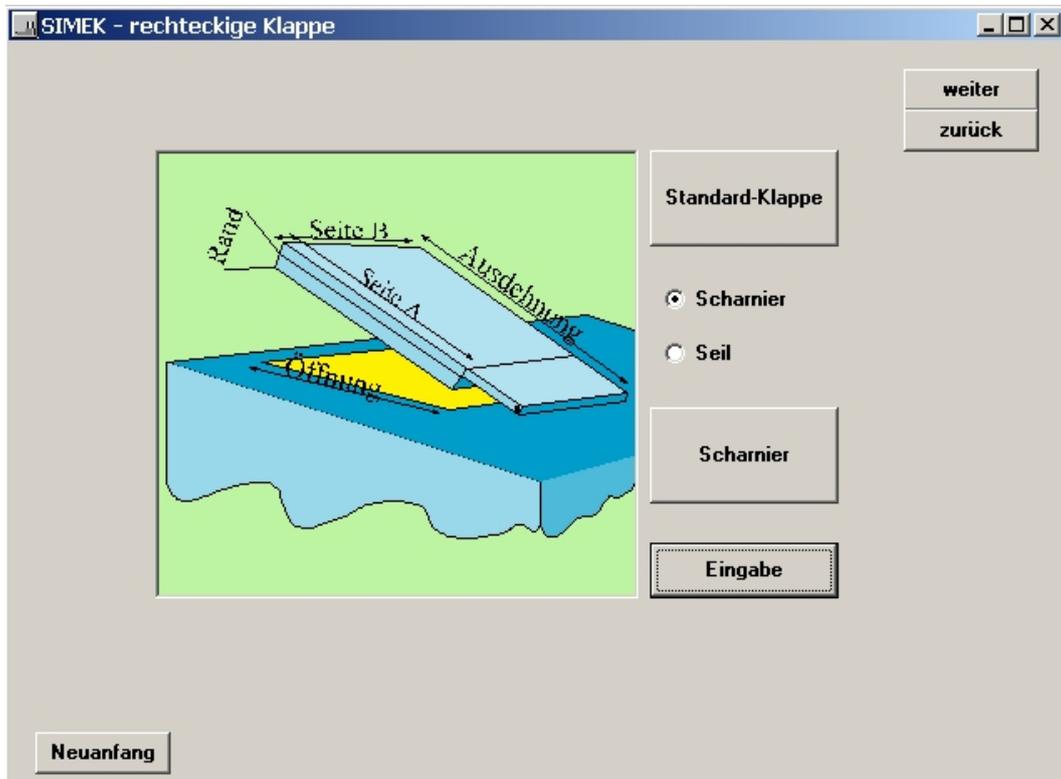


Abbildung 2.6: SIMEK-Fenster zur Eingabe der Explosionsklappen-Daten im Bild-Modus.

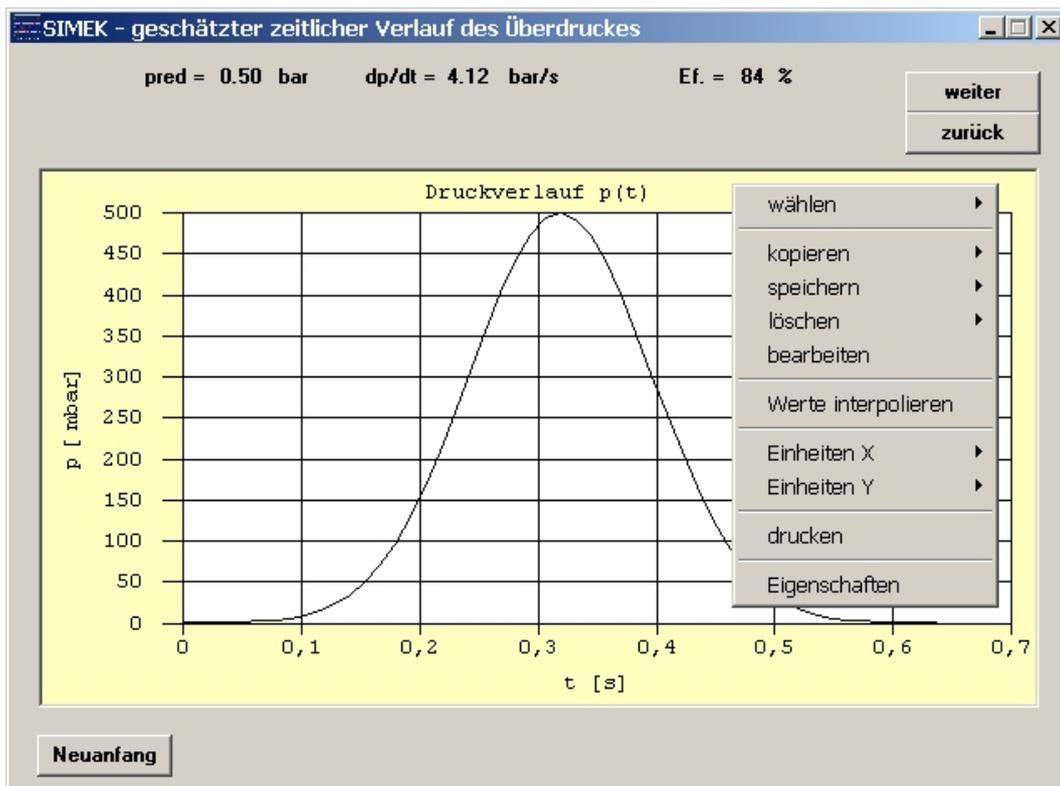


Abbildung 2.7: SIMEK-Fenster zur Anzeige des geschätzten zeitlichen Verlaufs des Überdruckes.

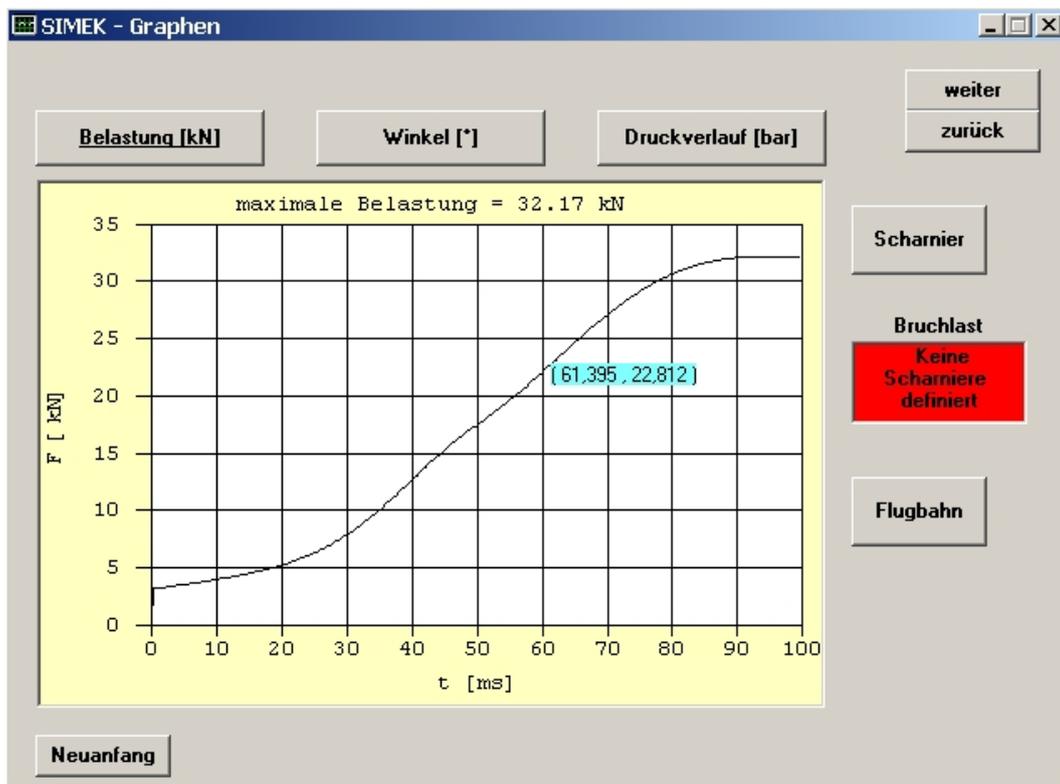


Abbildung 2.8: SIMEK-Fenster zur Anzeige der Berechnungsergebnisse.

Fenster kann nun noch ausgewählt werden, ob die Klappen mit Scharnieren oder Seilen am Silo befestigt werden sollen (im Beispiel wurden Scharniere gewählt). Für den Fall, dass die Klappendaten nicht gesetzt sind, kann mit Hilfe der „Bild“-Taste eine Grafik aufgerufen werden, die der Veranschaulichung der gefragten Daten dient (Abb. 2.6).

Durch Anklicken der Taste „weiter“ wird das Fenster zur Anzeige des geschätzten zeitlichen Überdruckverlaufs im Explosionsfall geöffnet (Abb. 2.7). Neben dem Druckverlauf im entlasteten Silo wird der erwartete reduzierte Überdruck, die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit und die Entlastungsfähigkeit der Explosionsklappen angegeben. Durch Klick mit der rechten Maustaste innerhalb des Grafikfeldes wird ein Menü aufgerufen, mit dem diverse Operationen hinsichtlich der Grafik vorgenommen werden können (z. B. drucken).

Betätigen der „weiter“-Taste startet die Simulation des Druckentlastungsvorganges und öffnet das entsprechende Fenster (Abb. 2.8). Nachdem die Simulationsrechnung abgeschlossen ist, erscheint im Grafikfeld dieses Fensters die Belastung über der Zeit, die unsere Explosionsklappe auf ihre Scharniere ausübt. Alternativ kann der Klappenöffnungswinkel oder der Überdruckverlauf als Funktion der Zeit dargestellt werden, wenn die entsprechenden Tasten angeklickt werden. Ein Mausklick in das Grafikfeld zeigt das Wertepaar für die Koordinate des Mauszeigers an (blaues Feld). Oberhalb der Grafik wird die maximal auftretende Scharnierbelastung angezeigt, welcher die noch zu dimensionierenden Scharniere standhalten müssen.

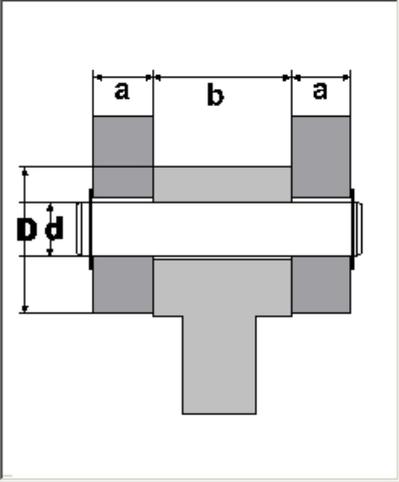
Zur Planung von ausreichend stabilen Scharnieren für die verwendeten Explosionsklappen kann die Taste „Scharnier“ angeklickt werden, woraufhin das Fenster aus Abb. 2.9 erscheint. Dieses Fenster beinhaltet vier Karteikarten, die am besten von links nach rechts abgearbeitet werden. Mit Hilfe der äußerst linken Karteikarte wird die Anzahl der Scharniere, die Betriebsart und die Art des Bolzeneinbaus angegeben (Abb. 2.9, oben). Die Karteikarte rechts davon dient der Eingabe des Scharnierbolzendurchmessers sowie der Auswahl des Bolzenwerkstoffes (Abb. 2.9, mitte). Angezeigt werden die Zugfestigkeit des Werkstoffes sowie die zulässige Biegespannung des Bolzens. Die in die rechts folgende Karteikarte einzutragenden Daten definieren Gabel und Stange des Scharniers (Abb. 2.9, unten). Die letzte Karteikarte zeigt alle wichtigen, maximal auftretenden Spannungen im Scharnier an und die zulässigen Höchstwerte dazu. Unterhalb der Karteikarten wird die maximal auf ein Scharnier wirkende Belastung angezeigt sowie die Bruchlast des Scharniers. Ist das Feld für die Bruchlastanzeige grün unterlegt, ist das Scharnier ausreichend stabil dimensioniert; andernfalls ist dieses Feld rot unterlegt. In unserem Beispiel ist ein Bolzendurchmesser von 20 mm ausreichend, um ausreichende Stabilität der Scharniere zu gewährleisten. Ein Mausklick auf die Taste „übernehmen“ implementiert die konstruierten Scharniere in den Programmverlauf und führt zurück zum Fenster aus Abb. 2.8.

Hier besteht nun noch die Möglichkeit, die Flugweite abreißender Entlastungselemente zu bestimmen. Dies geschieht durch einen Mausklick auf die Taste „Flugbahn“, der die Öffnung des Fenster aus Abb. 2.10 zur Folge hat. Die Eingabe der Starthöhe (Position des Entlastungselementes über dem Erdboden), die optionale Eingabe einer Luftbewegung und ein Mausklick auf die „rechnen“-Taste starten die Flugbahnberechnung. Im Beispiel simulieren wir den Abriss einer der beiden Explosionsklappen, die mit $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Windgeschwindigkeit in Flugrichtung und bei einer Starthöhe von 10 m eine Flugweite von knapp 50 m erreicht.

Ein Mausklick auf die „weiter“-Taste öffnet das Protokoll-Fenster, in dem alle Daten und Ergebnisse tabellarisch zusammengefasst sind (Abb. 2.11). Aus diesem Fenster heraus können z. B. die Daten gedruckt oder das Projekt gespeichert werden. Dieses Protokoll-Fenster wird nicht nur von SIMEK, sondern auch von STS, Vent und Vessel benutzt.

SIMEK - Scharnierfestigkeit

Siehe: Roloff/Matek; Maschinenelemente; 12. Auflage; Kapitel 9.2.2



Allgemeines Bolzen Gabel + Stange Spannungen

Anzahl der Scharniere =

Einspannfaktor $k =$

Betriebsfaktor $c_B =$
2.0 ... 3.5

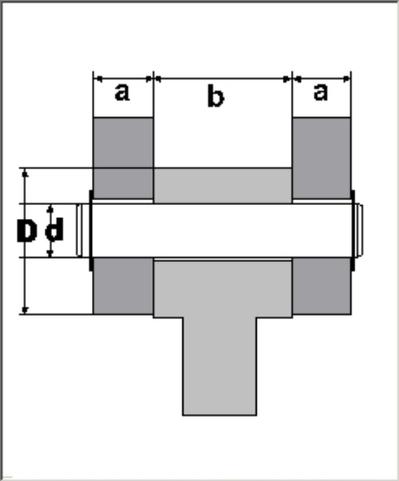
Sie haben die Gabel und Stangenparameter a und b zu klein gewählt. Sie müssen mindestens die Stärken der standard Vorgaben verwenden.

abbrechen

übernehmen

SIMEK - Scharnierfestigkeit

Siehe: Roloff/Matek; Maschinenelemente; 12. Auflage; Kapitel 9.2.2



Allgemeines **Bolzen** Gabel + Stange Spannungen

Stiftwerkstoff
35S20 ,1 $R_m =$ N/mm²

$d =$ mm

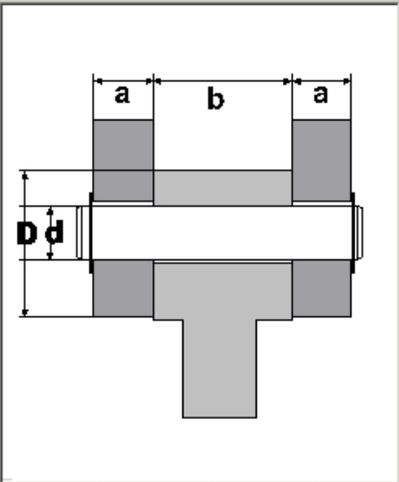
zulässige Biegespannung
 $\sigma_{b\text{ zul}} =$ $\cdot R_m =$ 108 N/mm²

Belastung =

Bruchlast =

SIMEK - Scharnierfestigkeit

Siehe: Roloff/Matek; Maschinenelemente; 12. Auflage; Kapitel 9.2.2



Allgemeines Bolzen **Gabel + Stange** Spannungen

$a =$ mm $a = d/2$

$b =$ mm $b = d$

$D =$ mm $D = 2.5 \cdot d$

Belastung =

Bruchlast =

Abbildung 2.9: SIMEK-Fenster zur Dimensionierung von Scharnieren für Explosionsklappen.

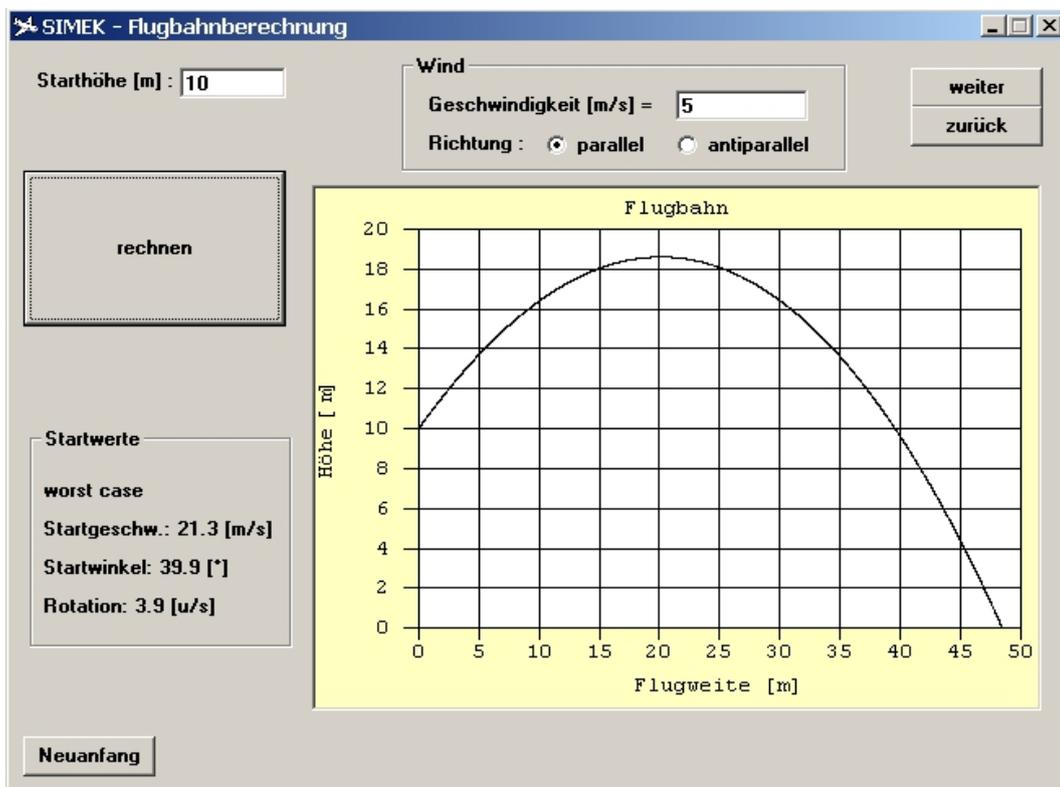


Abbildung 2.10: SIMEK-Fenster zur Flugbahnberechnung abreißender Entlastungselemente.

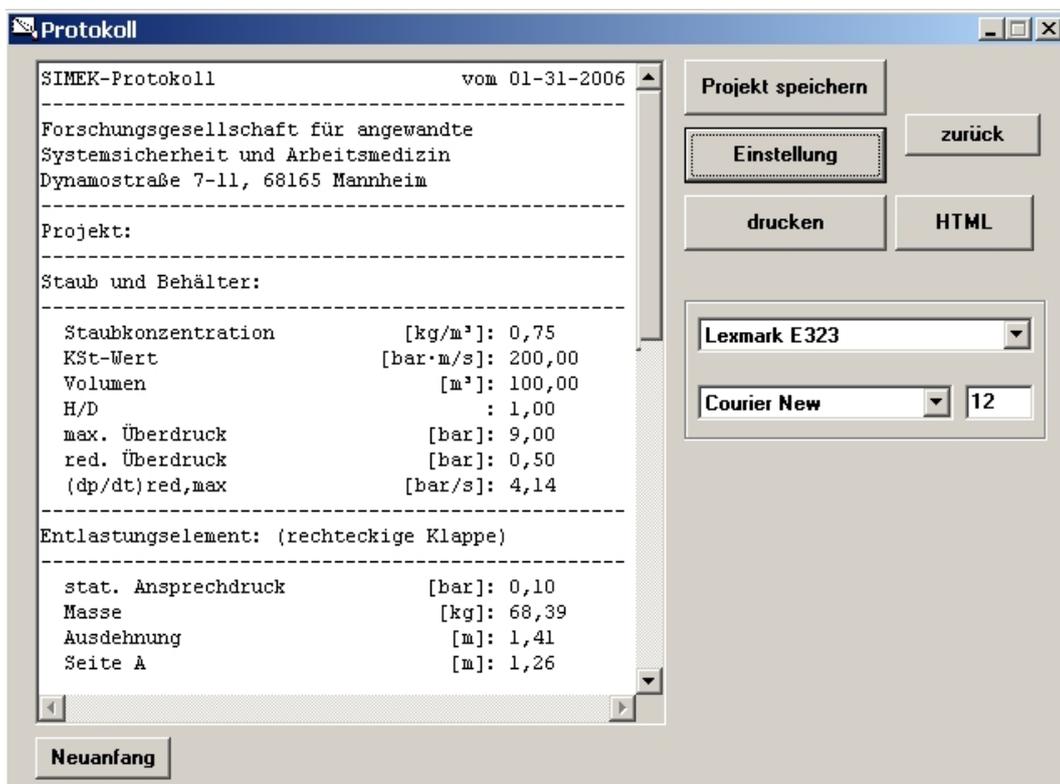


Abbildung 2.11: Protokoll-Fenster zur zusammenfassenden Darstellung aller Daten und Ergebnisse.

2.2 STS

Der Betreiber des Silos aus unserem ersten Beispiel (siehe Abschnitt 2.1) soll nun nachweisen, dass an das Silo angrenzende Bauten nicht durch Trümmerflug gefährdet sind, wenn es trotz aller Schutzmaßnahmen zu einer verheerenden Explosion im Silo kommt. Zur Beantwortung solcher Fragestellungen dient STS. Ein Mausklick auf die STS-Taste im Hauptmenü von ExProtect (Abbildung 2.1) startet das Programm und es erscheint das zugehörige Eingabefenster, so wie es in Abbildung 2.12 gezeigt ist. Um die gewünschte Berechnung durchführen zu können, muss STS neben der Behälterform (Quader oder Zylinder) die Werte für das Behältervolumen V , das Höhe/Durchmesser-Verhältnis H/D des Behälters, den K_{St} -Wert, den maximalen Überdruck p_{max} , sowie den Druck p_b , bei dem das Bersten des Behälters zu erwarten ist, kennen. Im Beispiel sind das $V = 100 \text{ m}^3$, $H/D = 1$, $K_{St} = 200 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$, $p_{max} = 9 \text{ bar}$ und $p_b = 0,1 \text{ bar}$. Außerdem müssen noch Angaben über die Größe BF und die Höhe h der abgesprengten Fläche, die Stärke und das Material der Behälterwand, die (mittlere) Fläche eines Fragments und die Lage der Berstfläche hm gemacht werden (siehe Abb. 2.12). Ein Mausklick auf die Taste „weiter“ startet die Simulationsrechnung und öffnet ein Fenster zur grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse (Abb. 2.13). Die grüne Kurve stellt die wahrscheinlichste Flugbahn der Trümmer dar, d.h. das Gros der Fragmente wird die hier errechnete Flugweite (mit einer gewissen Schwankungsbreite) erreichen. Die Trümmerflugbahn mit der maximal möglichen Flugweite ist in roter Farbe dargestellt. In unserem Beispiel werden als maximal mögliche Flugweite gut 14 m erreicht. Ein Mausklick auf die „weiter“-Taste öffnet das schon bekannte Protokoll-Fenster (Abb. 2.11), in dem neben den eingegebenen Daten und berechneten Trümmerflugweiten auch die kinetische Einschlagenergie des betrachteten Fragments aufgelistet ist.

The screenshot shows the 'STS - allgemeine Angaben' dialog box. It is divided into several sections:

- Behälter und Staub:**
 - Behältervolumen [m³]: 100
 - Behälterhöhe/Durchmesser: 1
 - KSt-Wert [bar·m/s]: 200
 - maximaler Überdruck [bar]: 9
 - Berstdruck [bar]: 0.1
- Behälterform:**
 - Quader
 - Zylinder
 - Volumen Designer
- Berstfläche:**
 - Berstfläche BF [m²]: 30
 - Berstflächenhöhe h [m]: 6
 - Stärke der Berstfläche [mm]: 20
 - Material: Beton
 - Fläche der Trümmer [m²]: 0.5
 - Berstflächenlage hm [m]: 5
- Diagramm:** A 3D representation of a yellow cylindrical container on a blue background. The burst area is labeled 'BF'. The total height is 'h', and the height of the burst area is 'hm'.
- Buttons:** 'weiter', 'zurück', 'Neuanfang', and 'laden'.
- Projektname:** An empty text field.

Abbildung 2.12: STS-Fenster zur Eingabe der Problem-Parameter.

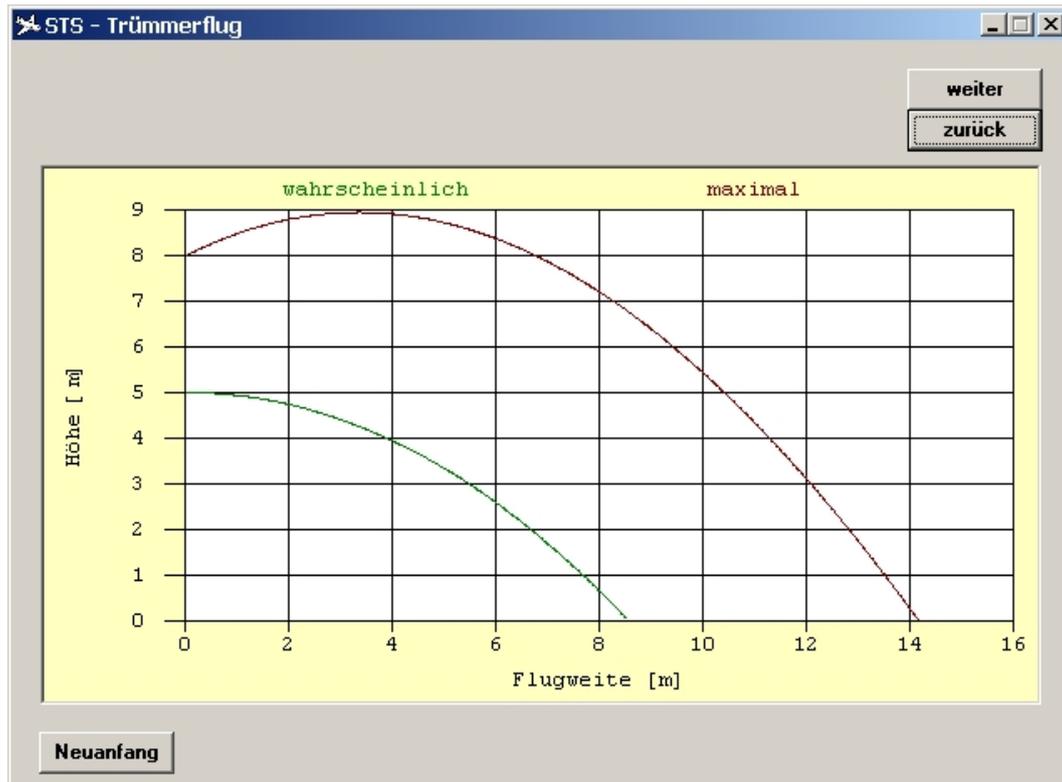


Abbildung 2.13: STS-Fenster zur Anzeige der Berechnungsergebnisse.

2.3 Vent

Der Silobetreiber aus unserem Beispiel möchte nun wissen, ob er sein Silo mit Hilfe von Berstscheiben gegenüber Explosionsklappen nicht vorteilhafter, d. h. mit kleineren Entlastungsflächen, Druckentlasten kann. Diese Art von Fragestellung kann mit **Vent** ohne großen Aufwand beantwortet werden. Das Programm wird durch einen Mausklick auf die entsprechende Taste im ExProtect-Hauptmenü (Abb. 2.1) gestartet. Das erscheinende Fenster enthält neun Karteikarten, von denen eine der Eingabe der notwendigen Problem-Parameter dient; diese liegt oben auf. Weitere sechs Karteikarten stehen für jeweils eine Berechnungsmethode und zeigen später die Berechnungsergebnisse an. Eine achte Karteikarte enthält eine Grafik, in der alle Ergebnisse zusammenfassend dargestellt sind. Mit Hilfe der neunten Karteikarte kann die Hilfe zu **Vent** direkt eingesehen werden. In die Eingabe-Karteikarte (Abb. 2.14) müssen die bekannten Daten wie das Behältervolumen V , das Höhe/Durchmesser-Verhältnis H/D des Behälters, der K_{St} -Wert, der reduzierte Überdruck p_{red} etc. eingegeben werden. Ein Mausklick auf die Taste „rechnen“ startet den Lösungsprozess. Nach dessen Beendigung färbt sich die Beschriftung der Karteikarten von grau nach schwarz, deren zugehöriger Algorithmus eine Lösung für das gestellte Problem gefunden hat. Für die Fragestellung aus unserem Beispiel wurden Lösungen nach den Methoden „VDI 3673 (2002)“, „VDI 3673 (1995)“, „Radandt“ und „prEN 14491“ gefunden. Ein Mausklick auf die entsprechende Karteikarte zeigt das Berechnungsergebnis an (Abb. 2.15). In unserem Beispiel bringt das Resultat der Berechnungsmethode „VDI 3673 (2002)“ mit einer Entlastungsfläche von $2,79 \text{ m}^2$ kaum Vorteile gegenüber der Benutzung von Explosionsklappen ($3,19 \text{ m}^2$, siehe Abschnitt 2.1). Neben der Ausgabe der Entlastungsfläche ist die Abhängigkeit der Druckentlastungsfläche vom reduzierten Überdruck grafisch dargestellt. Ein Mausklick auf die Taste „Protokoll“ öffnet das gleichnamige Fenster, in dem alle Werte zusammenfassend aufgelistet sind (Abb. 2.11).

Abbildung 2.14: Vent-Fenster zur Eingabe der Problem-Parameter.

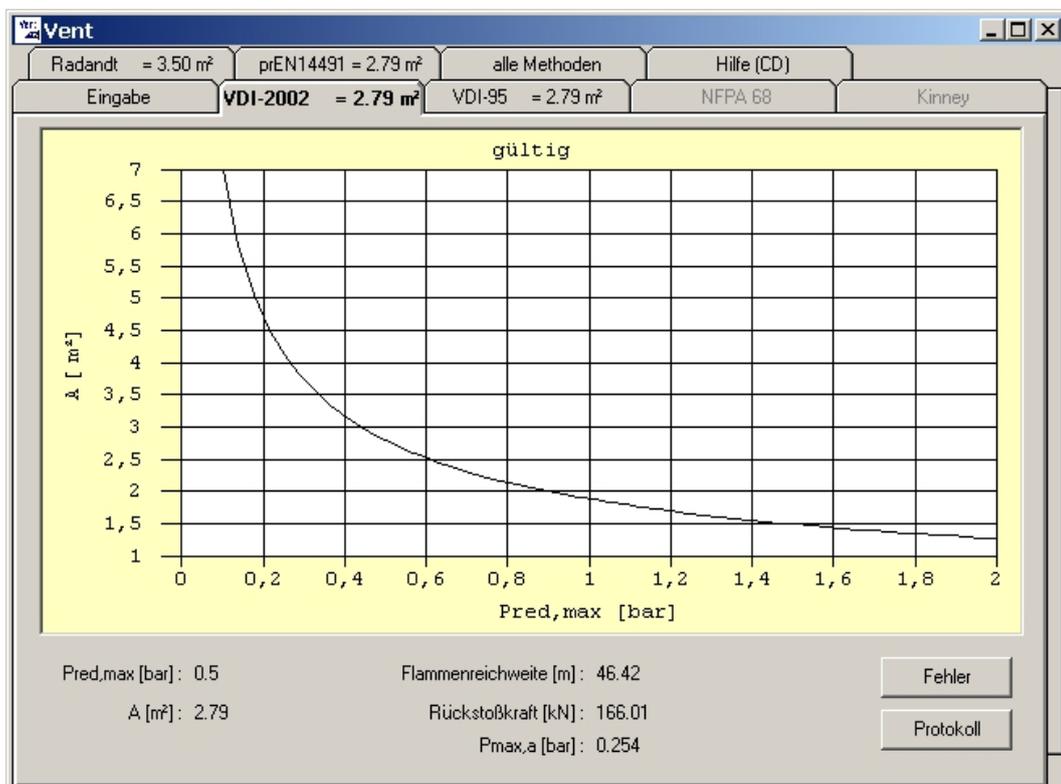


Abbildung 2.15: Vent-Ergebnisanzeige nach Berechnungsmethode „VDI 3673 (2002)“.

2.4 Vessel

Der vierte Programmteil von ExProtect, genannt Vessel, dient der Berechnung von Druckbehältern nach allgemein bekannten Methoden. Zur Demonstration der Programmhandhabung soll nun ein kugelförmiger Behälter unter innerem Überdruck berechnet werden. Ein Mausklick auf die Taste „Vessel“ im ExProtect-Hauptmenü startet das Programm und es erscheint das Menü von Vessel, welches in Abb. 2.16 abgedruckt ist. Wir wählen den ersten Menüpunkt per Mausklick und es erscheint das zugehörige Fenster aus Abb. 2.17. In die dafür vorgesehenen Felder müssen nun die entsprechenden Daten eingetragen werden, wie z. B. der Außendurchmesser des kugelförmigen Behälters, der im Beispiel mit $D_a = 1000$ mm angesetzt wurde. Zu jedem Eingabefeld existiert ein kleiner Hilfe-Text, der bei Verweilen des Mauszeigers auf dem Feld erscheint. Mit einem Mausklick auf die Taste „rechnen“ wird der Lösungsvorgang gestartet und es erscheint die gesuchte Wandstärke des Druckbehälters in dem dafür vorgesehenen roten Ergebnis-Ausgabefeld. Für den in unserem Beispiel spezifizierten kugelförmigen Druckbehälter wird eine Wandstärke von 5,5 mm errechnet.

2.5 ExTools

Das Programm ExTools dient sowohl als Datenbank für sicherheitstechnische Kenngrößen als auch als Tool zur Umrechnung dieser Kenngrößen. Als Beispiel betrachten wir den Betreiber eines Trockenturms, der seinen Turm gegen Staubexplosionen durch die Anbringung von Explosionsklappen schützen möchte. Im Trockenturm herrscht permanent eine Betriebstemperatur von 100°C . Die sicherheitstechnischen Kenngrößen, die er bei der Dimensionierung

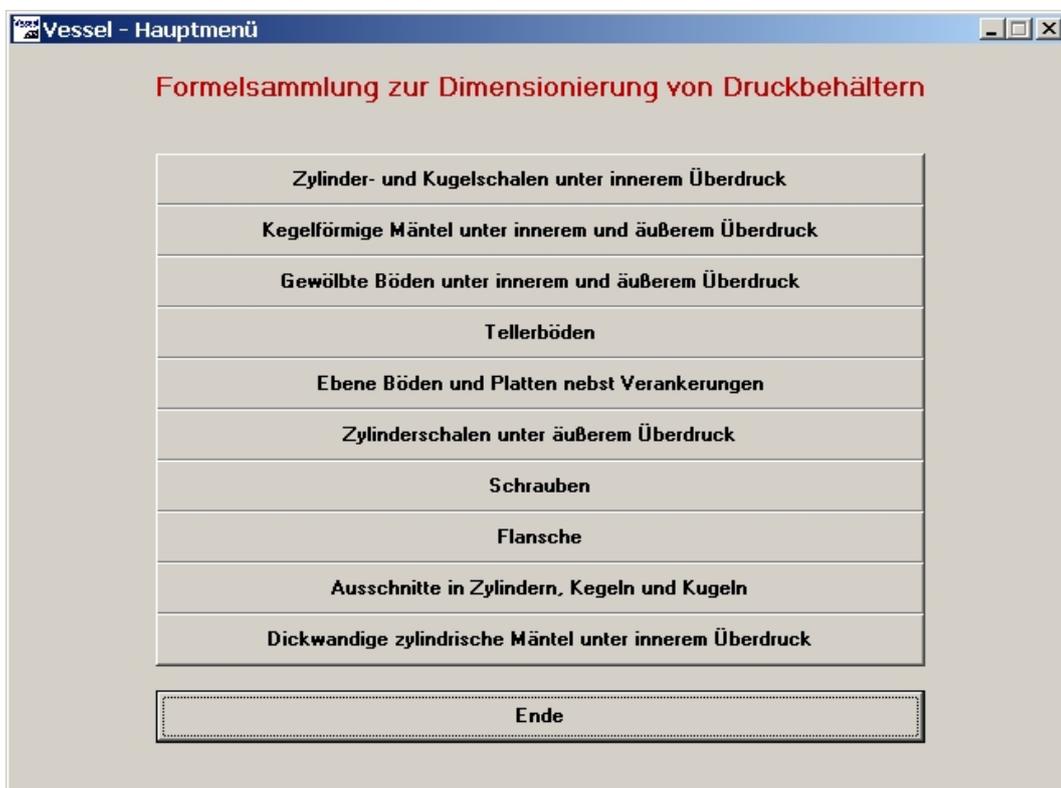


Abbildung 2.16: Das Hauptmenü von Vessel.

Vessel – Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck

Außendurchmesser D_a : [mm]

Überdruck p : [bar]

Festigkeit K : [N/mm²]

Verschwächung v :

Sicherheitsbeiwert S :

Wanddickenunterschreitungszuschlag c_1 : [mm]

Abnutzungszuschlag c_2 : [mm]

Berechnung

Zylinderschale

Kugelschale

$$s = \frac{D_a \cdot p}{40 \cdot K / S \cdot v + p} + c_1 + c_2$$

rechnen

Protokoll

zurück

Die Mindestwandstärke beträgt 2 mm bzw. 3 mm für Aluminium und dessen Legierungen.

s = 5,48 mm

Abbildung 2.17: Vessel-Fenster zur Dateneingabe für die Berechnung von Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck.

der Explosionsklappen berücksichtigen muss und die er für Normbedingungen aus Nachschlagewerken oder der ExTools-Datenbank entnimmt, hängen von äußeren Parametern wie etwa der Temperatur ab. Wie, das ist in ExTools in Form diverser Algorithmen hinterlegt. In unserem Beispiel will der Betreiber wissen, wie sich der maximale Explosionsdruck p_{\max} für das im Turm zu trocknende staubförmige Produkt aufgrund der Betriebstemperatur verändert. Dazu klickt er mit der Maus auf die Taste „ExTools“ im ExProtect-Hauptmenü (Abb. 2.1). Es öffnet sich das Hauptmenü von ExTools (Abb. 2.18).

Um zu berechnen, wie sich der maximale Explosionsdruck für das Produkt mit der Umgebungstemperatur ändert, klickt er auf die Taste „Explosion Indices“. Dadurch öffnet sich das Fenster, welches in Abb. 2.19 gezeigt ist. Aus dem Menü der verschiedenen Berechnungsmethoden wählt er das zweite von oben „Pmax: influence of temperature“.

In das sich nun öffnende Fenster ist der maximale Explosionsdruck bei Normbedingungen einzugeben und die Umgebungstemperatur. Ein Mausklick auf die Taste mit dem grünen Haken startet die Berechnung. Das Ergebnis der Berechnung wird in dem grün unterlegten Feld angezeigt. In unserem Fall sinkt der maximale Explosionsdruck von 9 bar auf 7,3 bar durch die Umgebungstemperatur von 100 °C.

Mit ExTools können noch einige andere, äußerst nützliche Berechnungen im Zusammenhang mit dem angewandten Explosionsschutz durchgeführt werden.



Abbildung 2.18: Das Hauptmenü von ExTools.

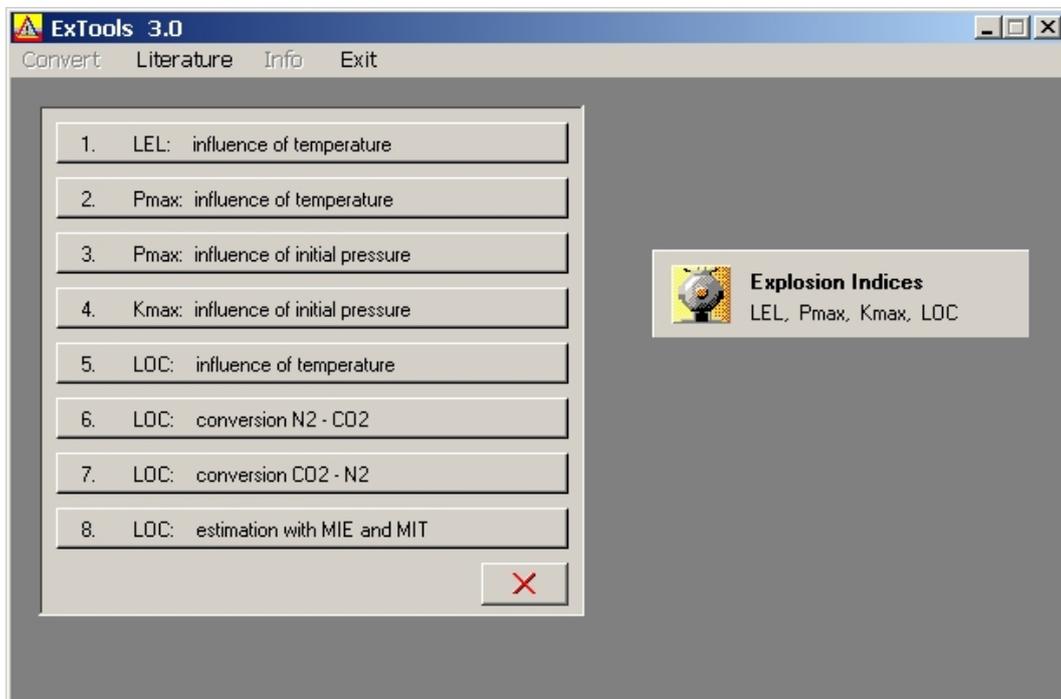


Abbildung 2.19: Das Menü des Programmtteils „Explosion Indices“. Der zweite Menü-Eintrag von oben führt zum Algorithmus zur Berechnung des Einflusses der Umgebungstemperatur auf den maximalen Explosionsdruck.

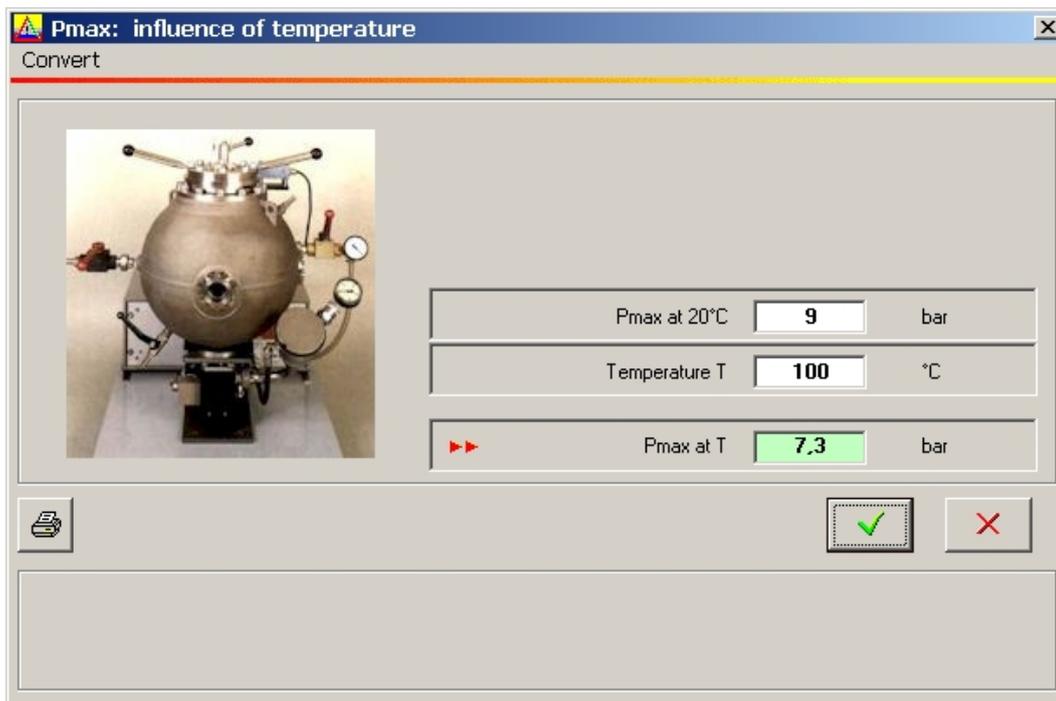


Abbildung 2.20: Das ExTools-Fenster zur Berechnung der Abhängigkeit des maximalen Explosionsdruckes p_{\max} von der Umgebungstemperatur. Der maximale Explosionsdruck von 9 bar verringert sich bei einer Umgebungstemperatur von 100 °C auf 7,3 bar.

Literaturverzeichnis

- [1] M. SEITHEL: *Deckelabsprengung am liegenden und stehenden 1 m³-Behälter mit unterschiedlichen Deckelmassen*, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 1993.
- [2] D. LORENZ, H. OTT, M. SEITHEL: *Untersuchung zur Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln beim Entlastungsvorgang*, Bericht Nr. F-05-9304/05 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1996.
- [3] D. LORENZ: *ExProtect - A software response to important questions on safety in dust and gas explosions*, Proceedings of the 3rd worldwide seminar on the explosion phenomenon and on the application of explosion protection techniques in practice, Ghent, Belgium, 1999.
- [4] 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, 1993.
- [5] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 0.5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1994.
- [6] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 1.0*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1993.
- [7] F. KOSSEBAU: *Funktionsprüfung einer Explosionsentlastungsklappe, Typenbezeichnung RLE-S 1.5*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 1993.
- [8] R. SIWEK; O. SKOV: *Modellberechnung zur Dimensionierung von Explosionsklappen auf der Basis von praxisnahen Explosionsversuchen*, VDI Berichte, **701**, 569-616, VDI Verlag, 1988.
- [9] A. HARMANNY: *Einfluss der Massenträgheitskräfte auf die Entlastungsfähigkeit von Explosionsklappen*, VDI Berichte, **975**, 273-284, VDI Verlag, 1992.
- [10] VDI 3673: *Druckentlastung von Staubexplosionen*, VDI Verlag, 1995.
- [11] VDI 3673: *Druckentlastung von Staubexplosionen*, VDI Verlag, 2002.
- [12] D. LORENZ, S. RADANDT: *Trümmerflug in der Umgebung von Staubexplosionsherden – Vergleich zwischen Modellrechnung und Explosionsereignissen*, VDI Berichte, **1272**, 347-364, VDI Verlag, 1996.

- [13] K. HÖPPNER: *Measurement of pressure blast effects and fireball sizes from vented dust explosions in rooms*, CREDIT-Project of the European Commission Final Report, 293-354, 1995.
- [14] G. E. JONES, J. E. KENNEDY, L. D. BERTHOLF: *Ballistics calculations of R. W. Gurney*, Am. J. Phys., **48**, 264-269, 1980.
- [15] R. ZURMÜHL: *Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker*, Springer Verlag, 5. Auflage, 1965.
- [16] K. H. DECKER: *Maschinenelemente*, Carl Hanser Verlag, 10. Auflage, 1990.
- [17] DIN-TASCHENBUCH 59: *Drahtseile*, Beuth Verlag, 5. Auflage, 1990.
- [18] K. FEYRER: *Drahtseile*, Springer Verlag, 1994.
- [19] F. HAUERT, A. VOGL: *Measurements of dust cloud characteristics in industrial plants*, Proceedings of the Dust Explosion Conference, London, CREDIT-Project of the European Commission, 1995.
- [20] F. HAUERT, A. VOGL, S. RADANDT: *Measurement of turbulence and dust concentration in silos and vessels*, Proceedings of the 6th International Colloquium on Dust Explosions, Shenyang, China, 71-80, X. Deng and P. Wolański editors, 1994.
- [21] F. HAUERT, A. VOGL, S. RADANDT: *Dust cloud characterization and its influence on the pressure-time-history in silos*, Process Safety Progress, **15**, No. 3, 178-184, 1996.
- [22] NFPA 68: *Venting of deflagrations*, 1988.
- [23] G F. KINNEY, K. J. GRAHAM: *Explosive shocks in air*, Springer Verlag, 1985.
- [24] W. BARTKNECHT: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, 1993.
- [25] TRD 303: *Kugelschalen und gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck*, 1991.
- [26] TÜV: *AD-Merkblätter*, Carl Heymanns und Beuth Verlag, 1995.
- [26] PREN 14491: *Dust Explosion Venting Protective Systems*, Layout for Final Draft, December 2004.