

Experimentelle Verifizierung
von Baumusterprüfungen
im Modellmaßstab

F-05-0901

Experimentelle Verifizierung von
Baumusterprüfungen im Modellmaßstab

Masterarbeit

von

Pavlo Chupin

Hochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

Mannheim, Juli 2009

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Mannheim, 13. Juli 2009

(Pavlo Chupin)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
1.1 Allgemeines	3
1.2 Projekt Nr. F-05-0901	4
1.3 Zielsetzung	5
2 Theoretische Grundlagen	6
2.1 Berechnung der Scharnierbelastung	6
2.2 Simulieren von K_{St} -Werten	7
2.3 Berechnung des statischen Ansprechdrucks p_{stat}	8
3 Vorbereitung der Versuche	10
3.1 Auswahl der Behälter	10
3.2 Auffinden geeigneter Versuchsparameter	11
3.3 Konstruktion der Druckentlastungsklappen	13
3.4 Einstellen des statischen Ansprechdrucks p_{stat}	17
4 Experimenteller Teil	19
4.1 Versuche am 1 m ³ -Behälter	19
4.1.1 Einstellen des K_{St} -Wertes	19
4.1.1.1 Bestimmung des statischen Ansprechdrucks der Folie	19
4.1.1.1.1 Versuchsaufbau	19
4.1.1.1.2 Versuchsdurchführung	20
4.1.1.1.3 Versuchsergebnisse und -auswertung	20
4.1.1.2 Versuchsaufbau	21
4.1.1.3 Versuchsdurchführung	22
4.1.1.4 Versuchsergebnisse	22

4.1.1.5	Auswertung und Diskussion	22
4.1.2	Versuche mit Druckentlastungsklappe	22
4.1.2.1	Versuchsaufbau	22
4.1.2.2	Versuchsdurchführung	25
4.1.2.3	Versuchsergebnisse	25
4.1.2.4	Auswertung und -diskussion	27
4.2	Versuche am 27 m ³ -Behälter	31
4.2.1	Einstellen des K_{St} -Wertes	31
4.2.1.1	Bestimmung des statischen Ansprechdrucks der Folie	31
4.2.1.1.1	Versuchsaufbau	31
4.2.1.1.2	Versuchsdurchführung	31
4.2.1.1.3	Versuchsergebnisse und -auswertung	31
4.2.1.2	Versuchsaufbau	33
4.2.1.3	Versuchsdurchführung	33
4.2.1.4	Versuchsergebnisse	34
4.2.1.5	Auswertung und Diskussion	34
4.2.2	Versuche mit Druckentlastungsklappe	34
4.2.2.1	Versuchsaufbau	34
4.2.2.2	Versuchsdurchführung	36
4.2.2.3	Versuchsergebnisse	36
4.2.2.4	Auswertung und -diskussion	37
5	Diskussion der Ergebnisse und Ausblick	42
5.1	Diskussion der Ergebnisse	42
5.1.1	Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander	42
5.1.1.1	Vergleich der Versuchsreihen F4-F5 und C2-C8	42
5.1.1.2	Vergleich der Versuchsreihen F1-F3 und C2-C8	43
5.1.1.3	Vergleich der Versuchsreihen F1-F3 und C9-C12	44
5.1.1.4	Vergleich der Versuchsreihen F4-F5 und C9-C12	44
5.1.1.5	Vergleich der Versuchsreihen F und C	44
5.1.2	Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Vorhersagen von Ex-Protect	45
5.2	Ausblick	46
5.2.1	Statischer Ansprechdruck durch Kunststofffolien	46
5.2.2	Statischer Ansprechdruck durch Kunststoffschrauben	46

A Messergebnisse	48
B Grafiken	51
C Konstruktionszeichnungen	56

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m	Druckentlastungsklappenseite senkrecht zur Rotationsachse
a_E	m	Seitenlänge einer quadratischen Druckentlastungsöffnung
A	m ²	Fläche
A_E	m ²	Druckentlastungsfläche
b	m	Druckentlastungsklappenseite parallel zur Rotationsachse
c	m	Stärke der Druckentlastungsklappe bzw. Stahlplattendicke
c_S	g/m ³	Staubkonzentration
d	mm	Stärke eines Scharnierbolzens
d_S	mm	Schraubendurchmesser
d_F	mm	Stärke einer Kunststofffolie
D	m	Durchmesser eines Behälters
\vec{D}, D	N · m	Vektor und Betrag des Drehmomentes
F_B	N	Schraubenbruchlast
\vec{F}_i	N	Vektor, der am Ort i angreifenden Kraft
F_r	N	radiale Komponente der Gesamtkraft auf die Klappenscharniere
F_{rel}	N	relative Luftfeuchtigkeit
\vec{F}_S	N	Vektor, der am Schwerpunkt angreifenden Kraft
F_g	N	Gesamtkraft auf die Klappenscharniere
$F_{g, \text{max}}$	N	maximale Gesamtkraft auf die Klappenscharniere
$\bar{F}_{g, \text{max}}$	N	mittlere maximale Gesamtkraft auf die Klappenscharniere
F_t	N	tangentiale Komponente der Gesamtkraft auf die Klappenscharniere
i	-	Index
K_{St}	bar · m/s	sicherheitstechnische Kenngröße K_{St}
l_1, l_2	mm	Abstände zwischen Klappendrehachse und Bohrungen
L	m	längste Lineardimension im Behälter ausgehend von der Mitte der Druckentlastungsfläche
n	-	Schraubenanzahl
m	kg	Masse
p	bar	Druck
p_{dyn}	bar	dynamischer Ansprechdruck, d. h. der Druck, bei dem eine Druckentlastungsklappe bei einer Explosion im Behälterinnern tatsächlich öffnet

\bar{p}_{dyn}	bar	mittlerer dynamischer Ansprechdruck
p_{max}	bar	maximaler Überdruck im geschlossenen Behälter
p_{red}	bar	reduzierter Überdruck, d. h. maximaler Überdruck im druckentlasteten Behälter
\bar{p}_{red}	bar	mittlerer reduzierter Überdruck
$p_{\text{red, max}}$	bar	maximaler reduzierter Überdruck, d. h. maximaler Überdruck im druckentlasteten Behälter bei zündwilligster Staubkonzentration
p_{stat}	bar	statischer Ansprechdruck, d. h. der Druck, bei dem eine Druckentlastungsklappe öffnen soll
\bar{p}_{stat}	bar	mittlerer statischer Ansprechdruck
dp/dt_{red}	bar/s	maximaler zeitlicher Druckanstieg im druckentlasteten Behälter
$\overline{dp/dt}_{\text{red}}$	bar/s	mittlerer maximaler zeitlicher Druckanstieg im druckentlasteten Behälter
q	-	Maßstab, Sollmaßstab
q_i	-	Istmaßstab
\vec{r}_i, r_i	m	Abstandsvektor bzw. Abstand zwischen Klappendrehachse und dem Ort i
\vec{r}_S	m	Abstandsvektor zwischen Klappendrehachse und -schwerpunkt
S	m	Abstand vom Schwerpunkt zur Drehachse
t	s	Zeit
$t_{\ddot{O}}$	s	Klappenöffnungsdauer
$\bar{t}_{\ddot{O}}$	s	mittlere Klappenöffnungsdauer
t_v	s	Zündverzögerungszeit, d. h. Zeitspanne zwischen Einblasen und Zünden eines Staub/Luft-Gemisches
T		Temperatur
V	m ³	Volumen
x, y, z	m	kartesische Koordinaten
φ	rad, °	Klappenöffnungswinkel
$\dot{\varphi}$	rad/s	Klappenwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$	rad/s ²	Klappenwinkelbeschleunigung
ρ	kg/m ³	Dichte
Θ_S	kg · m ²	Trägheitsmoment einer Entlastungsklappe bei durch den Schwerpunkt laufender Rotationsachse

Vorwort

Diese Masterarbeit entstand bei der Forschungsgesellschaft für angewandte System-sicherheit und Arbeitsmedizin e. V. (FSA) unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Wolfgang Schmitt. Die Arbeit zeigt eine Lösungsmethode für ein hoch aktuelles Problem der Sicherheitstechnik in der modernen Industrie auf.

Ich möchte mich herzlich bei allen bedanken, die mich während dieser Arbeit un-terstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Dirk Lorenz für die Möglichkeit bedanken, in sei-ner Arbeitsgruppe diese Masterarbeit anzufertigen. Nicht zuletzt durch die freundliche und engagierte Betreuung hat mir diese Arbeit viel Freude bereitet. Die vorliegen-
de Arbeit wurde in sehr angenehmer Arbeitsatmosphäre angefertigt, wobei ich starke Unterstützung bei kleinen und großen Problemen erfuhr. Dabei sind sowohl die große Hilfsbereitschaft als auch die tiefen Kenntnisse von Herrn Dirk Lorenz hervorzuheben. Bei ihm und auch Frau Madlen Schoenherr möchte ich mich auch für das Korrekturle-
sen dieser Arbeit bedanken.

Mein Dank gilt auch den Kollegen des BGN-Versuchsfeldes in Kappelrodeck (Schwarz-
wald), mit deren Hilfe die durchgeführten Versuchsreihen reibungslos und routiniert abgewickelt werden konnten. Besonders ist hier Herr Peter Schepp zu nennen.

Außerdem gilt mein Dank den Herren Helmut Ott, Michael Seithel und Hermann Schiebler, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Abschließend möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Siegfried Radandt bedanken, der mir in seiner Eigenschaft als Geschäftsführer der FSA e. V. den Arbeitsplatz zur Verfügung stellte.

Zusammenfassung

Dieses Manuskript beschreibt die 6 Monate dauernde Arbeit am Projekt Nr. F-05-0901 „Experimentelle Verifizierung von Baumusterprüfungen im Modellmaßstab“ der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V..

Druckentlastungseinrichtungen sind Schutzsysteme im Sinne der ATEX 94/9/EG und müssen deshalb einer Baumusterprüfung, d. h. einer experimentellen Prüfung, unterzogen werden. Dabei tritt gelegentlich das Problem auf, dass Druckentlastungseinrichtungen sehr großer Dimension auf Grund ihrer Größe mit den Mitteln der existierenden Versuchsfelder nicht geprüft werden können. Dieses Projekt dient dazu, um die Durchführbarkeit von Baumusterprüfung solch großer Druckentlastungseinrichtungen im Modellmaßstab experimentell zu bestätigen.

Es werden zwei Druckentlastungsklappen für einen 1 m^3 - und einen 27 m^3 -Behälter angefertigt. Diese Druckentlastungsklappen sind geometrisch ähnlich und unterscheiden sich lediglich durch den Verkleinerungsmaßstab $3 : 1$. Da Volumen mit der 3. Potenz des Maßstabes beim Übergang in den Modellmaßstab schrumpft, gilt der Maßstab 3 auch für die Behälter, nämlich $27 : 1$.

An beiden Behältern werden Explosionsversuche mit Mehlstaub mit einem simulierten K_{St} -Wert von $100\text{ bar} \cdot \text{m/s}$ durchgeführt. Der zeitliche Druckverlauf $p(t)$ und der Öffnungswinkel der Klappen über der Zeit $\varphi(t)$ werden gemessen. Aus den Druckverläufen $p(t)$ werden die maximalen reduzierten Überdrücke p_{red} und die maximalen zeitlichen Druckanstiege dp/dt_{red} abgeleitet. Aus den gemessenen zeitlichen Winkelverläufen $\varphi(t)$ werden die Öffnungsdauern der Klappen $t_{\ddot{O}}$ für $\varphi(t) = 0^\circ \dots 90^\circ$ bestimmt sowie die maximale Belastung $F_{g,max}$ auf die Klappenscharniere.

Wenn die realen Verhältnisse bzw. physikalischen Abläufe auf den Modellmaßstab und umgekehrt übertragbar sind, wenn also dynamische Ähnlichkeit herrscht, dann müssen die in den Experimenten bestimmten Größen p_{red} , dp/dt_{red} , $t_{\ddot{O}}$ und $F_{K,max}$ paarweise in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen (Tabelle 1).

Physikalische Größe	$t_{\ddot{O}}$	$F_{g,max}$	p_{red}	dp/dt_{red}
Verhältnis Realität/Modell	3	9	1	1/3

Tabelle 1: Verhältnisse der einzelnen Messgrößen der Versuche am 27 m^3 - und 1 m^3 -Behälter zueinander wenn dynamische Ähnlichkeit gegeben ist.

Im Rahmen der Messgenauigkeit werden die Verhältnisse aus Tabelle 1 experimentell bestätigt. Damit ist bewiesen, dass Baumusterprüfungen sehr großer Druckentlastungseinrichtungen im Modellmaßstab durchgeführt werden können!

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

In der Nahrungsmittelindustrie gehört die Verarbeitung brennbarer Stäube zum täglichen Geschäft. Aufgrund ihrer Brennbarkeit besteht deshalb überall dort Explosionsgefahr, wo diese Stäube aufgewirbelt und gleichzeitig Zündquellen nicht ausgeschlossen werden können und wo Luft bzw. Sauerstoff vorhanden ist. Deshalb müssen Explosionsschutzmaßnahmen an solchen Anlagen ergriffen werden. Eine mögliche Methode ist dabei der konstruktive Explosionsschutz, der beispielsweise durch die Verwendung so genannter Druckentlastungseinrichtungen umgesetzt werden kann. Dabei wird in die Außenwand des zu schützenden Behälters oder Gebäudes eine Sollbruchfläche integriert, die bei Übersteigen eines definierten Innendruckwertes freigegeben wird. Diese Sollbruchflächen werden durch Druckentlastungsklappen oder Berstscheiben, zusammenfassend Druckentlastungseinrichtungen genannt, realisiert.

Druckentlastungseinrichtungen müssen gemäß ATEX 94/9/EG-Richtlinie das Baumusterprüfverfahren durchlaufen, bevor sie als Explosionsschutzeinrichtungen in konkreten Anwendungsfällen zugelassen werden. Die eigentliche Baumusterprüfung muss experimentell durchgeführt werden, z. B. auf dem Versuchsfeld der BGN in Kappelrodeck. In letzter Zeit wollen die Silobauer speziell für sehr große Lagersilos vermehrt selbst entwickelte Druckentlastungseinrichtungen integrieren. Dies ist eine wesentlich kostengünstigere Alternative als der Kauf und Einbau einer sehr viel größeren Anzahl von kleineren Druckentlastungseinrichtungen, die als geprüfte und zertifizierte Schutzsysteme am Markt erhältlich sind. Sowohl die Silobauer als auch die BGN standen jedoch vor dem Problem, dass der Nachweis der Funktionsfähigkeit dieser selbstentwickelten Druckentlastungseinrichtungen aufgrund ihrer Größe mit den Mitteln des Versuchsfeldes nicht erbracht werden konnte.

Verschiedene Forschungsgebiete unterscheiden sich oft stark durch die bearbeiteten Themen, zuweilen haben aber alle mit den gleichen Problemen zu tun: Zu große Dimension, um experimentell arbeiten zu können. In solchen Fällen verlegt man sich auf Experimente im Modellmaßstab. Bei der Verkleinerung der realen Verhältnisse in den Modellmaßstab ist es wichtig, dass die Vorgänge in der Natur im Modell physikalisch richtig wiedergegeben werden. Anderfalls ist es nicht möglich, die Ergebnisse aus

den Modellversuchen auf die realen Verhältnisse zu übertragen. Damit die Vorgänge im Modell richtig wiedergegeben werden, ist eine Ähnlichkeit zwischen Modell und Natur notwendig. Diese Ähnlichkeit erfordert zuerst einmal geometrische Ähnlichkeit. Darüber hinaus müssen die beiden Systeme - Modell und Natur - aber auch dynamisch ähnlich sein. Damit ein Modell dynamisch ähnlich zu den realen Verhältnissen ist, muss zunächst geometrische Ähnlichkeit herrschen. Das bedeutet, dass alle Längen um den Verkleinerungsfaktor q eingeschrumpft werden müssen. Wenn Längen um q schrumpfen, dann müssen Flächen um q^2 und Volumina um q^3 verkleinert werden. Geometrische Ähnlichkeit alleine ist aber nicht hinreichend, um dynamische Ähnlichkeit zu erreichen. Um diese zu erzielen muss gewährleistet sein, dass alle Kräfte im richtigen Maßstab verkleinert werden bzw. die Kräfteverhältnisse zueinander nicht verändert werden. Statische und dynamische Kräfte müssen sich beim Verkleinern mit dem Faktor q^2 verändern. Wenn die Kräfte mit q^2 schrumpfen, dann verändern sich auch die Zeitspannen, die physikalische Vorgänge im Modell benötigen. Im Modell laufen die physikalischen Vorgänge q -mal schneller ab als unter realen Verhältnissen. Andere mechanische Größen wie Druck, Spannung oder Geschwindigkeit ändern sich bei der Transformation in den Modellmaßstab nicht. In der nachfolgenden Tabelle 1.1 sind die Umrechnungsfaktoren für verschiedene relevante physikalische Größen zusammengefasst.

Größe	Länge	Fläche	Volumen	Geschwindigkeit
Faktor	q	q^2	q^3	1
Größe	Beschleunigung	Kraft	Gravitationskraft	Druck
Faktor	q^{-1}	q^2	q^3	1
Größe	Druckanstiegsgeschw.	Spannung	Temperatur	Zeit
Faktor	q^{-1}	1	1	q

Tabelle 1.1: Physikalische Größen und zugehörige Umrechnungsfaktoren, die bei einer Verkleinerung in den Modellmaßstab angewandt werden müssen, damit dynamische Ähnlichkeit zwischen Modell und Realität herrscht. q ist der Maßstab.

1.2 Projekt Nr. F-05-0901

Im Jahr 2008 wurden zwei Baumusterprüfungen von Druckentlastungsklappen im Modellmaßstab auf dem Versuchsgelände Kappelrodeck durchgeführt. In beiden Prüfungen wurde festgestellt, dass die vorgesehene Klappenkonstruktion nicht funktionierte, ja sogar gefährlich war und zur Zerstörung der Anlagen im Explosionsfall geführt hätte. Dies war eine sehr wichtige Erkenntnis, da in länger zurückliegenden Zeiten ähnliche Konstruktionen mangels besseren Wissens gelegentlich ohne Baumusterprüfung zugelassen wurden.

Mit den bei den Prüfungen gewonnenen Messdaten wurden theoretische Modellrechnungen durchgeführt, um zu verifizieren, ob dynamische Ähnlichkeit bei den Modellversuchen gegeben war. Dies lässt sich relativ einfach prüfen, indem man die Zeitspannen

miteinander vergleicht, die die Vorgänge im großen und kleinen Maßstab benötigen. Wenn sich - zumindest annähernd - der Faktor q ergibt, kann dynamische Ähnlichkeit angenommen werden [4]. Um ganz sicher zu gehen, dass tatsächlich dynamische Ähnlichkeit bei Baumusterprüfungen von Druckentlastungseinrichtungen vorherrscht, wurde das Projekt F-05-0901 ins Leben gerufen. Ziel des Projektes ist es, durch Experimente nachzuweisen, dass bei Baumusterprüfungen im Modellmaßstab dynamische Ähnlichkeit zwischen Modellversuchen und Realität herrscht.

1.3 Zielsetzung

Die Ziele dieser Arbeit sind im Folgenden stichpunktartig zusammengestellt:

1. Einarbeitung in die theoretischen Grundlagen.
2. Ausfindig machen geeigneter Prüfbehälter auf dem Versuchsfeld der BGN/FSA in Kappelrodeck und Bestimmung des Maßstabes.
3. Ermitteln geeigneter Versuchsparameter und Simulation der Versuche mit dem Programm ExProtect 4.3.1 der FSA.
4. Konstruktion und Bau von Druckentlastungsklappen für die beiden Prüfbehälter.
5. Aufbau und Durchführung der Versuche.
6. Bestimmung und Vergleich von $t_{\ddot{O}}$, $F_{g,\max}$, p_{red} und dp/dt_{red} .

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Berechnung der Scharnierbelastung

Da in dieser Arbeit die maximale Belastung auf Druckentlastungsklappenscharniere betrachtet werden sollte, wurden Formeln zur Berechnung dieser Belastung bzw. Kraft benötigt. In [5] werden die radiale und tangential Komponente dieser Kraft abgeleitet (siehe Abb. 2.1). Die radiale Komponente ist gegeben durch

$$F_r(t) = m \cdot S \cdot \dot{\varphi}^2(t) \quad (2.1)$$

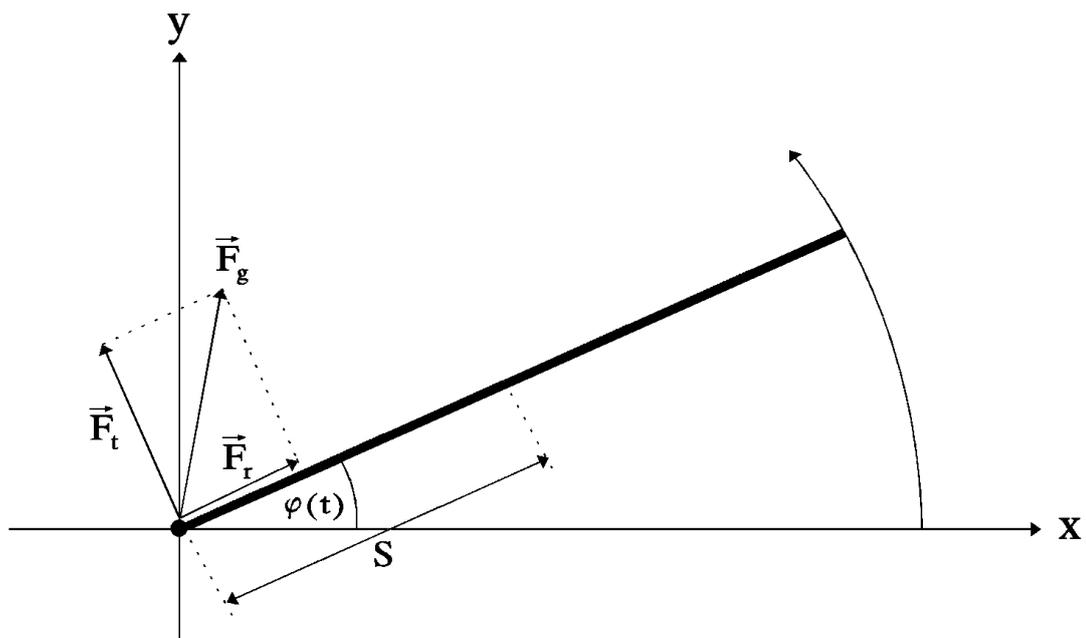


Abbildung 2.1: Skizze der am Scharnier einer Druckentlastungsklappe angreifenden Kräfte während des Öffnungsvorganges.

mit m als Klappenmasse, S als Abstand zwischen Rotationsachse der Klappe und deren Schwerpunkt und $\dot{\varphi}$ als Winkelgeschwindigkeit der Klappe. Wenn man die Masse der Scharniere vernachlässigt, kann

$$S = \frac{a}{2} \quad (2.2)$$

gesetzt werden mit a als Länge der Klappenseite senkrecht zur Rotationsachse.

Die tangentielle Komponente der Kraft wird mit

$$F_t(t) = \frac{\Theta_S}{S} \cdot \ddot{\varphi}(t) \quad (2.3)$$

angegeben, wobei $\ddot{\varphi}(t)$ die Winkelbeschleunigung der Klappe darstellt und Θ_S das Trägheitsmoment der Druckentlastungsklappe ist. Die Rotationsachse der Klappe läuft dabei durch den Schwerpunkt der Klappe und steht senkrecht auf der Klappenseite a . Für eine rechteckige Platte entnimmt man [3] für das Trägheitsmoment

$$\Theta_S = m \cdot \frac{a^2}{12} \quad (2.4)$$

Identifiziert man eine rechteckige Druckentlastungsklappe näherungsweise mit einer rechteckigen Platte, so ergibt sich für die tangentielle Komponente der Scharnierbelastung mit Hilfe von (2.4)

$$F_t(t) = \frac{m \cdot a^2}{12 \cdot S} \cdot \ddot{\varphi}(t) \quad (2.5)$$

Für die gesamte Scharnierbelastung folgt damit

$$F_g(t) = \sqrt{(m \cdot S \cdot \dot{\varphi}^2(t))^2 + \left(\frac{m \cdot a^2}{12 \cdot S} \cdot \ddot{\varphi}(t)\right)^2} \quad (2.6)$$

wie man auch Abbildung 2.1 entnehmen kann.

2.2 Simulieren von K_{St} -Werten

Maßgeblich für die Explosionsheftigkeit von Staub/Luft-Gemischen in geschlossenen Behältern ist der maximale zeitliche Druckanstieg dp/dt_{\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 dp/dt_{\max} nach dem sogenannten kubischen Gesetz mit dem Volumen des Behälters.

$$K_{St} = \frac{dp}{dt_{\max}} \cdot \sqrt[3]{V} \quad (2.7)$$

Die sicherheitstechnische Kenngröße K_{St} ist deshalb die Kenngröße eines Staubes, die den maximalen zeitlichen Druckanstieg beschreibt, den ein explodierendes Gemisch aus Luft und eben diesem Staub bei gegebenen Behältervolumen V unter optimalen Bedingungen hervorruft [1, 2, 5].

Auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck sollten an zwei verschieden großen Behältern Explosionsversuche durchgeführt werden mit einem definierten Wert der sicherheitstechnischen Kenngröße K_{St} . Da auf dem Versuchsfeld aus Verfügbarkeits- und Kostengründen nur Maisstärke und Weizenmehl als Teststäube verwendet werden, wäre man auf die beiden K_{St} -Werte dieser Stäube festgelegt, würde man nicht durch einen experimentellen „Trick“ andere K_{St} -Werte einstellen (simulieren) können. Um einen mehr oder weniger beliebigen K_{St} -Wert in einem vorhandenen Behälter mit dem Volumen V bei gegebener Druckentlastungsfläche A_E zu erzielen, werden die Versuchsparameter Staubkonzentration c_S und Zündverzögerungszeit t_v variiert. Dies geschieht so lange bis sich der gewünschte K_{St} -Werte gemäß

$$A_E = B \cdot (1 + C \cdot \log(L/D)) \quad (2.8)$$

mit

$$B = (3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\max} \cdot K_{St} \cdot p_{\text{red,max}}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{\text{stat}} - 0,1) \cdot p_{\text{red,max}}^{-0,5}) \cdot V^{0,753} \quad (2.9)$$

und

$$C = (-4,305 \cdot \log(p_{\text{red,max}}) + 0,758) \quad (2.10)$$

einstellt. Mit anderen Worten: t_v und c_S werden so lange verändert, bis (2.8) mit gewünschtem K_{St} -Wert für den gegebenen Behälter und seiner Druckentlastungsfläche gilt. Der statische Ansprechdruck p_{stat} wird dabei realisiert, indem die Druckentlastungsfläche mit einer Kunststofffolie bekannter Festigkeit verschlossen wird. $p_{\text{red,max}}$ ist der reduzierte Überdruck, den ein Staub/Luft-Gemisch zündwilligster Staubkonzentration in einem druckentlasteten Behälter erzeugt. L/D beschreibt das Verhältnis aus der längsten Lineardimension im Behälter ausgehend von der Mitte der Druckentlastungsfläche und dem Durchmesser des Behälters. Die Formeln (2.8) bis (2.10) stammen aus der VDI Richtlinie 3673 aus dem Jahr 2002 [2] bzw. aus der EN 14491.

2.3 Berechnung des statischen Ansprechdrucks p_{stat}

Wie groß die Werte wie z. B. reduzierter Überdruck p_{red} bei einer Staubexplosion in einem druckentlasteten Behälter werden, hängt nicht nur von K_{St} -Wert und Entlastungsflächengröße A_E ab, sondern auch vom statischen Ansprechdruck p_{stat} . Das ist der Druck, ab dem sich die Druckentlastungsklappe öffnet. Je höher p_{stat} ist, desto höher ist p_{red} und umgekehrt. Da im Rahmen des FSA-Projektes Nr. F-05-0301 Untersuchungen zum statischen Ansprechdruck bei Verschluss von Druckentlastungsklappen mit Schrauben gemacht wurden, sollte auf diese Erfahrungen im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen werden.

Wenn man eine Druckentlastungsklappe, die einseitig an einem Scharnier geführt wird, mit Schrauben verschließt, ergeben sich die Verhältnisse aus Abbildung 2.2.

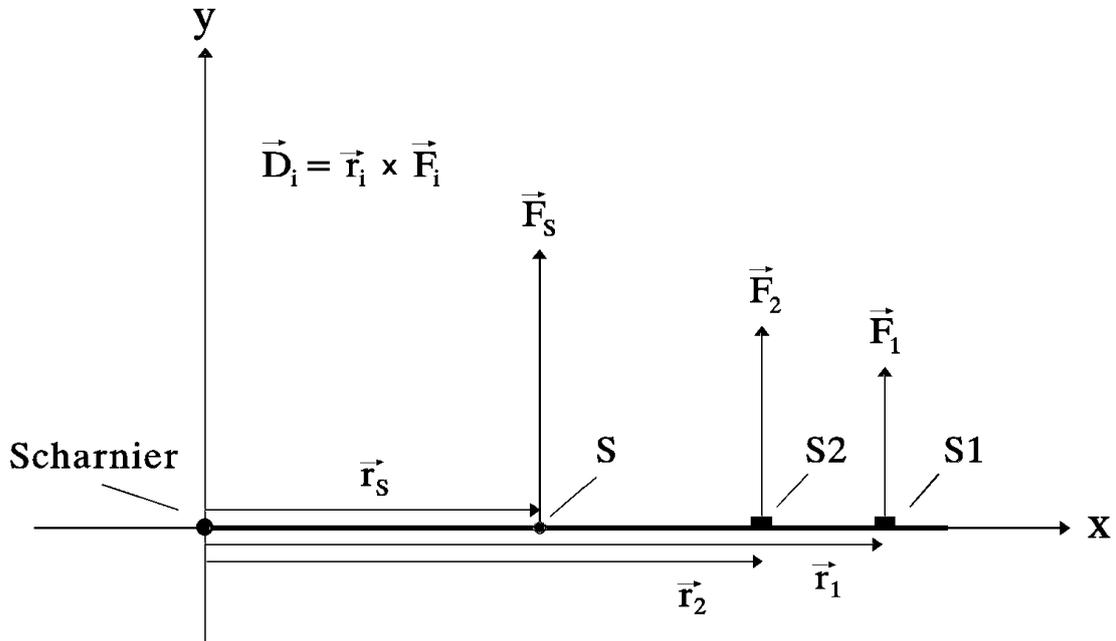


Abbildung 2.2: Skizze einer mit den Schrauben S1 und S2 verschlossenen Druckentlastungsklappe.

Der Druck im Inneren des Behälters auf die Druckentlastungsfläche A_E erzeugt eine Kraft, die dem Betrag nach

$$F_S = p \cdot A_E \quad (2.11)$$

ist und die am Schwerpunkt S der Klappe angreift. Diese Kraft verursacht das öffnend wirkende Drehmoment

$$|\vec{D}_S| = |\vec{F}_S \times \vec{r}_S| = F_S \cdot r_S = p \cdot A_E \cdot r_S \quad (2.12)$$

(2.12) gilt, weil \vec{F}_S und \vec{r}_S einen rechten Winkel zueinander bilden.

Diesem Drehmoment wirkt die Summe aller Drehmomente

$$\sum_i |\vec{D}_i| = \sum_i |\vec{F}_i \times \vec{r}_i| = \sum_i (F_i \cdot r_i) \quad (2.13)$$

entgegen, die die Verschlusschrauben erzeugen. Wenn die Drehmomente der Druckkraft und das Drehmoment der Schrauben gleich sind, ist p_{stat} erreicht. In diesem Fall sind die F_i gleich der Bruchlasten F_B der Schrauben. Es ergibt sich also

$$p_{\text{stat}} = \frac{\sum_i (F_B \cdot r_i)}{A_E \cdot r_S} \quad (2.14)$$

Kapitel 3

Vorbereitung der Versuche

3.1 Auswahl der Behälter

Nachdem die theoretischen Grundlagen erarbeitet wurden, die für diese Arbeit zwingend erforderlich waren, ging es gemäß der in Abschnitt 1.3 beschriebenen Zielsetzung nun daran, geeignete Versuchsbehälter für die anstehenden Versuche auszuwählen. Dazu wurden die Daten aller auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck vorhandenen Behälter erfasst [12]. Anschließend wurden die Behälter durchnummeriert und zusammen mit allen relevanten Daten in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Nr. [-]	1	2	3	4	5	6	7
V [m ³]	0,35	1,00	4,40	9,63	10,00	26,47	60,85
D [m]	0,500	0,950	1,395	2,000	2,400	3,164	3,790
L [m]	1,800	1,400	3,225	3,380	2,400	4,565	5,960
L/D [-]	3,600	1,474	2,312	1,690	1,000	1,443	1,573

Tabelle 3.1: Daten aller auf dem Versuchsfeld Kappelrodeck vorhandenen Behälter (Stand: Juni 2009).

Ziel war es, zwei gut zueinander passende Behälter zu finden. Das bedeutet, dass zum einen ein möglichst glatter Maßstab q erreicht werden sollte, der zum anderen bei möglichst allen relevanten Parametern umgesetzt werden konnte. Diese Forderungen erfüllen besonders gut die Behälter Nr. 2 und 6 (in der Tabelle 3.1 dick unterlegt). Vergleicht man die Daten beider Behälter, ergibt sich fast der Maßstab $q = 3$. Für das Behältervolumen ergibt sich nahezu der Umrechnungsfaktor $q^3 = 27$. Auch der Umrechnungsfaktor für das L/D -Verhältnis ist mit 0,98 geradezu ideal nah am Sollwert von 1. Aus diesem Grund wurden die beiden genannten Behälter für die Versuche ausgewählt und als Maßstab $q = 3$ angenommen. Im Folgenden werden die Behälter mit 1 m³- und 27 m³-Behälter bezeichnet.

3.2 Auffinden geeigneter Versuchsparameter

Um geeignete Werte für Druckentlastungsflächen, Klappenmassen, Klappenmaße, K_{St} -Werte, p_{red} und dp/dt zu finden, wurde das Programm ExProtect [6] - genauer das Modul SIMEK - benutzt (siehe Abb. 3.1). Letzteres basiert weitgehend auf den Ergebnissen von [5]. Ziel bei der Parametersuche war in erster Linie, einfach zu konstruierende Klappen zu generieren. Da die Klappen möglichst viele Versuche unbeschadet überstehen sollten, wurde bei der Arbeit mit SIMEK gleichzeitig darauf geachtet, dass der reduzierte Überdruck p_{red} nicht so hoch wird. Nach einigem Probieren stellten sich die Versuchsparameter in Tabelle 3.2 als guter Kompromiss heraus. Abschließend wurde mit SIMEK noch die maximale Belastung der Klappenscharniere $F_{g,max}$ abgeschätzt und die erforderliche Bolzenstärke d für die Scharniere. In der Tabelle sind weiterhin der Sollmaßstab q für die einzelnen physikalischen Größen angegeben sowie die Ist-Maßstäbe q_i , die sich aus der Simulationsrechnung ergaben. Man erkennt, dass zumindest gemäß der Simulationsrechnung dynamische Ähnlichkeit herrscht. In Abbildung 3.2 sind die mit SIMEK berechneten Öffnungswinkel der beiden Druckentlastungsklappen über der Zeit dargestellt. Auch hier erkennt man für die Öffnungsdauer $t_{\ddot{o}}$, dass fast genau der Sollmaßstab $q = 3$ herauskommt.

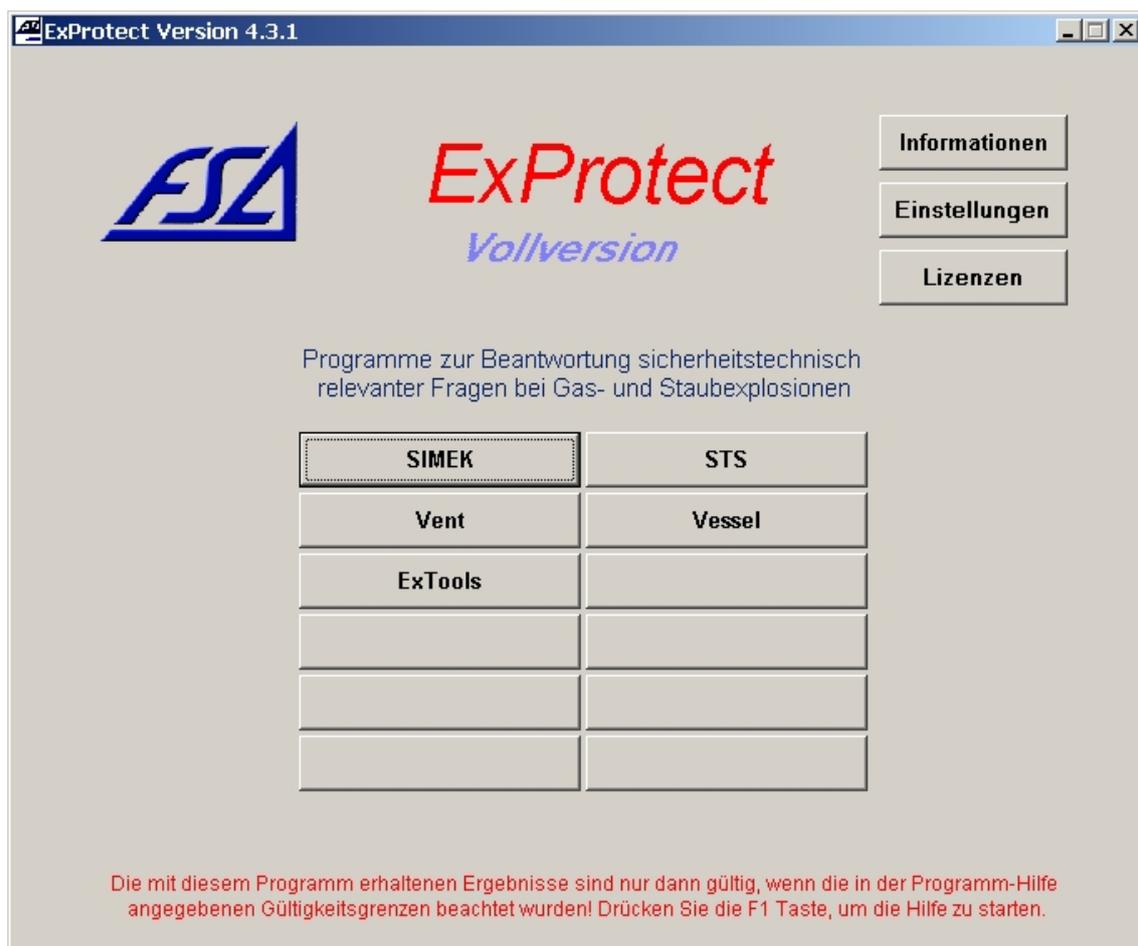


Abbildung 3.1: Hauptmenü des Programms ExProtect 4.3.1 der FSA.

	V [m ³]	K_{St} [bar · m/s]	p_{max} [bar]	p_{stat} [bar]	p_{red} [bar]	dp/dt_{red} [bar/s]
1	1,00	100	9,0	0,1	0,48	9,24
27	26,47	100	9,0	0,1	0,53	3,48
q_i	26,47	1	1	1	1,1	0,38
q	27	1	1	1	1	0,333
	a_E [m]	A_E [m ²]	m [kg]	$t_{\ddot{O}}$ [ms]	d [mm]	$F_{g,max}$ [kN]
1	0,25	0,0625	2,03	40	5	1,32
27	0,75	0,5625	54,81	122,5	15	12,02
q_i	3,0	9,0	27,0	3,06	3,0	9,1
q	3	9	27	3	3	9

Tabelle 3.2: Mit SIMEK ermittelte Parameter für die durchzuführenden Versuche. q und q_i sind der Soll- und der Istmaßstab. Zur Erklärung der weiteren Symbole siehe Symbolverzeichnis.

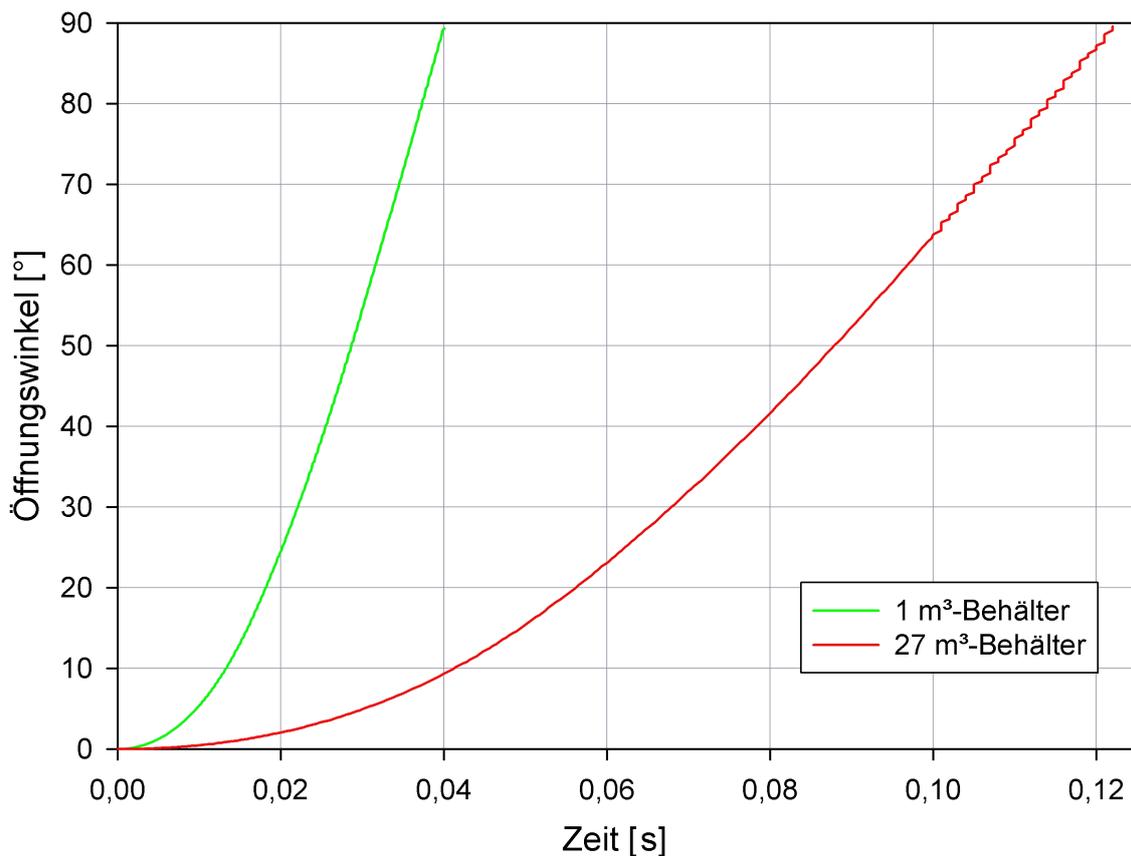


Abbildung 3.2: Mit SIMEK berechnete Klappenöffnungswinkel über der Zeit für den 1 m³- und den 27 m³-Behälter. Aus der Grafik liest man die Öffnungsdauer $t_{\ddot{O}} = 40$ ms für den 1 m³-Behälter und $t_{\ddot{O}} = 122,5$ ms für den 27 m³-Behälter ab.

3.3 Konstruktion der Druckentlastungsklappen

Durch die Berechnungsergebnisse aus dem vorigen Abschnitt 3.2 waren die physikalischen Eigenschaften der beiden zu konstruierenden Druckentlastungsklappen im Wesentlichen festgelegt. Bei der Konstruktion der Klappen mit Hilfe des Programmes AutoCAD sollte streng der Maßstab $q = 3$ eingehalten werden. Da die Klappen möglichst einfach und preiswert herzustellen, stabil sein und die Klappenträgheitsmomente gemäß (2.4) berechnet werden sollten, kam als Hauptbauteil für die Klappen nur eine rechteckige Stahlplatte in Frage (siehe Abb. 3.3, oben).

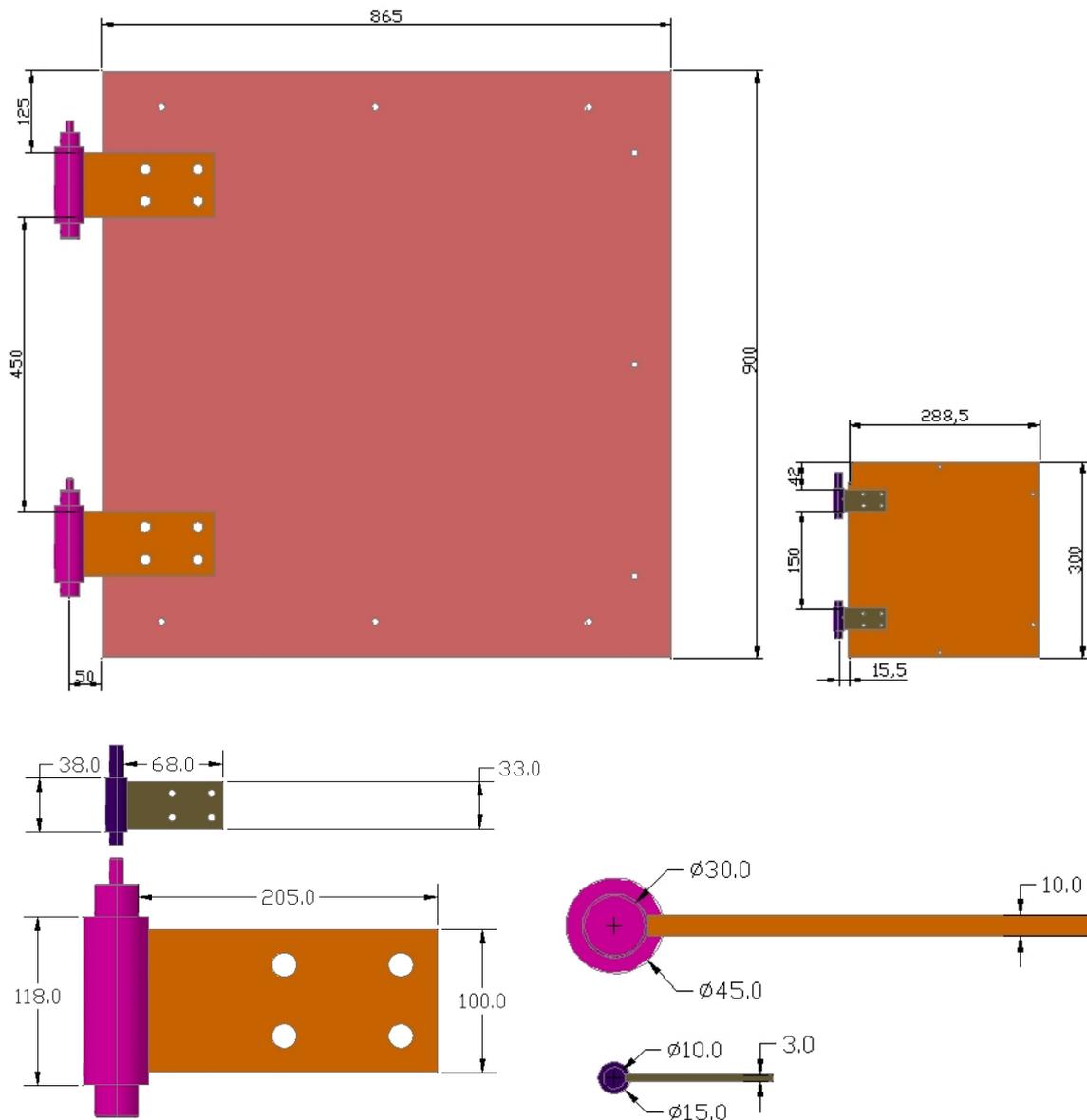


Abbildung 3.3: Zwei Druckentlastungsklappen im Maßstab 3 : 1 bestehend aus Stahlplatten und Scharnieren (oben). Zwei Flacheisen mit Bohrungen und angeschweißten Bolzen im Maßstab 3 : 1, die als Scharniere der Druckentlastungsklappen dienen sollten. Die einseitige Verlängerung der Bolzen dient dem Anschrauben des Inkrementaldrehgebers zur Messung des Klappenöffnungswinkels über der Zeit (unten).

Die Stärke der Stahlplatten beträgt $c = 9$ mm und entsprechend dem Verkleinerungsmaßstab $c = 3$ mm. Alle anderen wichtigen physikalischen Eigenschaften der Druckentlastungsklappen finden sich in Tabelle 3.3.

Auch die Scharniere sollten möglichst einfach herzustellen und stabil sein. Bei der Konstruktion der Scharniere wurde außerdem berücksichtigt, die Stahlplatten ohne großen Aufwand von den Scharnieren lösen zu können, falls die Platten sich bei den Versuchen verbiegen sollten. Die Scharnierteile, die an der Stahlplatte angebracht werden sollten, wurden deshalb als Flacheisen mit Bohrungen für die Schraubenaufnahme realisiert. An die Flacheisen wurde je ein Bolzen mit der erforderlichen Dicke d angeschweißt. Zusätzlich wurde jeweils eine Seite eines Bolzens durch einen Stift verlängert, an dem der Inkrementaldrehgeber für die Messung des Klappenöffnungswinkels in Abhängigkeit der Zeit angeschlossen werden sollte (siehe Abb. 3.3, unten).

Passend für die Klappen mussten Winkelprofile konstruiert werden, auf denen die Klappen aufliegen und die gleichzeitig die Druckentlastungsfläche repräsentieren sollten. In Abbildung 3.4 ist eine CAD-Grafik der beiden Winkelprofile gezeigt. Platten und Winkelprofile sind mit Bohrungen versehen, um die Klappen später im Experiment mit Schrauben verschließen zu können. Das Verschließen der Klappen mit Schrauben sollte der Realisierung des statischen Ansprechdruckes p_{stat} dienen und gleichzeitig verhindern, dass sich die Klappen schon beim Einblasen des Staub/Luft-Gemisches in die Behälter öffnen.

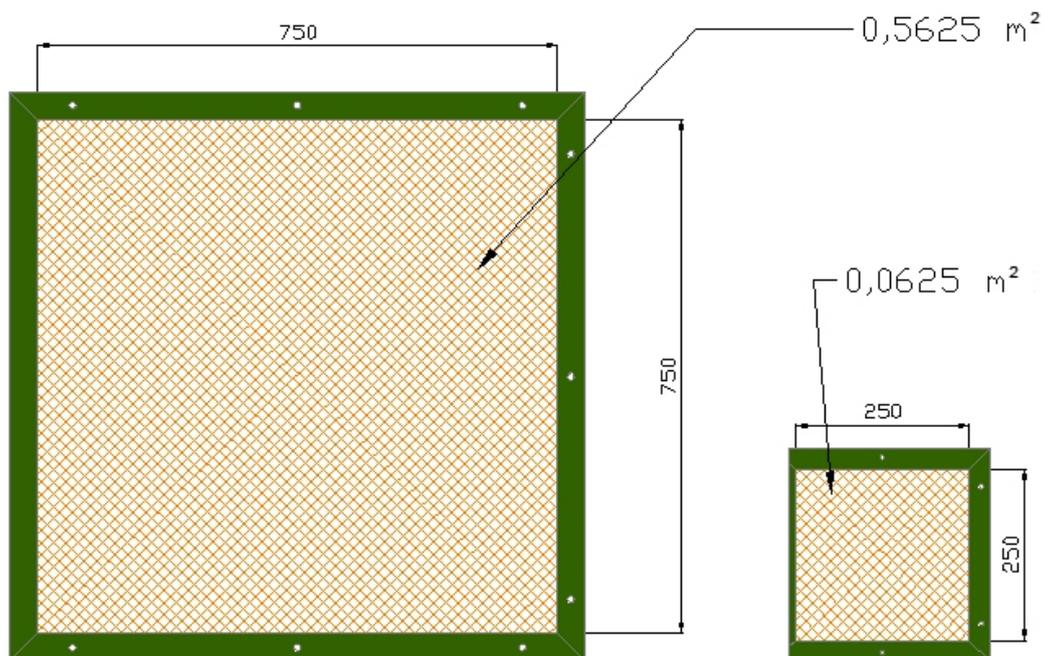
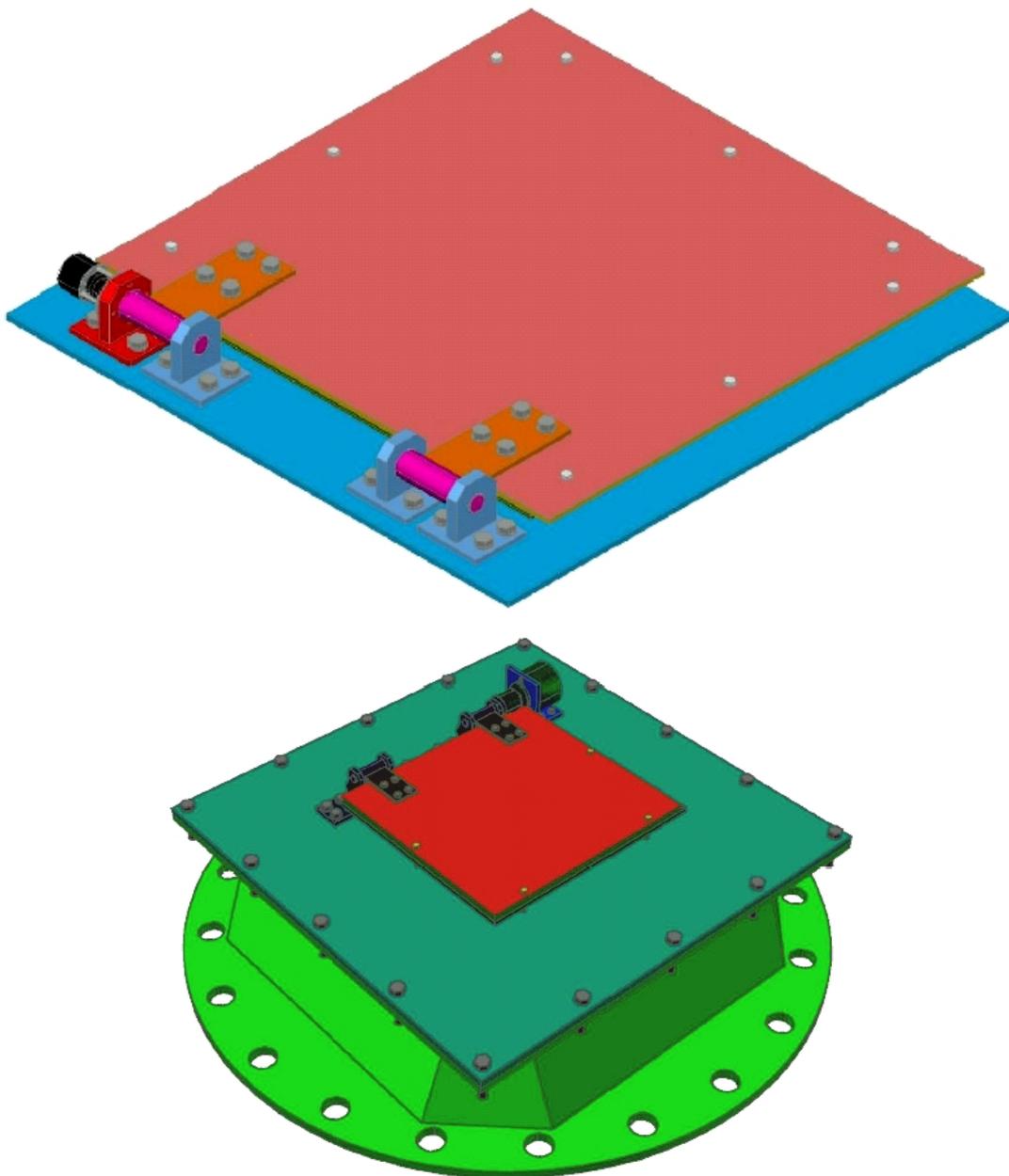


Abbildung 3.4: Winkelprofile für die Druckentlastungsklappen mit Flächenangaben. Die Seitenlängen und Flächeninhalte der Öffnungen sind proportional zueinander mit dem Faktor $q = 3$ bzw. $q^2 = 9$.

In den umseitigen Abbildungen 3.5 und 3.6 sind die fertig zusammengebauten Druckentlastungsklappen in Form einer weiteren CAD-Grafik und im Foto zu sehen. Alle Teile, auch die für die Scharniere, sind konsequent im Maßstab 3 : 1 entworfen worden.

	a [mm]	b [m]	c [m]	A_K [m ²]	m [kg]	d [mm]
1	0,288	0,3	0,003	0,0865	2,038	5
27	0,865	0,9	0,009	0,7785	55,00	15
q_i	3,0	3,0	3,0	9,0	26,98	3,0
q	3	3	3	9	27	3

Tabelle 3.3: Eigenschaften der beiden zu konstruierenden Druckentlastungsklappen.

Abbildung 3.5: 3D-CAD-Grafik der Druckentlastungsklappe für den 27 m³-Behälter (oben) und den 1 m³-Behälter (unten).

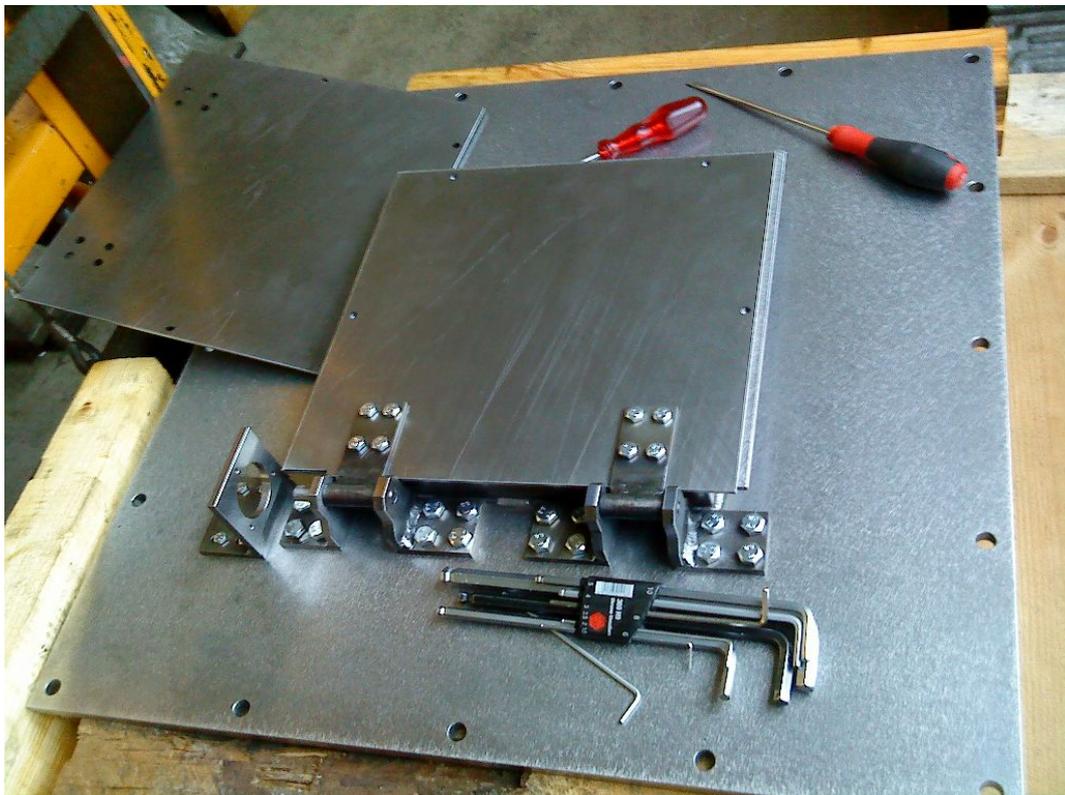
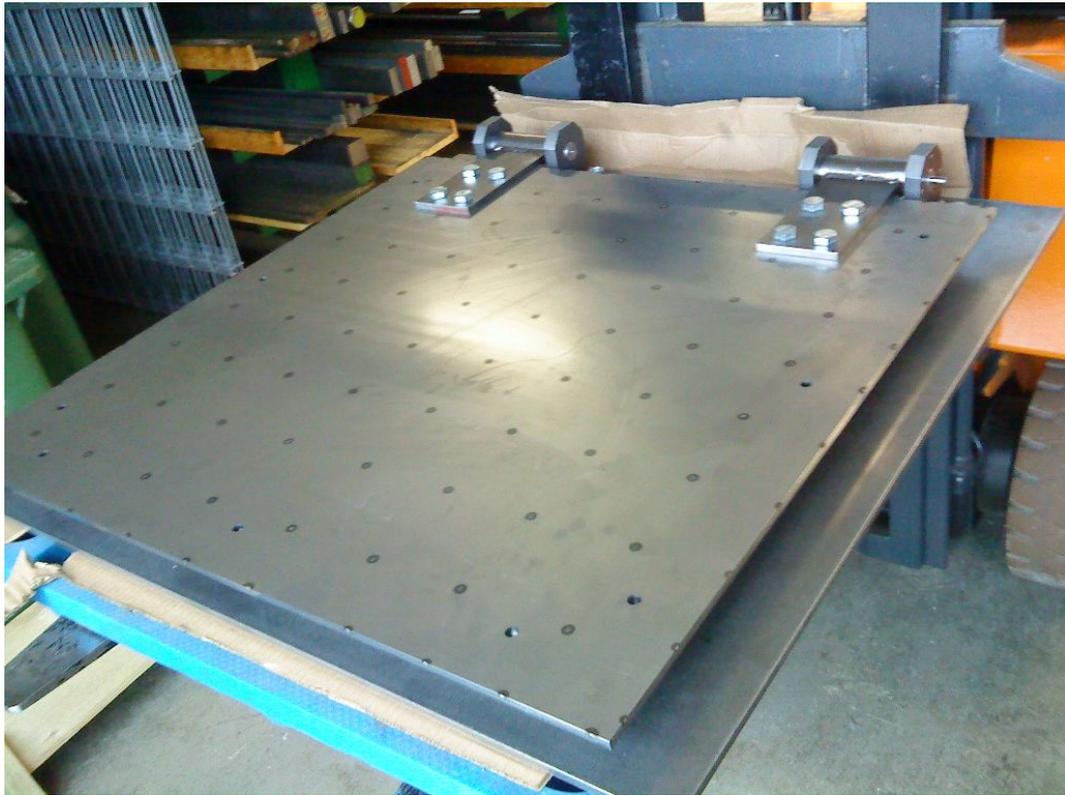


Abbildung 3.6: Gemäß Zeichnungen angefertigte Druckentlastungskappen für den 27 m^3 -Behälter (oben) und den 1 m^3 -Behälter (unten).

3.4 Einstellen des statischen Ansprechdrucks p_{stat}

Im Rahmen des Projektes Nr. F-05-0301 wurden mit einer Fallhammer-Apparatur die Bruchlasten von diversen Schrauben bestimmt. Kunststoffschrauben erwiesen sich dabei wegen ihrer vergleichsweise geringen Stabilität als geeignet, um akzeptable Ansprechdrücke zu erzeugen. Für die durchzuführenden Versuche sollten deshalb die Druckentlastungsklappen mit Kunststoffschrauben verschlossen werden, um den nötigen p_{stat} zu erzeugen. Die Schraubenbruchlasten in Tabelle 3.4 wurden von [10] mitgeteilt.

d_S [mm]	4	5	6
F_B [N]	785 ± 50	1.080 ± 100	1.670 ± 100

Tabelle 3.4: Gemessene Bruchlasten für M4, M5 und M6 Kunststoffschrauben.

Wie in Tabelle 1.1 dargestellt ist, ändert sich die Größe Kraft quadratisch mit dem Maßstab q , d. h. es sollte

$$F_B \propto d_S^2 \quad (3.1)$$

gelten. In der umseitigen Abbildung 3.7 ist zu sehen, dass die gemessenen Schraubenbruchlasten aus Tabelle 3.4 tatsächlich einer quadratische Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser folgen:

$$F_B = 45,79 \cdot d_S^2 \quad (3.2)$$

Die Druckentlastungsklappen haben an verschiedenen Stellen bzw. an zwei verschiedenen Abständen zur Drehachse Bohrungen für die Aufnahme der Verschlusschrauben. In Abbildung 3.8 ist dies dargestellt. Setzt man (3.2) in Formel (2.14) ein, so lässt sich der statische Ansprechdruck direkt in Abhängigkeit von Schraubendurchmesser, -anzahl und -position berechnen. In Tabelle 3.4 sind Ergebnisse dieser Berechnung für Variationen mit M2- und M3-Schrauben an der kleinen Klappe und Variationen von M6-Schrauben an der großen Klappe zusammengestellt. Gemäß Tabelle 3.5 erschien es sinnvoll, mit 2 Schrauben M2 an den beiden Positionen l_2 am 1 m^3 -Behälter zu arbeiten und entsprechend mit 2 Schrauben M6 am 27 m^3 -Behälter.

27 m ³				1 m ³			
n	l_1	l_2	p_{stat} [bar]	n	l_1	l_2	p_{stat} [bar]
2	-	2 × M6	0,105	2	-	2 × M2	0,105
4	2 × M6	2 × M6	0,162	4	2 × M2	2 × M2	0,162
-	-	-	-	2	-	2 × M3	0,237
-	-	-	-	4	2 × M3	2 × M3	0,364

Tabelle 3.5: Berechneter statischer Ansprechdruck p_{stat} in Abhängigkeit von der Schraubenanzahl n , dem Schraubendurchmesser und der Schraubenposition.

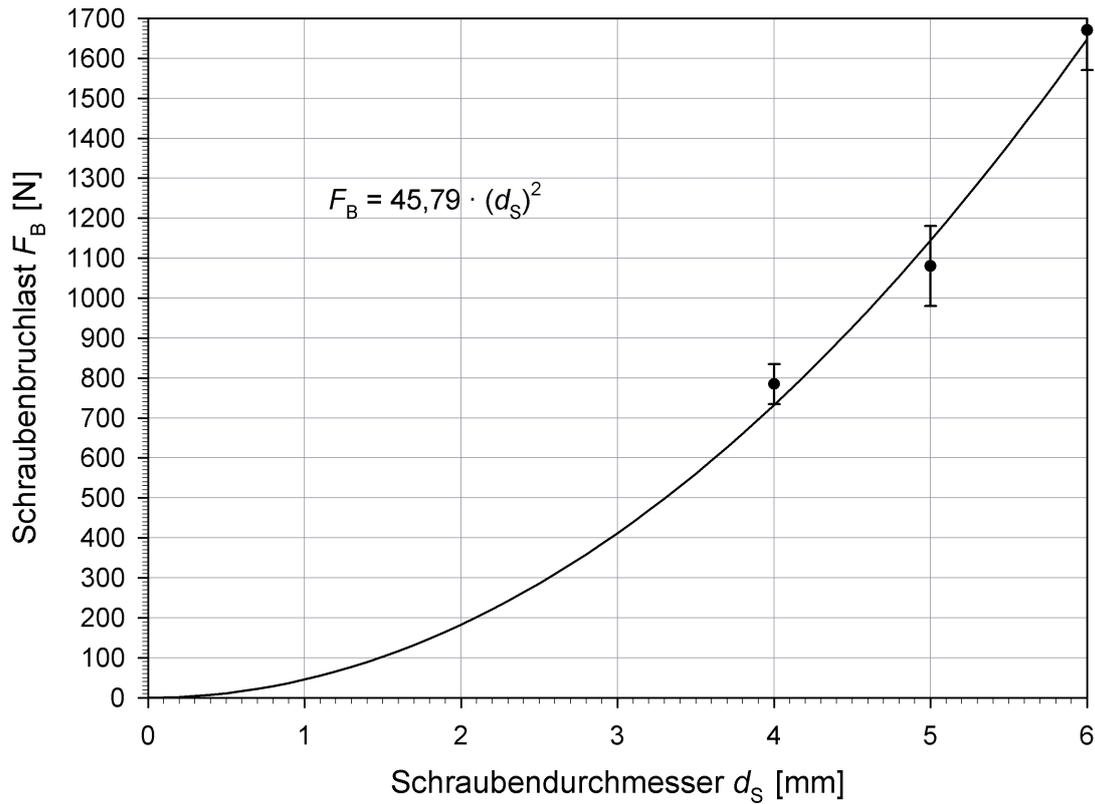


Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen Schraubenbruchlast und Schraubendurchmesser. Die eingezeichnete Kurve ist ein Fit durch die von [10] mitgeteilten Schraubenbruchlasten.

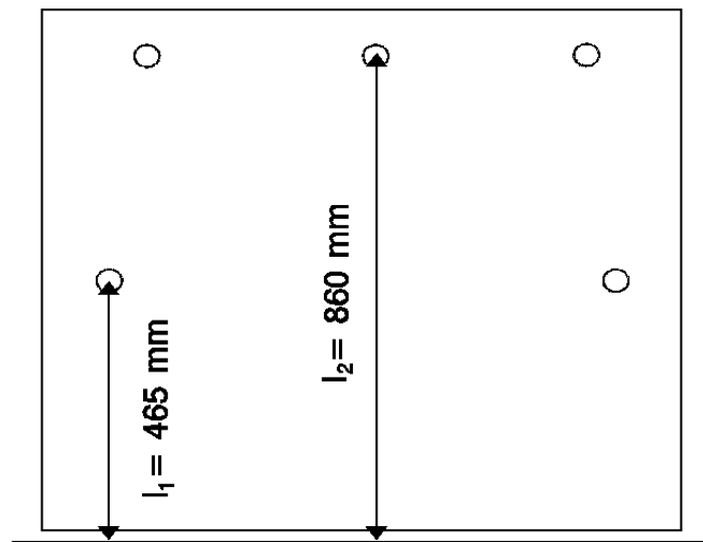


Abbildung 3.8: Schematisierte Darstellung der Abstände zwischen Drehachse und Bohrlöchern bei der Druckentlastungsklappe für den 27 m^3 -Behälter.

Kapitel 4

Experimenteller Teil

4.1 Versuche am 1 m³-Behälter

Wegen des sehr engen Belegungsplans des Versuchsfeldes im Mai 2009 wurden die experimentellen Arbeiten am 1 m³-Behälter begonnen. Aufgrund der Kleinheit des Behälters benötigt man vergleichsweise wenig Versuchsvorbereitungszeit und man kann deshalb an diesem Behälter Versuche mit relativ hoher Frequenz durchführen.

4.1.1 Einstellen des K_{St} -Wertes

Im ersten Schritt musste der K_{St} -Wert eingestellt werden. Angestrebt war ein K_{St} -Wert von rund 100 bar · m/s. Wie in Abschnitt 2.2 ausgeführt wurde, müssen dazu solange Explosionsversuche bei variabler Staubkonzentration und Zündverzögerungszeit durchgeführt werden, bis Formel (2.8) erfüllt ist. Die Druckentlastungsfläche ist dabei mit einer Kunststofffolie mit bekanntem Ansprechdruck p_{stat} verschlossen.

4.1.1.1 Bestimmung des statischen Ansprechdrucks der Folie

Der im vorigen Abschnitt erwähnte statische Ansprechdruck der Kunststofffolie musste experimentell bestimmt werden.

4.1.1.1.1 Versuchsaufbau

Die für die Versuche mit den Druckentlastungsklappen vorgesehene Entlastungsöffnung wurde am 1 m³-Behälter montiert. In die Behälterwand wurden 2 piezoelektrische Drucksensoren P1 und P2 integriert. Die Signale der Sensoren wurden über Ladungsverstärker in einem Transientenrekorder gespeichert. Mit Hilfe eines ansteuerbaren Ventils kann der Behälter mit Druckluft beaufschlagt werden (Abb. 4.1).

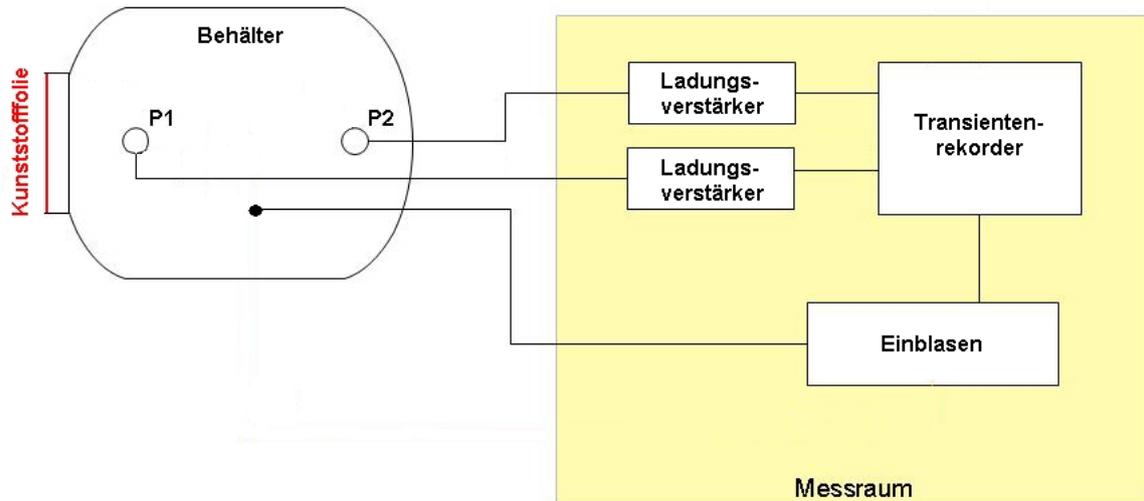


Abbildung 4.1: Schematisierter Versuchsaufbau zur Bestimmung des statischen Ansprechdrucks von Kunststoffolie.

4.1.1.1.2 Versuchsdurchführung

Die Druckentlastungsöffnung wurde mit Kunststoffolie verschlossen. Anschließend wurde der 1 m^3 -Behälter mit Druckluft beaufschlagt, der Druck über die piezoelektrischen Drucksensoren gemessen und im Transientenrekorder gespeichert. Es wurden 10 Versuche durchgeführt, deren Parameter sich in Tabelle A.1 finden.

4.1.1.1.3 Versuchsergebnisse und -auswertung

Zum Zeitpunkt an dem die Kunststoffolie reißt, fällt die Druckkurve steil ab. Der Druckwert an dieser Kante ist der statische Ansprechdruck der Folie. Von den 10 Versuchen mit der Bezeichnung B5 bis B14 lieferten nur die letzten drei brauchbare Daten für den p_{stat} der Folie. Diese sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Die Ergebnisse aller 10 Versuche finden sich in Tabelle A.1 im Anhang. Als Mittelwert für den statischen Ansprechdruck der untersuchten Folie ergab sich

$$\bar{p}_{\text{stat}} = 0,140 \text{ bar} \quad (4.1)$$

Versuch	d_F [mm]	$p_{\text{stat}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{stat}}(\text{P2})$ [bar]
B12	0,1	0,152	0,149
B13	0,1	0,163	0,156
B14	0,1	0,118	0,100

Tabelle 4.1: Bei den Versuchen B12 bis B14 gemessener statischer Ansprechdruck p_{stat} am 1 m^3 -Behälter mit einer Kunststoffolie mit $d_F = 0,1\text{ mm}$ Stärke.

4.1.1.3 Versuchsdurchführung

Die Druckentlastungsöffnung des 1 m³-Behälters wurde mit der 0,1 mm starken Kunststoffolie verschlossen. Anschließend wurde der Staubvorratsbehälter mit 1,25 kg Weizenmehl gefüllt und die Druckluft auf 20 bar eingestellt. Nachdem der Zünder eingebaut und angeschlossen war, wurde der Transientenrekorder für die Aufnahme vorbereitet und anschließend der Versuch gestartet. Aus Erfahrung wurde für die Zündverzögerungszeit der Wert $t_v = 0,6$ s gewählt [9]. Mit diesen Einstellungen wurden zwei Versuche durchgeführt.

4.1.1.4 Versuchsergebnisse

Die beiden durchgeführten Versuche ergaben die Messwerte aus Tabelle 4.2. Als Mittelwert für den reduzierten Überdruck ergab sich daraus

$$\bar{p}_{\text{red}} = 0,571 \text{ bar} \quad (4.2)$$

Versuch	Staub	c_S [g/m ³]	t_v [s]	d_F [mm]	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]
A1	Weizenmehl	1.250	0,6	0,1	-	0,575
A2	Weizenmehl	1.250	0,6	0,1	0,582	0,556

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Versuche zur Einstellung des K_{St} -Wertes am 1 m³-Behälter.

4.1.1.5 Auswertung und Diskussion

Einsetzen von (4.1), (4.2), $V = 1 \text{ m}^3$, $L/D = 1,47$, $A_E = 0,0625 \text{ m}^2$ und $p_{\text{max}} = 7,5 \text{ bar}$ in (2.8) bis (2.10) und Variieren des K_{St} -Wertes bis (2.8) erfüllt ist, lieferte

$$K_{St} = 100 \text{ bar} \cdot \text{m/s} \quad (4.3)$$

$p_{\text{max}} = 7,5 \text{ bar}$ ist der maximale Überdruck für Weizenmehl [9].

4.1.2 Versuche mit Druckentlastungsklappe

Nachdem die Einstellungen für $K_{St} = 100 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ bekannt waren, konnte mit den eigentlichen Versuchen begonnen werden. Dazu waren einige Umbauten erforderlich.

4.1.2.1 Versuchsaufbau

Zunächst wurde die Druckentlastungsklappe an den 1 m³-Behälter montiert. An der Drehachse der Klappe wurde am dafür vorgesehenen Stift der Inkrementaldrehgeber befestigt. In Abbildung 4.3 ist der Drehgeber links und die fertig montierte Klappe mit Drehgeber rechts zu sehen.

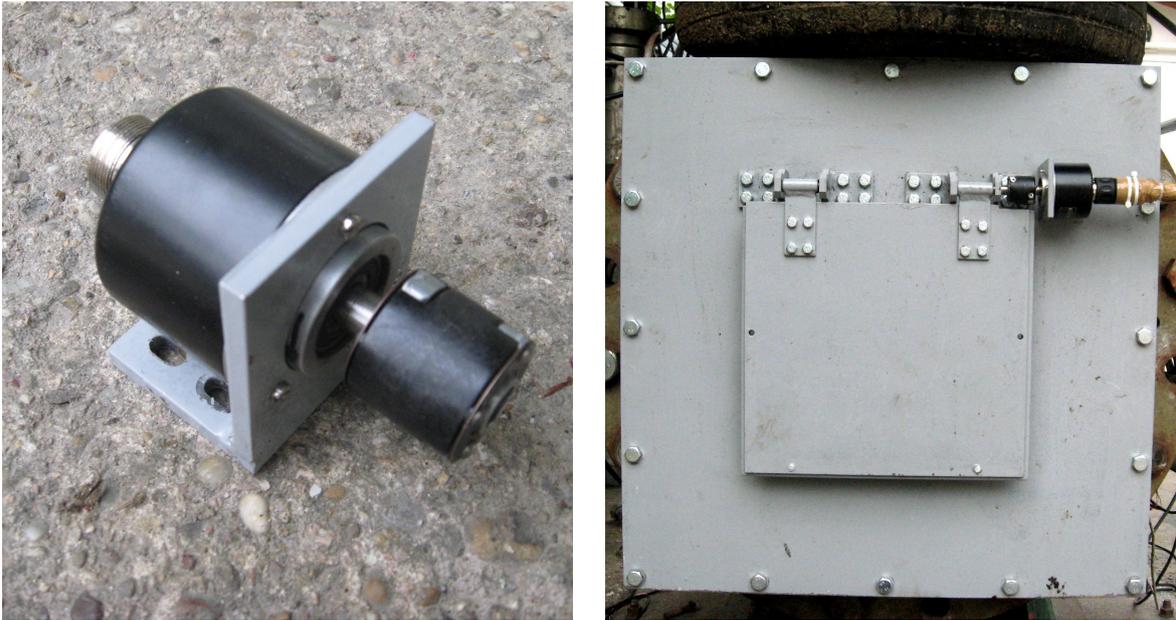


Abbildung 4.3: Inkrementaldrehgeber (links) und am 1 m³-Behälter montierte Druckentlastungsklappe mit Inkrementaldrehgeber (rechts).

Das Ausgangssignal des Inkrementaldrehgebers wird auf einen Digital-Analog-Konverter (DAC) gegeben, der von [8] gebaut wurde (Abb. 4.4, links oben). Dieser Konverter gibt zum einen ein analoges Spannungssignal aus, das dem Winkel der Druckentlastungsklappe direkt proportional ist. Zum anderen gibt der DAC für jedes registrierte Inkrement einen Spannungsimpuls aus. Diese Spannungsimpulse werden auf eine Timerkarte gegeben, die in einem Rechner untergebracht ist. Ein ebenfalls von [8] erstelltes Rechner-Programm zählt die Spannungsimpulse und misst die Zeitspannen zwischen den Impulsen. Daraus wird schließlich der Klappenöffnungswinkel über der Zeit errechnet. Die Winkelmessung über die Timerkarte hat den Vorteil einer höheren Winkelauflösung. Weiterhin gibt der DAC ein Trigger-Signal aus, welches die erste Registrierung eines Inkrementes markiert. Ziel war es, damit den Beginn der Klappenöffnung zu erkennen. Das Trigger- und das analoge Winkelsignal wurden mit Hilfe des Transientenrekorders erfasst.

Um neben dem Triggersignal des DAC eine weitere Möglichkeit zur Verfügung zu haben, den Öffnungszeitpunkt der Klappe zu bestimmen, wurde die Hochgeschwindigkeitskamera des Versuchsfeldes (siehe Abb. 4.12) eingesetzt. Die Kamera wurde durch das Einblassignal gestartet. Die Videodaten der Kamera wurden in einem Rechner gespeichert.

Wie bei den Versuchen zuvor wurde der Druckverlauf im Behälter über die Drucksensoren P1 und P2 und die angeschlossenen Ladungsverstärker gemessen. Das Staub/Luft-Gemisch wurde über den mit Druckluft beaufschlagten Staubvorratsbehälter und die angeschlossene Düse in den Behälter eingebracht. Gezündet wurde wieder mit pyrotechnischen Zündern mit 10 kJ Energieinhalt. In Abbildung 4.4 ist unten der gesamte Versuchsaufbau schematisiert dargestellt. Ebenfalls in dieser Abbildung ist rechts oben ein Foto des fertigen Aufbaus zu sehen.

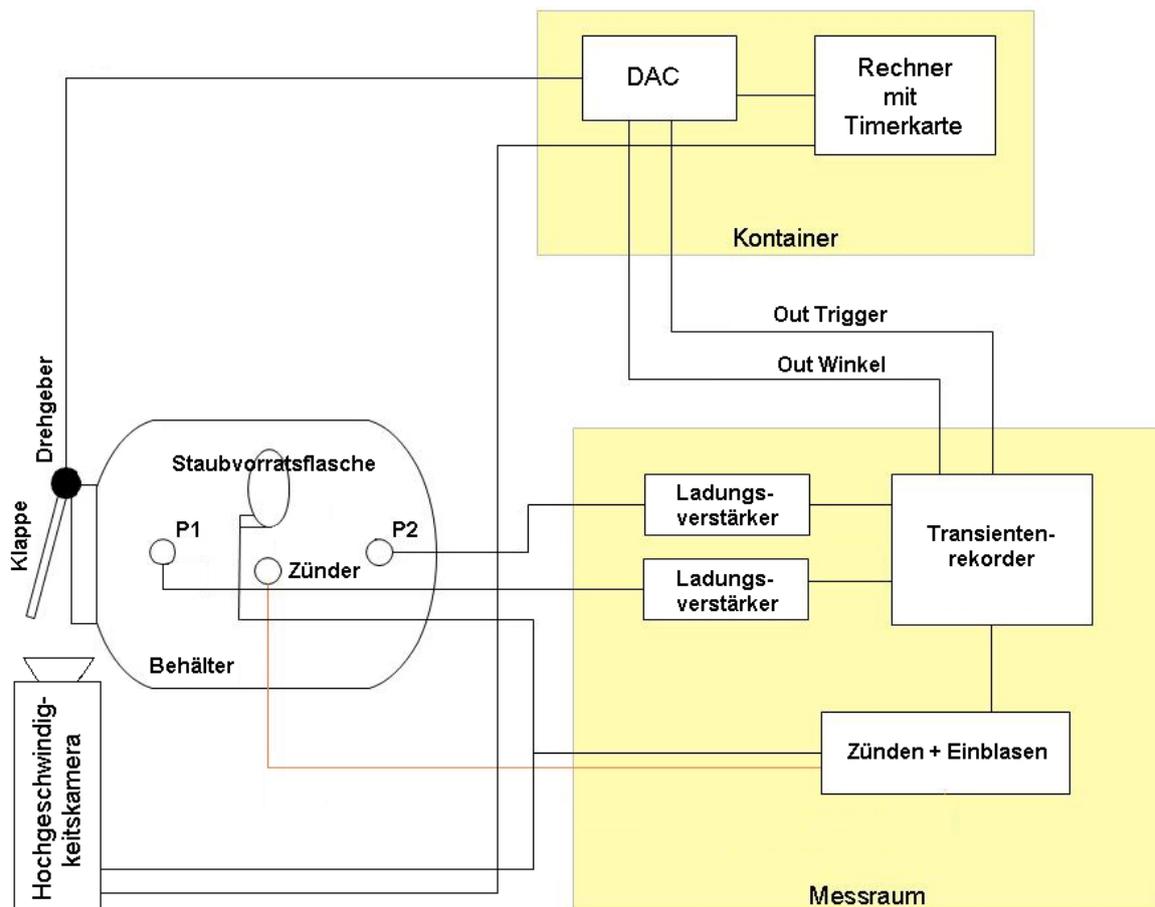


Abbildung 4.4: Digital-Analog-Konverter für den Inkrementaldrehgeber (links oben). Foto des fertigen Versuchsaufbaus für die Klappentests am 1 m^3 -Behälter. Der Autoreifen dient dem Abfangen der Druckentlastungsklappe beim Klappenöffnungswinkel von circa 180° (rechts oben). Schematisierter Versuchsaufbau für die Klappentests (unten).

4.1.2.2 Versuchsdurchführung

Die Druckentlastungsklappe wurde zunächst - gemäß den Ergebnissen aus Tabelle 3.5 - mit 2 Kunststoffschrauben M2 an den Lochpositionen l_2 verschlossen. Dies geschah, indem die Schrauben durch die Bohrungen gesteckt und auf der Gegenseite mit je einer Metallmutter verschraubt wurden. Anschließend wurde der Staubvorratsbehälter mit 1,25 kg Weizenmehl gefüllt und die Druckluft auf 20 bar eingestellt. Danach wurde sowohl der Digital-Analog-Konverter durch Drücken der Reset-Taste als auch die Hochgeschwindigkeitskamera für die Messung vorbereitet. Nachdem der Zünder eingebaut und angeschlossen war, wurde der Transientenrekorder für die Aufnahme vorbereitet und anschließend der Versuch gestartet. Insgesamt wurden 12 Versuche durchgeführt. Die Versuchsparameter sind in Tabelle A.2 aufgelistet.

4.1.2.3 Versuchsergebnisse

Beim ersten Versuch mit 2 Schrauben M2 an der Position l_2 öffnete die Klappe bereits beim Einblasvorgang. Der in Abschnitt 3.4 berechnete p_{stat} für 2 Stück M2-Schrauben wurde nicht erreicht. Der Grund war, dass die Schrauben nicht brachen, sondern die Muttern über die Schraubengewinde gezogen wurden. Deshalb wurden bei den weiteren Versuchen 4 Stück M3-Schrauben und 4 Stück M2-Schrauben verwendet. Im Großen und Ganzen waren die Ergebnisse recht gut reproduzierbar. Alle Komponenten des experimentellen Aufbaus haben sehr gut funktioniert. Die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wichtigen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Die Ergebnisse aller Versuche am 1 m³-Behälter sind in Tabelle A.2 aufgelistet.

Versuch	$n (l_1)$	$n (l_2)$	$p_{\text{dyn}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{stat}}(\text{P2})$ [bar]	p_{dyn} [bar]
C2	2 × M3	2 × M3	0,430	0,429	0,251
C3	2 × M3	2 × M3	0,431	0,427	0,208
C4	2 × M3	2 × M3	0,490	0,495	0,215
C5	2 × M3	2 × M3	0,534	0,570	0,213
C6	2 × M3	2 × M3	0,534	0,545	0,239
C7	2 × M3	2 × M3	0,577	0,567	0,187
C8	2 × M3	2 × M3	0,575	0,575	0,174

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Versuche C2-C8 am 1 m³-Behälter. Einzelheiten siehe Tabelle A.2.

Auch die Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera haben sehr gut geklappt. In Abbildung 4.5 ist eine Bildsequenz der Hochgeschwindigkeitsaufnahme von Versuch C2 zu sehen. Links unten in jedem Bild ist die Anzeige der Zeitspanne seit Triggerzeitpunkt (Zündsignal) zu sehen. Man erkennt, dass der Klappenöffnungsvorgang bei etwa 70 ms nach Zündung begann und nach circa 40 weiteren ms rund 90° Klappenstellung erreicht waren. Diese grobe Abschätzung zeigt schon, dass die Vorhersage aus Abschnitt 3.2 zumindest einigermaßen zutrifft. Die detaillierte Auswertung folgt im anschließenden Abschnitt.

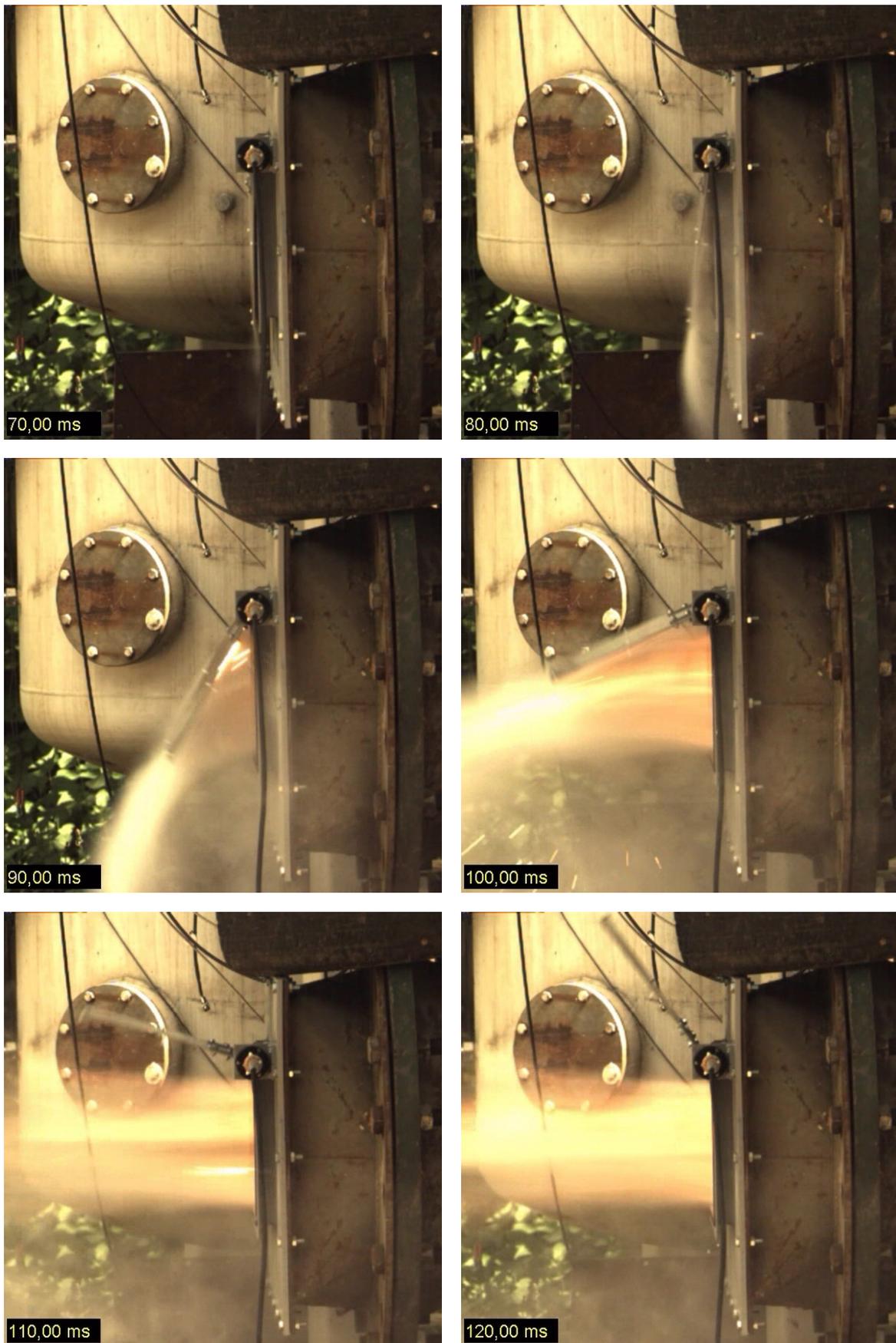


Abbildung 4.5: Bildsequenz aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme bei Versuch C2.

4.1.2.4 Auswertung und -diskussion

Zu Beginn soll am Beispiel der Winkelkurven aus den Versuchen C2-C8 aufgezeigt werden, wie ausgewertet wurde. Grundsätzlich alle Datensätze, die im Rahmen dieser Arbeit erzeugt wurden, wurden nach dem im Folgenden beschriebenen Schema ausgewertet.

Im ersten Schritt wurden alle Datensätze mit Hilfe des Programms IMC Look (Abb. B.1) in das ASCII-Format umgewandelt, damit die Daten von anderen Programmen lesbar sind. Danach wurden zunächst die Winkelkurven in das Programm TableCurve 2D importiert (grüne Kurven in Abb. 4.6). Dieses Programm eignet sich besonders gut zum bearbeiten und fitten¹ von Messdaten. Nach dem Einlesen der Daten wurde eine beliebige Winkelkurve aus dem Kurvensatz ausgewählt und als Bezugskurve definiert. Entscheidend war dabei der Kurvenpunkt 90°, d. h., der zugehörige Zeitpunkt. Alle anderen Winkelkurven wurden nun so zeitverschoben, dass die 90°-Punkte aller Kurven zur Deckung kamen (schwarze Kurven in Abb. 4.6). Dies ist legitim, da die Dauer des Klappenöffnungsvorganges von Relevanz ist und nicht die absolute zeitliche Position der einzelnen Kurven. Abschließend wurde der Fit-Algorithmus von TableCurve 2D auf diese Daten angewandt und ein Fit generiert (rote Kurve in Abb. 4.6).

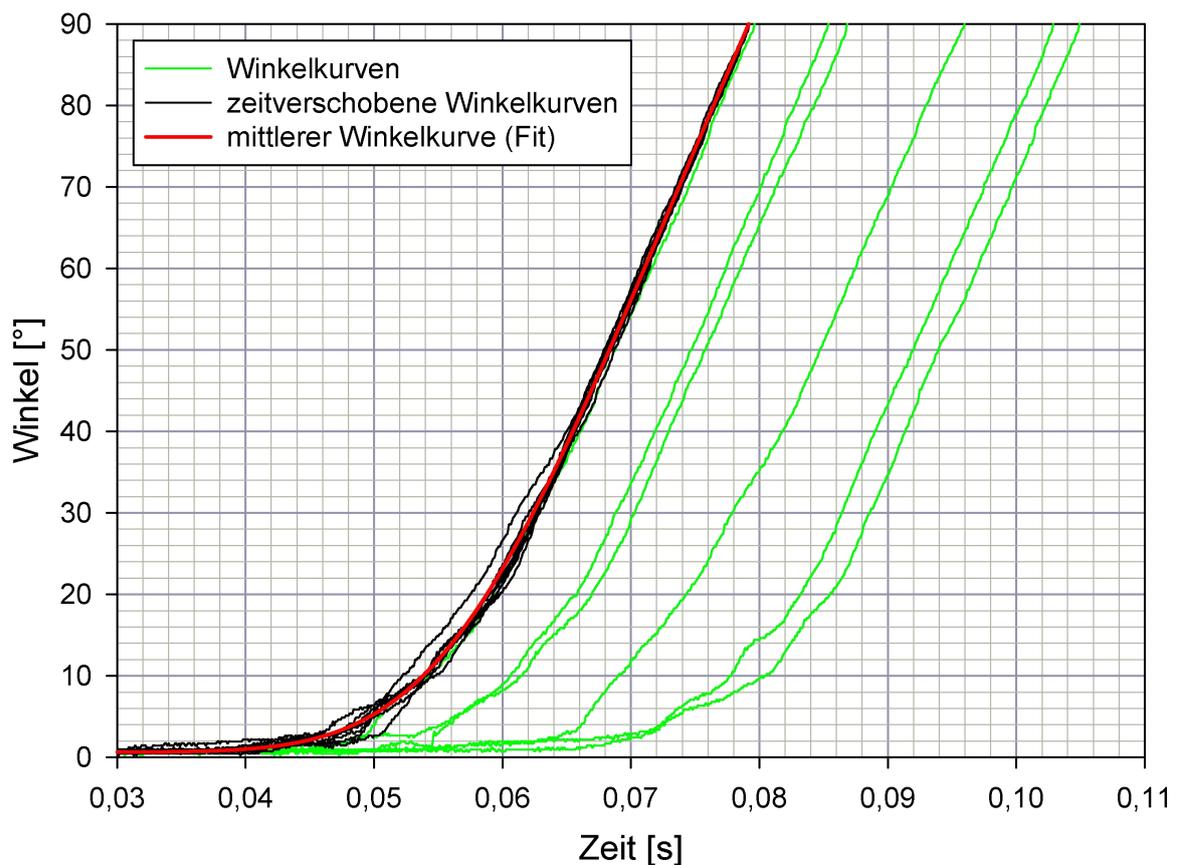


Abbildung 4.6: Datenaufbereitung am Beispiel der gemessenen Winkelverläufe bei den Versuchen C2-C8.

¹Fitten bedeutet das Suchen und Finden einer Regressionskurve, die die Messdaten möglichst gut beschreibt.

Diese Vorgehensweise wurde auch auf die gemessenen Druckverläufe der Versuche C2-C8 angewandt, wobei die Größe der Zeitverschiebungen aus der Aufarbeitung der Winkelkurven übernommen wurde. So war gewährleistet, dass es zu keinem Zeitversatz zwischen Winkel- und Druckkurven bei den einzelnen Versuchen kam. Abbildung 4.7, oben zeigt das Ergebnis der Druckkurvenbearbeitung sowie die erste zeitliche Ableitung des mittleren Druckverlaufes. Aus der Grafik liest man ab:

$$\bar{p}_{\text{red}} = 0,54 \text{ bar} \quad (4.4)$$

$$\frac{\overline{dp}}{dt_{\text{red}}} = 9,45 \text{ bar/s} \quad (4.5)$$

Stellt man den Fit der Druckverläufe gemeinsam mit dem Fit der Winkelkurven in einem Diagramm dar, so kann man daraus zum einen den mittleren dynamischen Ansprechdruck \bar{p}_{dyn} ablesen und zum anderen die mittlere Öffnungsdauer $\bar{t}_{\text{Ö}}$ der Klappe der Versuche C2-C8. In Abbildung 4.7, unten ist dies gezeigt. Aus Sichtung der Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera und Untersuchung der einzelnen Kurvenverläufe konnte abgeleitet werden, dass der Klappenöffnungsvorgang etwa beim Klappenöffnungswinkel von $\varphi = 1^\circ$ beginnt. Aus Abbildung 4.7, unten folgt:

$$\bar{p}_{\text{dyn}} = 0,206 \text{ bar} \quad (4.6)$$

$$\bar{t}_{\text{Ö}} = 37,3 \text{ ms} \quad (4.7)$$

Um mit Hilfe von Formel (2.6) die Gesamtkraft auf die Klappenscharniere zu berechnen, benötigt man die 1. und 2. zeitliche Ableitung des Winkelverlaufs. Auch das Ableiten war mit TableCurve 2D leicht durchzuführen. Verarbeitet wurde wieder der mittlere Winkelverlauf. In Abbildung 4.8, oben sind die Ergebnisse dieser Arbeit dargestellt. Einsetzen der Klappenwinkelgeschwindigkeit und Klappenwinkelbeschleunigung in (2.6) lieferte die mittlere zeitliche Entwicklung der Gesamtkraft auf die Klappenscharniere (siehe Abb. 4.8, unten):

$$\bar{F}_{\text{g,max}} = 1.398 \text{ N} \quad (4.8)$$

Die Auswertung der Versuche C9-C12 ist im Anhang grafisch dargestellt. Die Entlastungsfähigkeit der Klappen E_{F} wurde gemäß [2] bestimmt. Einen Überblick über die Resultate der Auswertung gibt Tabelle 4.4.

Versuche	$\bar{t}_{\text{Ö}}$ [ms]	\bar{p}_{dyn} [bar]	\bar{p}_{red} [bar]	$\overline{dp/dt_{\text{red}}}$ [bar/s]	$\bar{F}_{\text{g,max}}$ [N]	E_{F} [%]
C2-C8	37,3	0,206	0,54	9,45	1.398	64
C9-C12	47,4	0,104	0,41	8,61	848	99

Tabelle 4.4: Endgültige Ergebnisse der Versuche am 1 m³-Behälter.

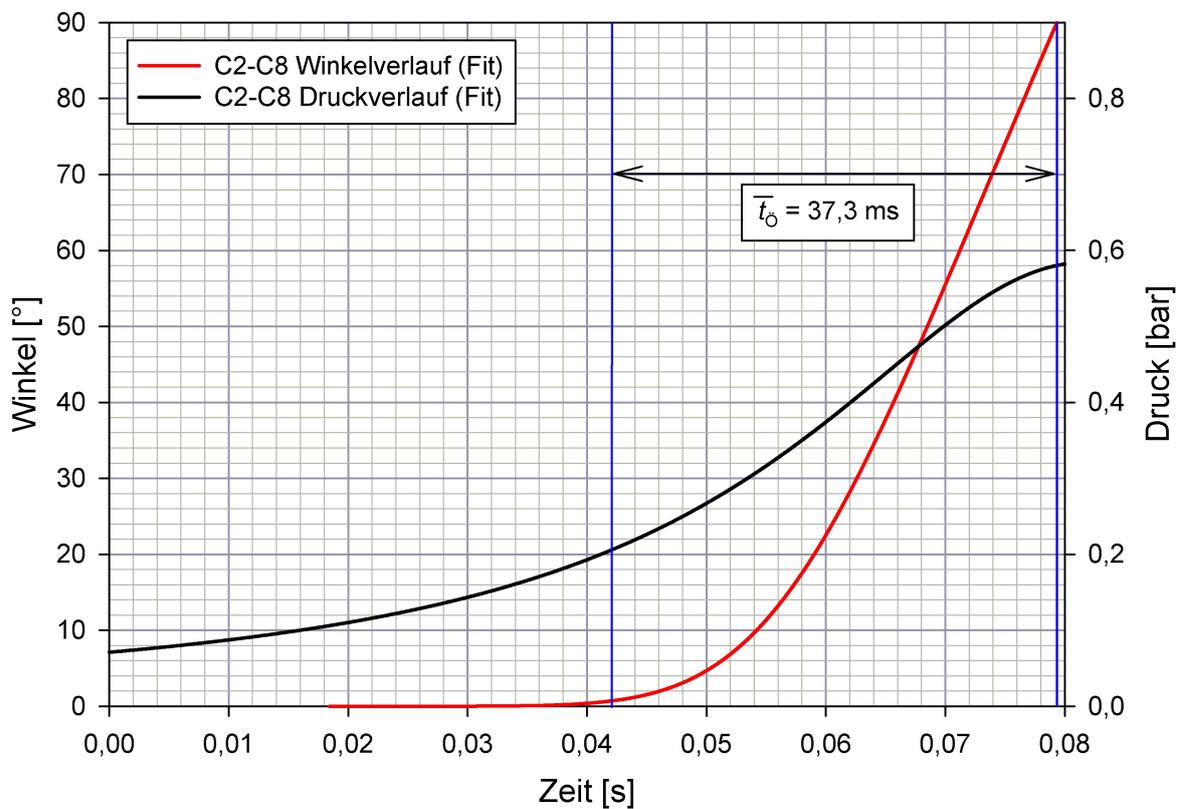
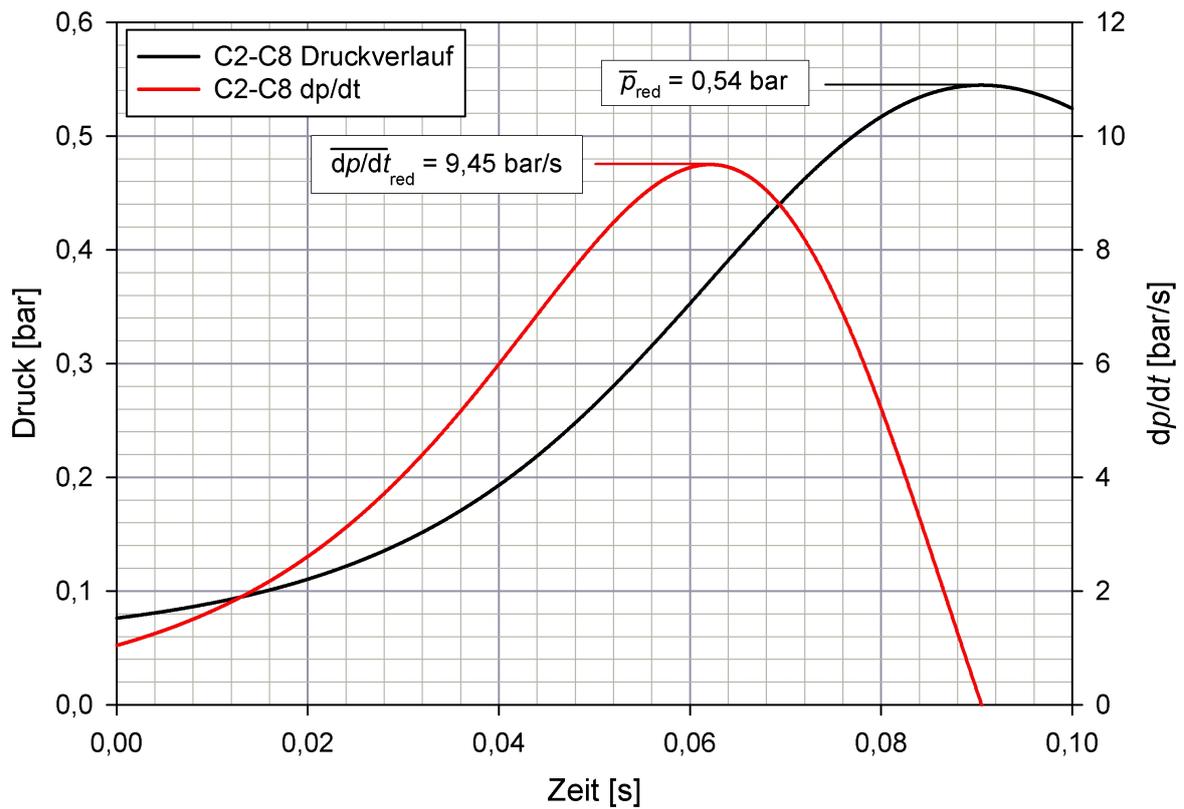


Abbildung 4.7: Fit und erste zeitliche Ableitung der Druckkurven der Versuche C2-C8 (oben). Fits der Winkel- und Druckkurven der Versuche C2-C8. Bei der Klappenstellung $\varphi = 1^\circ$ beginnt definitionsgemäß der Klappenöffnungsvorgang (unten).

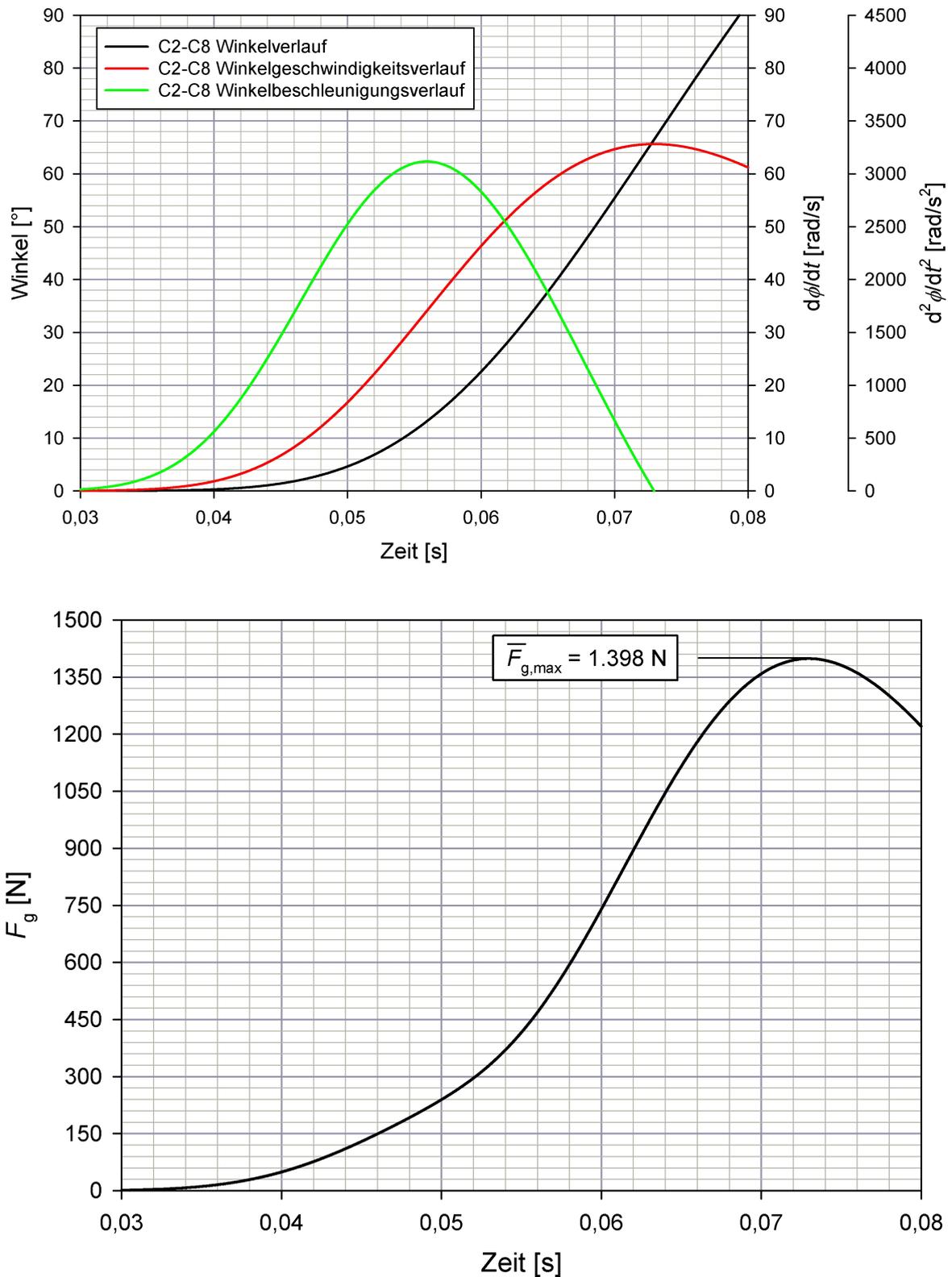


Abbildung 4.8: Mittlerer zeitlicher Winkelverlauf der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen C2-C8. Weiterhin sind die Verläufe der mittleren Klappenwinkelgeschwindigkeit und Klappenwinkelbeschleunigung gezeigt (oben). Verlauf der Gesamtkraft auf die Scharniere der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen C2-C8 (unten).

4.2 Versuche am 27 m³-Behälter

Ende Mai/Anfang Juni 2009 wurden schließlich die Versuche am 27 m³-Behälter durchgeführt. Der Arbeitsablauf war genau so wie in Abschnitt 4.1 beschrieben.

4.2.1 Einstellen des K_{St} -Wertes

Genau wie beim 1 m³-Behälter sollte versucht werden, einen K_{St} -Wert von rund 100 bar · m/s einzustellen. Dazu musste zunächst der statische Ansprechdruck einer Kunststofffolie auf der nun dreimal größeren Druckentlastungsfläche bestimmt werden.

4.2.1.1 Bestimmung des statischen Ansprechdrucks der Folie

4.2.1.1.1 Versuchsaufbau

Die für die Versuche mit den Druckentlastungsklappen vorgesehene Entlastungsöffnung wurde am 27 m³-Behälter montiert (Abb. 4.9, rechts oben). In die Behälterwand wurden 2 piezoelektrische Drucksensoren P1 und P2 integriert (Abb. 4.9, links unten). Die Signale der Sensoren wurden über Ladungsverstärker in einem Transientenrekorder gespeichert. Mit Hilfe eines ansteuerbaren Ventils kann der Behälter mit Druckluft beaufschlagt werden. Den schematisierten Versuchsaufbau entnimmt man Abbildung 4.1.

4.2.1.1.2 Versuchsdurchführung

Die Druckentlastungsöffnung wurde mit Kunststofffolie verschlossen (Abb. 4.9, rechts unten). Anschließend wurde der 27 m³-Behälter mit Druckluft beaufschlagt, der Druck über die piezoelektrischen Drucksensoren gemessen und im Transientenrekorder gespeichert. Es wurden 3 Versuche durchgeführt, deren Parameter sich in Tabelle A.3 finden.

4.2.1.1.3 Versuchsergebnisse und -auswertung

Von den 3 Versuchen mit der Bezeichnung D4 bis D6 lieferten nur zwei brauchbare Daten für den p_{stat} der Folie. Diese sind in Tabelle 4.5 zusammengestellt. Die Ergebnisse aller 3 Versuche finden sich in Tabelle A.3 im Anhang. Als Mittelwert für den statischen Ansprechdruck der untersuchten Folie ergab sich

$$\bar{p}_{stat} = 0,112 \text{ bar} \quad (4.9)$$

Versuch	d_F [mm]	$p_{\text{stat}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{stat}}(\text{P2})$ [bar]
D4	0,02	0,106	0,112
D6	0,02	0,113	0,118

Tabelle 4.5: Bei den Versuchen D4 und D6 gemessener statischer Ansprechdruck p_{stat} am 27 m³-Behälter mit einer Kunststofffolie mit $d_F = 0,2$ mm Stärke.



Abbildung 4.9: Der 27 m³-Behälter auf dem Versuchsfeld Kappelrodeck (links oben). Montage des Druckentlastungsöffnungsflansches (rechts oben). Einer der beiden angeflanschten Drucksensoren (links unten). Die mit Kunststofffolie verschlossene Druckentlastungsfläche (rechts unten).

4.2.1.2 Versuchsaufbau

Das Druckluftsystem am 27 m³-Behälter wurde abmontiert. Beim 27 m³-Behälter wird das Staub/Luft-Gemisch über Ringdüsen in den Behälter eingeblasen. An die Ringdüsen wurden fünf 20l-Vorratsflaschen angeschlossen (Abb. 4.10). Diese Vorratsflaschen beinhalten gerade soviel Staub, dass die gewünschte Staubkonzentration durch das Einblasen genau erreicht wird. Die Flaschen stehen unter 20 bar Überdruck. Mit Hilfe von Sprengkapselventilen wird der Einblasvorgang über das Einblassignal gestartet. Die Drucksensoren P1 und P2 wurden aus den im vorigen Abschnitt beschriebenen Versuchen übernommen. Zusätzlich wurde eine Zündvorrichtung in den Behälter integriert. Über ein Zündsignal kann damit ein pyrotechnischer Zünder mit 10 kJ Energieinhalt aktiviert werden (Abb. 4.2, rechts unten). Einblas-, Zünd- und Drucksignale werden mit Hilfe eines Transientenrekorders erfasst und gespeichert. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.2 (oben) schematisiert dargestellt.



Abbildung 4.10: Unter Überdruck stehende Staubvorratsflaschen mit Sprengkapselventilen fertig montiert am 27³-Behälter.

4.2.1.3 Versuchsdurchführung

Die Druckentlastungsöffnung des 27 m³-Behälters wurde mit der 0,2 mm starken Kunststoffolie verschlossen. Anschließend wurden die Staubvorratsflaschen mit insgesamt 19,9 kg (beim ersten Versuch mit rund 33,1 kg) Weizenmehl gefüllt. Danach wurden sie unter 20 bar Überdruck gesetzt und mit Sprengkapselventilen verschlossen. Nachdem

der Zünder eingebaut und angeschlossen war, wurde der Transientenrekorder für die Aufnahme vorbereitet und anschließend der Versuch gestartet. Die Zündverzögerungszeit wurde wie bei den Versuchen am 1³-Behälter mit $t_v = 0,6$ s (beim ersten Versuch $t_v = 0,9$ s) gewählt. Mit diesen Einstellungen wurden 5 Versuche durchgeführt.

4.2.1.4 Versuchsergebnisse

Die 5 durchgeführten Versuche ergaben die Messwerte aus Tabelle A.4. Für die Bestimmung von \bar{p}_{red} bzw. des K_{St} -Wertes wurden lediglich die Werte aus Tabelle 4.6 verwendet. Als Mittelwert für den reduzierten Überdruck ergab sich daraus

$$\bar{p}_{\text{red}} = 0,567 \text{ bar} \quad (4.10)$$

Versuch	Staub	c_S [g/m ³]	t_v [s]	d_F [mm]	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]
E3	Weizenmehl	750	0,6	0,2	0,590	0,599
E5	Weizenmehl	750	0,6	0,2	0,543	0,534

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Versuche E3 und E5 zur Einstellung des K_{St} -Wertes am 27 m³-Behälter.

4.2.1.5 Auswertung und Diskussion

Einsetzen von (4.9), (4.10), $V = 26,5 \text{ m}^3$, $L/D = 1,44$, $A_E = 0,5625 \text{ m}^2$ und $p_{\text{max}} = 7,5 \text{ bar}$ in (2.8) bis (2.10) und Variieren des K_{St} -Wertes bis (2.8) erfüllt ist, lieferte

$$K_{\text{St}} = 97 \text{ bar} \cdot \text{m/s} \quad (4.11)$$

4.2.2 Versuche mit Druckentlastungsklappe

Nachdem die Einstellungen für den K_{St} -Wert bekannt waren, konnte mit den eigentlichen Versuchen begonnen werden. Dazu waren erneut einige Umbauten erforderlich.

4.2.2.1 Versuchsaufbau

An der Drehachse der Klappe wurde am dafür vorgesehenen Stift der Inkrementaldrehgeber fixiert. In Abbildung 4.11 ist der Drehgeber und die fertig montierte Klappe mit Drehgeber zu sehen. Das Ausgangssignal des Inkrementaldrehgebers wird wieder auf den Digital-Analog-Konverter (DAC) gegeben (Abb. 4.4, links oben). Zur Funktionsweise und Verkabelung des DAC siehe Abschnitt 4.1.2.1. Die Signale aus dem DAC wurden mit Hilfe eines Rechners und eines Transientenrekorders aufgenommen.

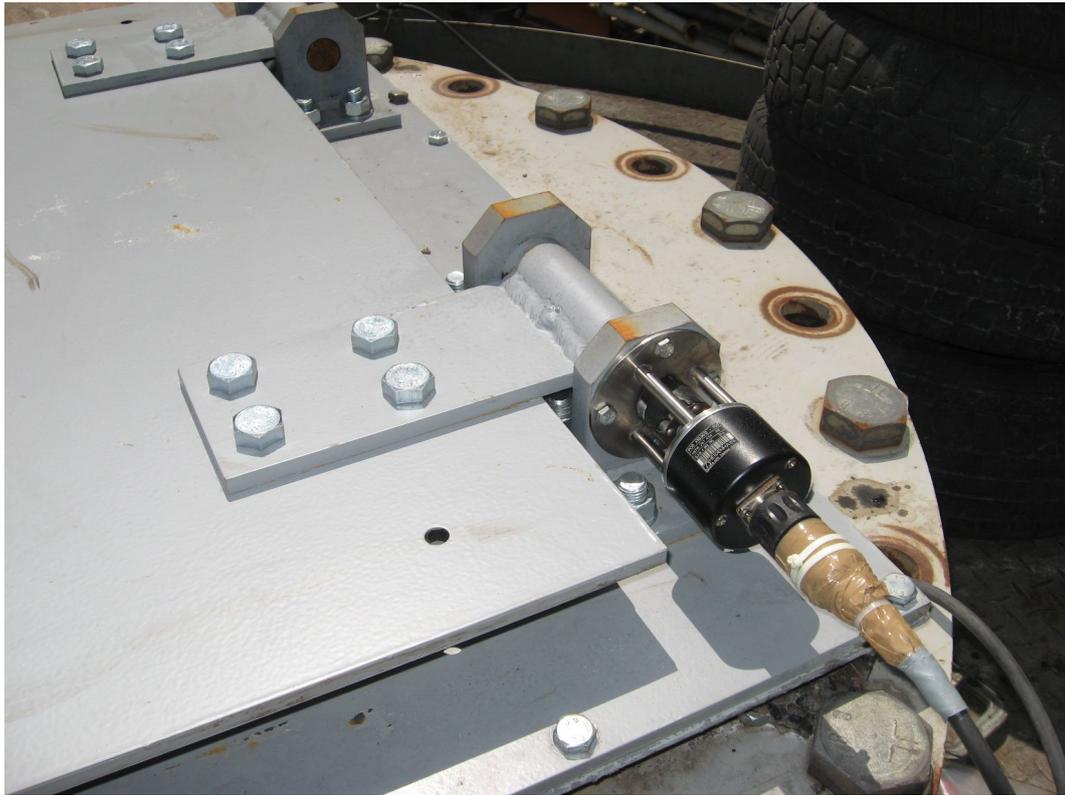


Abbildung 4.11: Der an der Druckentlastungsklappe befestigte Inkrementaldrehgeber (oben). Die auf dem 27³-Behälter montierte Druckentlastungsklappe (unten).



Abbildung 4.12: Die Hochgeschwindigkeitskamera der BGN/FSA auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck.

Auch die Hochgeschwindigkeitskamera (Abb. 4.12) kam wieder zum Einsatz, um den Klappenöffnungszeitpunkt bestimmen bzw. den Druckentlastungsvorgang visuell verfolgen zu können. Die Kamera wurde durch das Einblassignal gestartet. Die Videodaten der Kamera wurden in einem Rechner gespeichert.

Wie bei den Versuchen zuvor wurde der Druckverlauf im Behälter über die Drucksensoren P1 und P2 und die angeschlossenen Ladungsverstärker gemessen. Gezündet wurde wieder mit pyrotechnischen Zündern mit 10 kJ Energieinhalt. In Abbildung 4.4, unten ist der gesamte Versuchsaufbau schematisiert dargestellt.

4.2.2.2 Versuchsdurchführung

Die Druckentlastungsklappe wurde zunächst - gemäß den Ergebnissen aus Tabelle 3.5 - mit 2 Kunststoffschrauben M6 an den Lochpositionen l_2 verschlossen. Dies geschah, indem die Schrauben durch die Bohrungen gesteckt und auf der Gegenseite mit je einer Metallmutter verschraubt wurden. Anschließend wurden die Staubvorratsflaschen mit je 4 kg Weizenmehl befüllt, unter Überdruck gesetzt und mit den Sprengkapselventilen verschlossen. Danach wurde sowohl der Digital-Analog-Konverter durch Drücken der Reset-Taste als auch die Hochgeschwindigkeitskamera für die Messung vorbereitet. Nachdem der Zünder eingebaut und angeschlossen war, wurde der Transientenrekorder für die Aufnahme vorbereitet und anschließend der Versuch gestartet. Insgesamt wurden 6 Versuche durchgeführt. Die Versuchsparameter sind in Tabelle A.5 aufgelistet.

4.2.2.3 Versuchsergebnisse

Im Gegensatz zu den Versuchen am 1 m^3 -Behälter stimmten die gemessenen dynamischen Ansprechdrücke – bis auf einen Ausreißer – sehr gut mit den theoretisch berech-

neten statischen Ansprechdrücken aus Tabelle 3.5 überein. Bei Versuch F6 wurde das Gewinde von den Schrauben gezogen, weshalb ein deutlich niedrigerer dynamischer Ansprechdruck entstand als berechnet. Die ermittelten dynamischen Ansprechdrücke und reduzierten Überdrücke aller Versuche mit Druckentlastungsklappe am 27 m³-Behälter finden sich in Tabelle A.5. Die für die spätere Diskussion besonders wichtigen Ergebnisse der Versuche F4 und F5 sind in Tabelle 4.7 zusammengestellt.

Versuch	$n (l_1)$	$n (l_2)$	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]	p_{dyn} [bar]
F4	2 × M6	2 × M6	0,662	0,663	0,160
F5	2 × M6	2 × M6	0,594	0,593	0,168

Tabelle 4.7: Ergebnisse der Versuche F4 und F5 am 27 m³-Behälter. Einzelheiten siehe Tabelle A.5.

In Abbildung 4.13 ist eine Bildsequenz der Hochgeschwindigkeitsaufnahme von Versuch F4 zu sehen. Rechts oben in jedem Bild ist die Anzeige der Zeitspanne seit Triggerzeitpunkt zu sehen. Man erkennt, dass der Klappenöffnungsvorgang bei etwa 820 ms nach Beginn des Triggersignals begann und nach etwa 120 weiteren ms rund 90° Klappenstellung erreicht waren. Diese grobe Abschätzung zeigt erneut, dass die Vorhersage aus Abschnitt 3.2 zutrifft. Die detaillierte Auswertung folgt im Weiteren.

4.2.2.4 Auswertung und -diskussion

Die Auswertung wurde durchgeführt wie in Abschnitt 4.1.2.4 beschrieben. Bei den Versuchen am 1 m³-Behälter wurde ein mittlerer dynamischer Ansprechdruck von rund 0,2 bar erreicht. Da die dynamischen Ansprechdrücke der Versuche F1-F3 und F6 mit rund 0,1 bar im Vergleich dazu recht niedrig waren, wurden diese Versuche an dieser Stelle nicht betrachtet. Die Auswertung der Versuche F4 und F5 ergab die Kurven und Zahlen, die in den Abbildungen 4.14 und 4.15 dargestellt sind. Für diese Versuche ergab sich:

$$\bar{p}_{\text{red}} = 0,62 \text{ bar} \quad (4.12)$$

$$\overline{\frac{dp}{dt}}_{\text{red}} = 3,80 \text{ bar} \quad (4.13)$$

$$\bar{p}_{\text{dyn}} = 0,164 \text{ bar} \quad (4.14)$$

$$\bar{t}_{\text{Ö}} = 108,8 \text{ ms} \quad (4.15)$$

$$\bar{F}_{\text{g,max}} = 14.325 \text{ N} \quad (4.16)$$



Abbildung 4.13: Bildsequenz aus der Hochgeschwindigkeitsaufnahme bei Versuch F4.

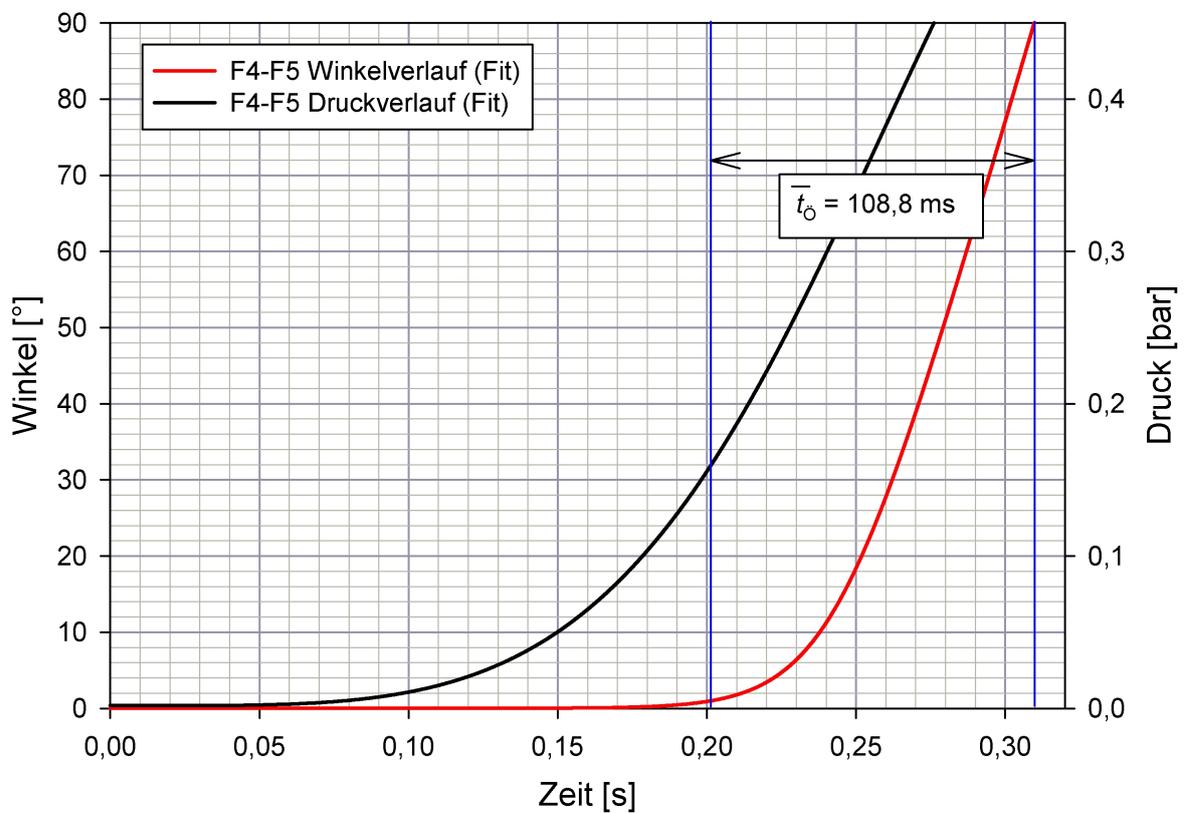
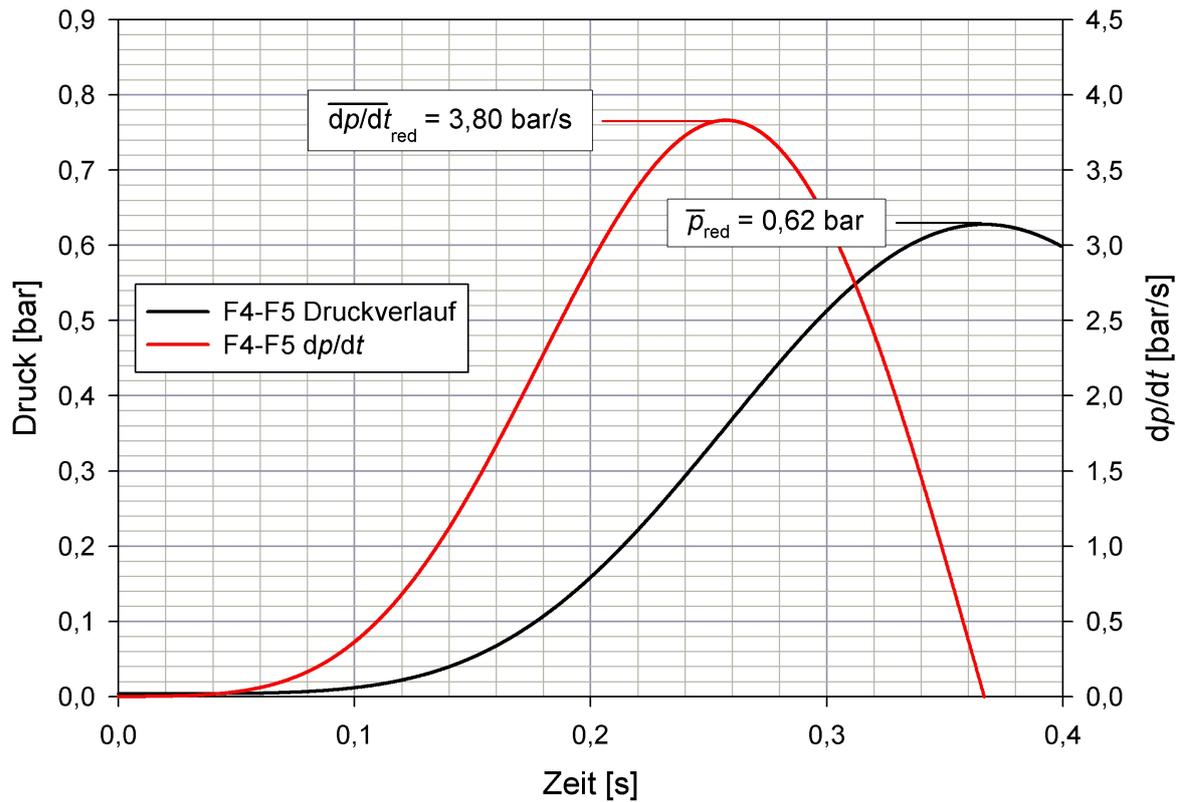


Abbildung 4.14: Fit und erste zeitliche Ableitung der Druckkurven der Versuche F4 und F5 (oben). Fits der Winkel- und Druckkurven der Versuche F4 und F5. Bei der Klappenstellung $\varphi = 1^\circ$ beginnt der Klappenöffnungsvorgang (unten).

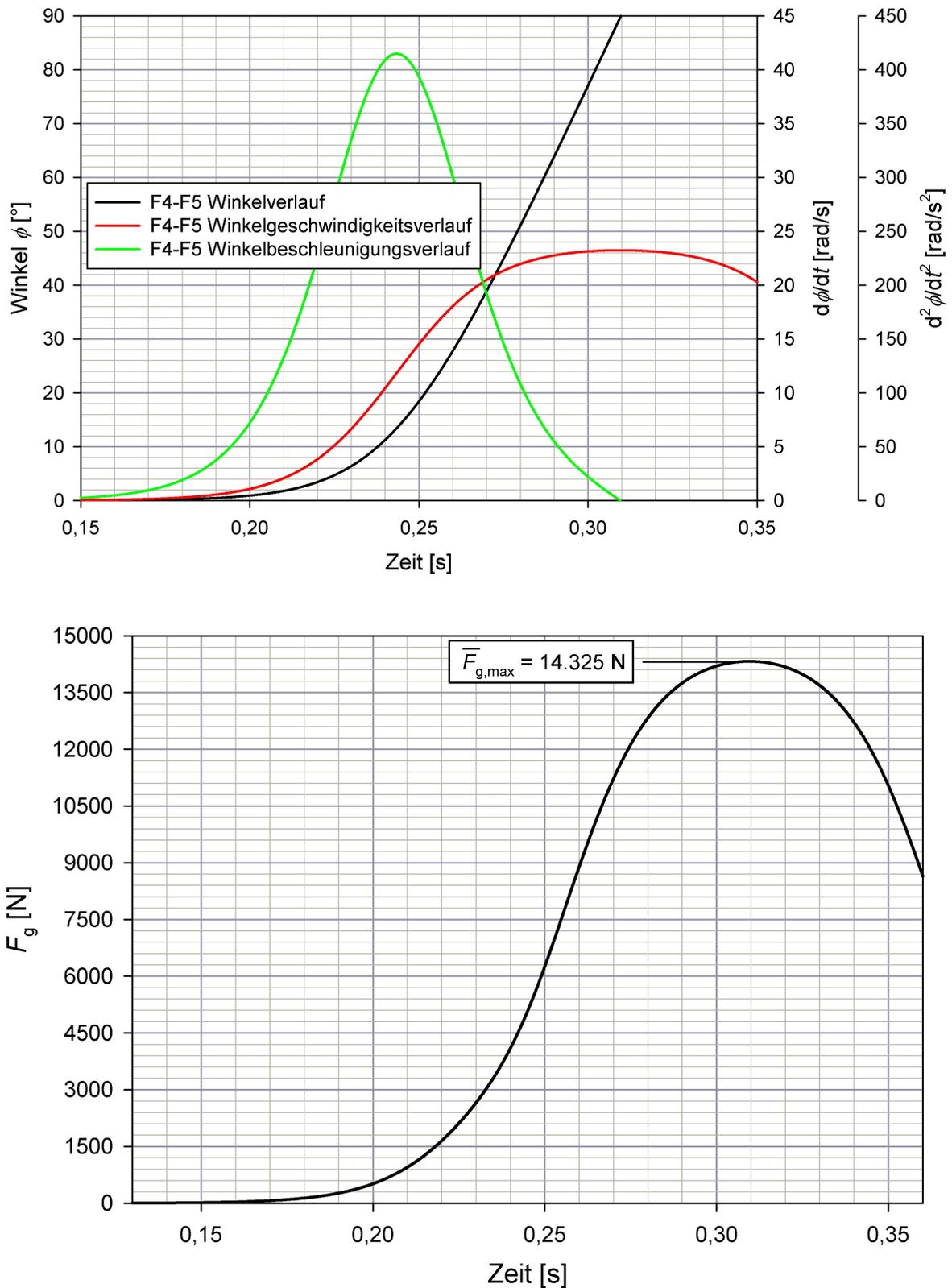


Abbildung 4.15: Mittlerer zeitlicher Winkelverlauf der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen F4 und F5. Weiterhin sind die Verläufe der mittleren Klappenwinkelgeschwindigkeit und Klappenwinkelbeschleunigung gezeigt (oben). Verlauf der Gesamtkraft auf die Scharniere der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen F4 und F5 (unten).

Die Auswertung der Versuche F1-F3 ist im Anhang grafisch dargestellt. Die Entlastungsfähigkeit der Klappen E_F wurde gemäß [2] bestimmt. Einen Überblick über die Resultate der Auswertung gibt Tabelle 4.8.

Versuch	Staub	c_S [g/m ³]	t_v [s]	d_F [mm]	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]
F1-F3	124,6	0,110	0,54	3,50	11.193	98
F4-F5	108,8	0,164	0,62	3,80	14.325	71

Tabelle 4.8: Endgültige Ergebnisse der Versuche am 27 m³-Behälter.

Kapitel 5

Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die in Kapitel 4 dargestellten experimentellen Ergebnisse werden nun einer vergleichenden Analyse unterzogen. Dazu sind die Resultate aus den Tabellen 4.4 und 4.8 der besseren Übersicht halber in einer einzigen Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Versuche	$\bar{t}_{\text{Ö}}$ [ms]	\bar{p}_{dyn} [bar]	\bar{p}_{red} [bar]	$\overline{dp/dt_{\text{red}}}$ [bar/s]	$\bar{F}_{\text{g,max}}$ [N]	E_{F} [%]
C2-C8	37,3	0,206	0,54	9,45	1.398	64
C9-C12	47,4	0,104	0,41	8,61	848	99
F1-F3	124,6	0,110	0,54	3,50	11.193	98
F4-F5	108,8	0,164	0,62	3,80	14.325	71

Tabelle 5.1: Überblick über die Ergebnisse aller Versuche.

5.1.1 Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander

Als erstes wurden die Versuchsergebnisse untereinander verglichen. Dabei musste darauf geachtet werden, möglichst die Versuche (bzw. deren Ergebnisse) miteinander zu vergleichen, bei denen die Versuchsparameter p_{dyn} und p_{red} möglichst gleich waren. Kommen bei diesem Vergleich die Maßstäbe q aus Tabelle 3.2 für die einzelnen physikalischen Größen heraus, ist dynamische Ähnlichkeit zwischen den Versuchen am 1 m^3 - und 27 m^3 -Behälter bewiesen.

5.1.1.1 Vergleich der Versuchsreihen F4-F5 und C2-C8

Der Blick auf Tabelle 5.1 zeigt, dass die Bedingung möglichst gleicher p_{dyn} und p_{red} am ehesten auf die Versuchsreihen F4-F5 und C2-C8 zutrifft. Ein Vergleich dieser Versuchs-

F4-5/C2-8	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{\text{g,max}}$	E_{F}
q_i	2,92	0,8	1,15	0,4	10,2	1,1
q	3	1	1	0,33	9	1,06

Tabelle 5.2: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchsreihen F4-F5 und C2-C8.

ergebnisse liefert die Zahlen in Tabelle 5.2. Deutlich erkennt man, dass die Vorhersagen aus Tabelle 3.2 im Rahmen der Messgenauigkeit und der normalen Streuung bei dieser Art von Versuchen sehr gut wiedergegeben werden. Die Abweichung der q_i -Werte von den q -Werten liegt unter 20 %. Bei den Versuchen F4-F5 war der reduzierte Überdruck etwas höher als bei den Versuchen C2-C8. Gleichzeitig verhielt es sich beim dynamischen Ansprechdruck genau umgekehrt. Das spricht dafür, dass der K_{St} bei den Versuchen F4-F5 etwas höher war als bei den Versuchen C2-C8. Das erklärt, warum das Verhältnis der maximalen Kräfte auf die Scharniere $F_{\text{g,max}}$ etwas zu groß ist. Aus dem gleichen Grund ist auch das Verhältnis der Klappenöffnungsdauern geringfügig zu klein. Dass dieses Verhältnis nicht noch kleiner ist liegt daran, dass der dynamische Ansprechdruck bei den Versuchen F4-F5 niedriger war als bei den Versuchen C2-C8. Im Großen und Ganzen sind die Vorhersagen damit glänzend bestätigt worden.

5.1.1.2 Vergleich der Versuchsreihen F1-F3 und C2-C8

Als nächstes bietet sich der Vergleich der Versuchsergebnisse der Reihen F1-F3 und C2-C8 an. Diese Versuchsreihen passen bezüglich des reduzierten Überdrucks gut zusammen. Es ergeben sich die Zahlen aus Tabelle 5.3. Die relativ große Abweichung des Klappenöffnungszeitverhältnisses von rund 30 % vom Soll-Wert liegt im großen Unterschied beim dynamischen Ansprechdruck begründet. Darin ist auch der Grund für die stark unterschiedlichen Entlastungsfähigkeiten der Klappen bei diesen beiden Versuchsreihen zu sehen. Es ist davon auszugehen, dass die K_{St} -Werte bei der Versuchsreihe F1-F3 größer waren als bei der Versuchsreihe C2-C8. Wäre dem nicht so gewesen, hätte der mittlere reduzierte Überdruck bei C2-C8 höher sein müssen als bei F1-F3, da ja der dynamische Ansprechdruck bei F1-F3 nur halb so groß war wie bei C2-C8. Dadurch, dass bei der Versuchsreihe F1-F3 die Klappe vergleichsweise früh geöffnet hat, waren Druckanstiegsgeschwindigkeit und Überdruck im Behälter zu Beginn Ihrer Öffnungsbewegung relativ klein. Das hatte zur Folge, dass die Klappe bei F1-F3 weniger stark beschleunigt wurde als die Vergleichsklappe bei C2-C8. Letztere öffnete als Druckanstiegsgeschwindigkeit und Überdruck im Behälter schon vergleichsweise hoch waren. Trotz der Abweichungen bestätigen auch diese Daten die theoretischen Voraussetzungen.

F1-3/C2-8	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{\text{g,max}}$	E_{F}
q_i	3,34	0,53	1,0	0,37	8,0	1,53
q	3	1	1	0,33	9	1,06

Tabelle 5.3: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchsreihen F1-F3 und C2-C8.

F1-3/C9-12	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{\text{g,max}}$	E_{F}
q_i	2,63	1,06	1,32	0,41	13,2	0,99
q	3	1	1	0,33	9	1,06

Tabelle 5.4: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchsreihen F1-F3 und C9-C12.

5.1.1.3 Vergleich der Versuchsreihen F1-F3 und C9-C12

Weiterhin werden nun die Versuchsergebnisse der Reihen F1-F3 und C9-C12 miteinander verglichen. Diese Versuchsreihen passen zumindest bezüglich des dynamischen Ansprechdrucks gut zusammen. Es ergeben sich die Zahlen aus Tabelle 5.4. Auffällig ist, dass es beim reduzierten Überdruck und vor allem bei der maximalen Kraft auf die Klappenscharniere größere Abweichungen in der Größenordnung 40% gibt. Weil die dynamischen Ansprechdrücke bei diesen beiden Versuchsreihen aber ähnlich waren, müssen unterschiedliche K_{St} -Werte geherrscht haben. Offenbar waren die K_{St} -Werte bei den Versuchen C9-C12 durchweg zu niedrig (deutlich unter $100 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$), was zu den vergleichsweise kleinen reduzierten Überdrücken und den langen Klappenöffnungszeiten führte. Kleine reduzierte Überdrücke und lange Klappenöffnungszeiten bei C9-C12 führen zu dem zu großen Verhältnis bei p_{red} und $F_{\text{g,max}}$ sowie zum zu kleinen Verhältnis bei $t_{\ddot{O}}$ in Tabelle 5.4.

5.1.1.4 Vergleich der Versuchsreihen F4-F5 und C9-C12

Der Vollständigkeit halber wurden auch die Versuchsreihen F4-F5 und C9-C12 miteinander verglichen. Die Werte in Tabelle 5.5 zeigen aber recht große Abweichungen zwischen den q_i und q . Das liegt zum einen an den unterschiedlichen dynamischen Ansprechdrücken und zum anderen an den zu niedrigen K_{St} -Werten bei der Versuchsreihe C9-C12 (siehe vorigen Abschnitt 5.1.1.3). Dadurch ergaben sich stark unterschiedliche reduzierte Überdrücke und damit auch relativ verschiedene Klappenöffnungszeiten. Bei den Versuchsreihen F4-F5 und C2-C8 wirkten gewissermaßen die beiden Parameter p_{dyn} und K_{St} in die gleiche Richtung zu Ungunsten gut vergleichbarer Ergebnisse.

F4-5/C9-12	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{\text{g,max}}$	E_{F}
q_i	2,3	1,39	1,57	0,44	16,9	0,72
q	3	1	1	0,33	9	1,06

Tabelle 5.5: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchsreihen F4-F5 und C9-C12.

5.1.1.5 Vergleich der Versuchsreihen F und C

Zum Abschluss dieses Abschnitts wurden die Resultate der Versuchsreihen am 27 m^3 -Behälter (F-Versuchsreihen) und am 1 m^3 -Behälter (C-Versuchsreihen) gemittelt und in Tabelle 5.6 ins Verhältnis gesetzt. Auch hier zeigt sich, dass die Vorhersagen im Rahmen der statistischen Schwankungen bei dieser Art von Versuchen bestätigt werden.

F/C	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{g,\text{max}}$	E_{F}
q_i	2,76	0,88	1,22	0,4	11,4	1,04
q	3	1	1	0,33	9	1,06

Tabelle 5.6: Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchsreihen F und C.

5.1.2 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Vorhersagen von ExProtect

Ebenfalls interessant ist der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Zahlen aus Tabelle 3.2. Wie schon in Abschnitt 3.2 ausgeführt, stammen diese Zahlen aus Berechnungen, die mit dem Programm ExProtect durchgeführt wurden. Zwar wurde bei der Planung mit Maisstärke anstatt mit Weizenmehl gerechnet, was aber nicht von Relevanz ist, da mit einem K_{St} -Wert von 100 bar · m/s gerechnet wurde. Dieser Wert wurde auch bei den Versuchsreihen eingestellt. In Tabelle 5.7 sind die Simulationsergebnisse von ExProtect für den 1 m³-Behälter und den 27 m³-Behälter den mittleren Ergebnissen der C-Versuche und F-Versuche gegenübergestellt. In der fünften und letzten Zeile der Tabelle sind die jeweils zusammengehörigen Werte ins Verhältnis gesetzt. Im Idealfall müssten alle diese Verhältniszahlen den Wert 1 ergeben. Wie man sieht, sind fast alle Verhältniszahlen sehr nah am Wert 1. Das bedeutet zum einen, dass die Vorhersagen mit ExProtect von hoher Qualität sind. Zum anderen heißt das aber auch, dass die q aus Tabelle 3.2 recht gut im Experiment bestätigt wurden. Dies ist ein weiterer Beweis dafür, dass bei Baumusterprüfungen im Modellmaßstab dynamische Ähnlichkeit herrscht. Baumusterprüfungen im Modellmaßstab sind deshalb durchführbar!

1 m ³ -Behälter						
Größen	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{g,\text{max}}$	E_{F}
ExProtect	40 ms	0,1 bar	0,48 bar	9,24 bar/s	1,32 kN	83 %
C-Versuche	42,3 ms	0,15 bar	0,48 bar	9,03 bar/s	1,12 kN	82 %
ExProtect/C	0,95	0,67	1,0	1,02	1,18	1,01
27 m ³ -Behälter						
Größen	$t_{\ddot{O}}$	p_{dyn}	p_{red}	dp/dt_{red}	$F_{g,\text{max}}$	E_{F}
ExProtect	122,5 ms	0,1 bar	0,53 bar	3,48 bar/s	12,0 kN	88 %
F-Versuche	116,7 ms	0,14 bar	0,58 bar	3,65 bar/s	12,7 kN	88 %
ExProtect/F	1,05	0,71	0,91	0,95	0,94	1,0

Tabelle 5.7: Vergleich der Ergebnisse von ExProtect für den 1 m³-Behälter mit denen der Versuchsreihen C und der Ergebnisse von ExProtect für den 27 m³-Behälter mit denen der Versuchsreihen F.

5.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde experimentell bestätigt, dass Baumusterprüfungen im Modellmaßstab zu physikalisch sinnvollen Ergebnissen führen. Damit sind diese in Zukunft sicher durchführbar.

Während der Durchführung der in Kapitel 3 beschriebenen Experimente sind einige Schwächen aufgefallen, über deren Verbesserung nachgedacht werden sollte.

5.2.1 Statischer Ansprechdruck durch Kunststofffolien

Zur Einstellung von definierten K_{St} -Werten in den Behältern auf dem Versuchsfeld und zur Durchführung von Referenzversuchen bei Baumusterprüfungen von Druckentlastungsklappen sind Druckentlastungselemente mit bekanntem statischen Ansprechdruck erforderlich. Auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck werden diese Druckentlastungselemente durch Kunststofffolien verschiedener Stärke realisiert, mit denen die Druckentlastungsflächen verschlossen werden. Folien mit gleicher Stärke und Fläche sollen immer bei gleichem Überdruck im Behälter zerreißen bzw. die Druckentlastungsfläche freigeben. Bei den ihm Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde allerdings festgestellt, dass die Druckwerte, bei denen die Folien zerreißen, teilweise sehr unterschiedlich waren. Es fiel auf, dass manche Folien Schwachstellen hatten und deshalb bei zu niedrigem Druck rissen. Um dies in Zukunft zu vermeiden, sollten Folien verwendet werden, die möglichst homogen sind. Dies könnte durch die Benutzung anderer Materialien oder von Folien besserer Qualität erreicht werden.

5.2.2 Statischer Ansprechdruck durch Kunststoffschrauben

Ein weiteres Problem war das Einstellen eines statischen Ansprechdrucks bei den Druckentlastungsklappen mit Hilfe von Kunststoffschrauben. Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.4 hätten je 2 Schrauben M2 und M6 einen statischen Ansprechdruck von rund 0,1 bar an den Druckentlastungsklappen bewirken sollen. Laborversuche im Rahmen des Projektes F-05-0301 ergaben die in Abschnitt 3.4 verwendeten Schraubenbruchlasten, welche auch einigermaßen mit den vom Hersteller angegebenen Bruchlasten überein stimmten. Ganz anders verhielten sich die Kunststoffschrauben bei den im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Versuche. Beim Klappenöffnungsvorgang brachen die Schrauben nicht, sondern die Muttern wurden über die Gewinde der Schrauben abgezogen. So kam es, dass die Druckentlastungsklappen nicht bei den berechneten statischen Ansprechdrücken öffneten. Auch der Maßstab $q = 3$ konnte dadurch nicht eingehalten. Offenbar liegt der Maßstab beim Gewindeausriss zwischen 2 und 3 mit Tendenz zu 2. Aus diesem Grund sollten in Zukunft weitere Untersuchungen zur Belastbarkeit von Kunststoffschrauben unter verschiedenen Belastungsszenarien durchgeführt werden. Das Ziel einer solchen Untersuchung wäre die Klärung der Frage, unter welchen Bedingungen Schrauben brechen oder das Gewinde ausreißt. Die Frage nach q sollte bei solchen Untersuchungen ebenfalls beantwortet werden. Das Alter der Schrauben wäre ein weiterer Parameter, der eine Rolle spielen könnte und der Untersuchung bedarf.

Literaturverzeichnis

- [1] W. BARTKENCHT: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, 1993.
- [2] VDI: *VDI Richtlinie 3673, Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, 2002.
- [3] W. GREINER: *Mechanik, Teil 2*, Harri Deutsch Verlag, 1989
- [4] D. LORENZ: *Baumusterprüfung von Druckentlastungselementen im Modellmaßstab*, Jahrbuch Prävention 2009, 76-78, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, 2009.
- [5] D. LORENZ: *Untersuchung zur Mechanik von Druckentlastungsklappen und -deckeln beim Entlastungsvorgang*, Abschlussbericht zum Projekt Nr. F-05-9304 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 1996.
- [6] D. LORENZ, H. SCHIEBLER: *Am Markt orientierte Weiterentwicklung von ExProtect*, Abschlussbericht zur Entwicklung von ExProtect 4.2.0, Projekt Nr. G-05-9802, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2005.
- [7] D. LORENZ: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2009.
- [8] H. OTT: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2009.
- [9] P. SCHEPP: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2009.
- [10] H. SCHIEBLER: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2009.
- [11] M. SEITHEL: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2009.
- [12] J. WOLF: *Private Mitteilung*, Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., 2009.

Anhang A

Messergebnisse

Versuch	d_F [mm]	$p_{\text{stat}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{stat}}(\text{P2})$ [bar]
B5	0,05	0,046	0,048
B6	0,05 + 0,03	0,159	0,165
B7	0,03 + 0,03	0,183	0,160
B8	0,05	undicht	undicht
B9	0,05	0,106	0,105
B10	0,05	0,051	0,050
B11	0,05	0,053	0,049
B12	0,1	0,152	0,149
B13	0,1	0,163	0,156
B14	0,1	0,118	0,100

Tabelle A.1: Bei den Versuchen B5-B14 gemessener statischer Ansprechdruck p_{stat} am 1 m³-Behälter mit Kunststofffolien verschiedener Stärke d_F . Die Kunststofffolien wurden zuweilen auch miteinander kombiniert. Die Versuche wurden am 14. 05. 2009 durchgeführt. Wetterdaten: T zwischen 13° und 14°, $p = 948$ mbar und F_{rel} zwischen 71 % und 72 %.

Versuch	$n (l_1)$	$n (l_2)$	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]	p_{dyn} [bar]
C1	-	$2 \times \text{M2}$	0,497	0,499	< 0,06
C2	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,430	0,429	0,251
C3	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,431	0,427	0,208
C4	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,490	0,495	0,215
C5	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,534	0,570	0,213
C6	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,534	0,545	0,239
C7	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,577	0,567	0,187
C8	$2 \times \text{M3}$	$2 \times \text{M3}$	0,575	0,575	0,174
C9	$2 \times \text{M2}$	$2 \times \text{M2}$	0,433	-	0,11
C10	$2 \times \text{M2}$	$2 \times \text{M2}$	0,350	0,355	0,100
C11	$2 \times \text{M2}$	$2 \times \text{M2}$	0,458	0,450	0,117
C12	$2 \times \text{M2}$	$2 \times \text{M2}$	0,398	0,400	0,090

Tabelle A.2: Ergebnisse der Versuche C1-C12 am 1 m^3 -Behälter. Beim Versuch C1 öffnete die Klappe bereits während des Einblasvorganges. Die Versuche wurden am 13. und 14. 05. 2009 sowie am 09. 06. 2009 durchgeführt. Wetterdaten: T zwischen 13° und 17° und p zwischen 948 mbar und 951 mbar. Die relative Luftfeuchtigkeit F_{rel} lag bei den Versuchen C1-C7 zwischen 38 % und 53 %, bei C8 bei 71 % und bei C9-C12 bei 19 %.

Versuch	d_{F} [mm]	$p_{\text{stat}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{stat}}(\text{P2})$ [bar]
D4	0,2	0,106	0,112
D5	0,2	undicht	undicht
D6	0,2	0,113	0,118

Tabelle A.3: Bei den Versuchen D4-D6 gemessener statischer Ansprechdruck p_{stat} am 27 m^3 -Behälter mit Kunststofffolien. Die Versuche wurden am 27. 05. 2009 durchgeführt. Wetterdaten: $T = 13^\circ$, $p = 965$ mbar und $F_{\text{rel}} = 55$ %.

Versuch	Staub	c_{S} [g/m^3]	t_{v} [s]	d_{F} [mm]	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]
E1	Weizenmehl	1.250	0,9	0,2	0,139	0,137
E2	Weizenmehl	750	0,6	0,2	0,422	0,412
E3	Weizenmehl	750	0,6	0,2	0,590	0,599
E4	Weizenmehl	750	0,6	0,2	0,384	0,385
E5	Weizenmehl	750	0,6	0,2	0,543	0,534

Tabelle A.4: Ergebnisse der Versuche zur Einstellung des K_{St} -Wertes am 27 m^3 -Behälter. Vor Versuch E3 wurden die Ringdüsen gereinigt. Bei Versuch E4 waren die Ringdüsen verstopft.

Versuch	$n (l_1)$	$n (l_2)$	$p_{\text{red}}(\text{P1})$ [bar]	$p_{\text{red}}(\text{P2})$ [bar]	p_{dyn} [bar]
F1	-	$2 \times \text{M6}$	0,568	0,571	0,105
F2	-	$2 \times \text{M6}$	0,514	0,515	0,102
F3	-	$2 \times \text{M6}$	0,542	0,543	0,123
F4	$2 \times \text{M6}$	$2 \times \text{M6}$	0,662	0,663	0,160
F5	$2 \times \text{M6}$	$2 \times \text{M6}$	0,594	0,593	0,168
F6	$2 \times \text{M6}$	$2 \times \text{M6}$	0,656	0,652	0,098

Tabelle A.5: Ergebnisse der Versuche F1-F6 am 27 m³-Behälter. Die Versuche wurden am 02. und 03.06.2009 durchgeführt. Wetterdaten: T zwischen 14° und 19° und p zwischen 955 mbar und 956 mbar. Die relative Luftfeuchtigkeit F_{rel} lag zwischen 29% und 41%.

Anhang B

Grafiken

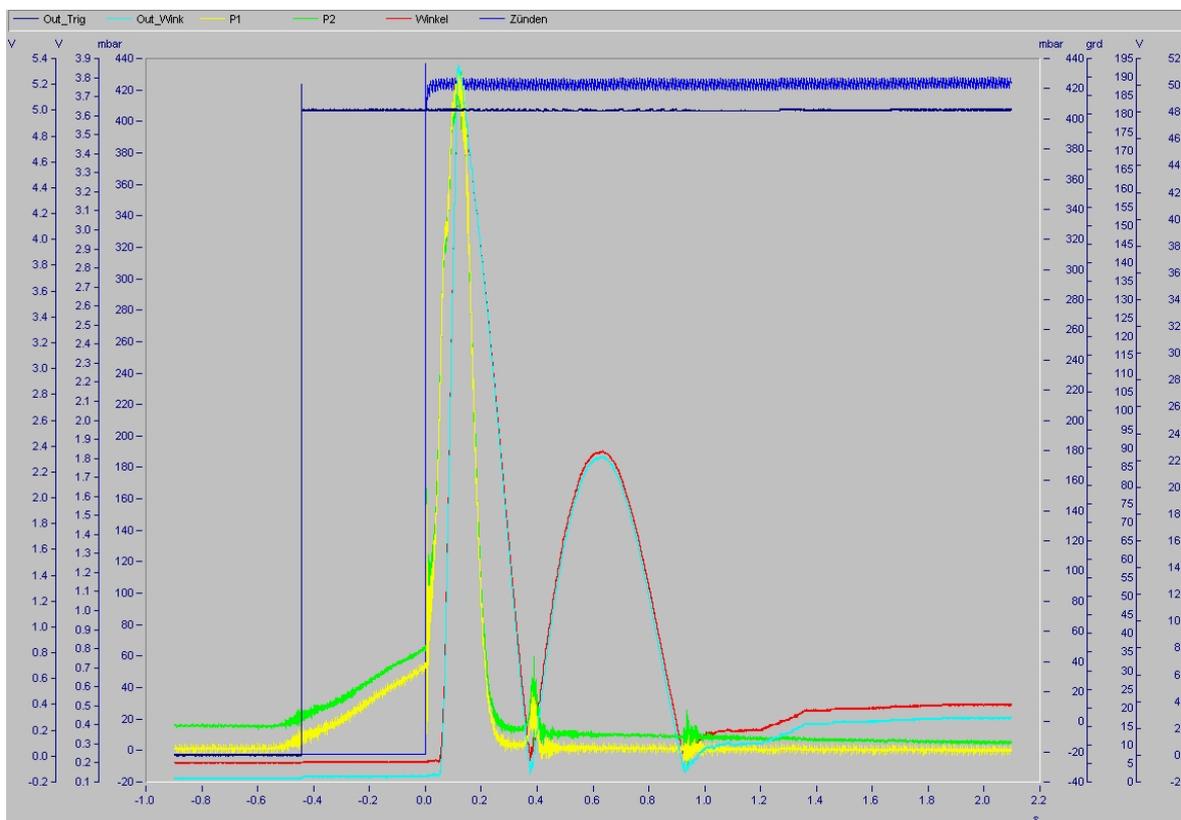


Abbildung B.1: Rohdaten des Versuchs C3 dargestellt im Programm IMC Look. Das Format der im Transientenrekorder gespeicherten Messdaten sind auf dieses Programm zugeschnitten.

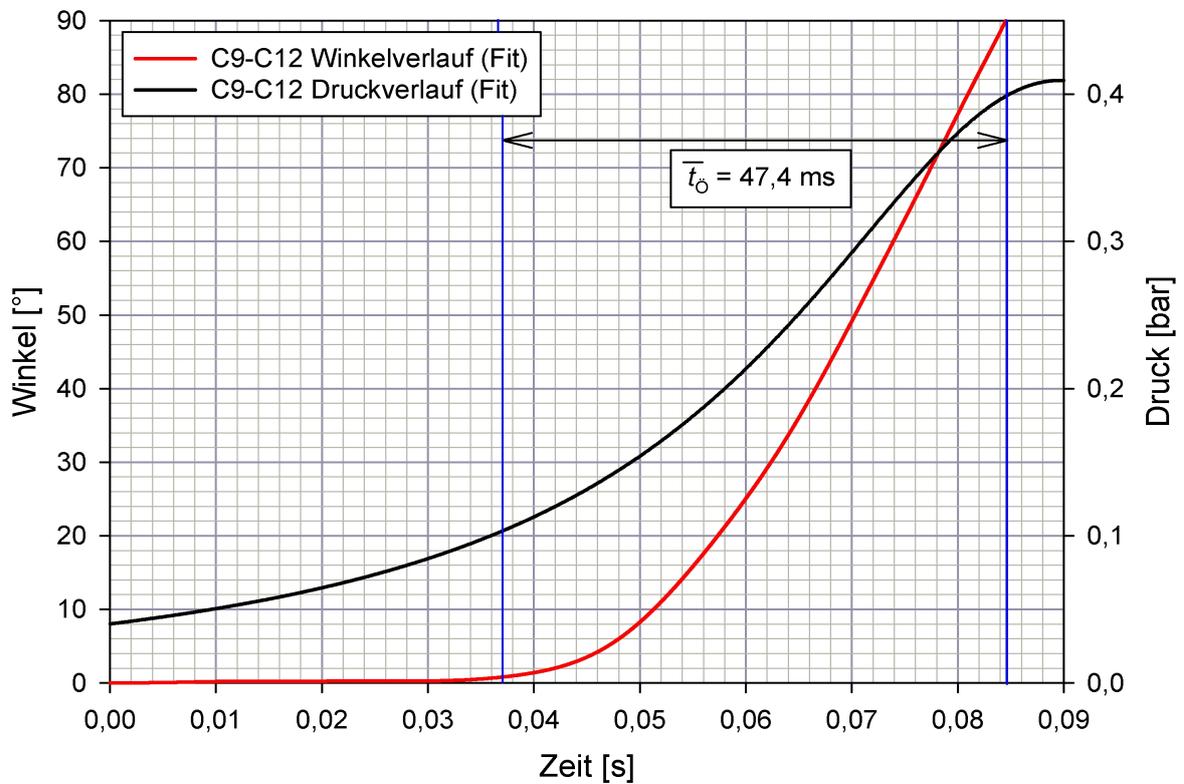
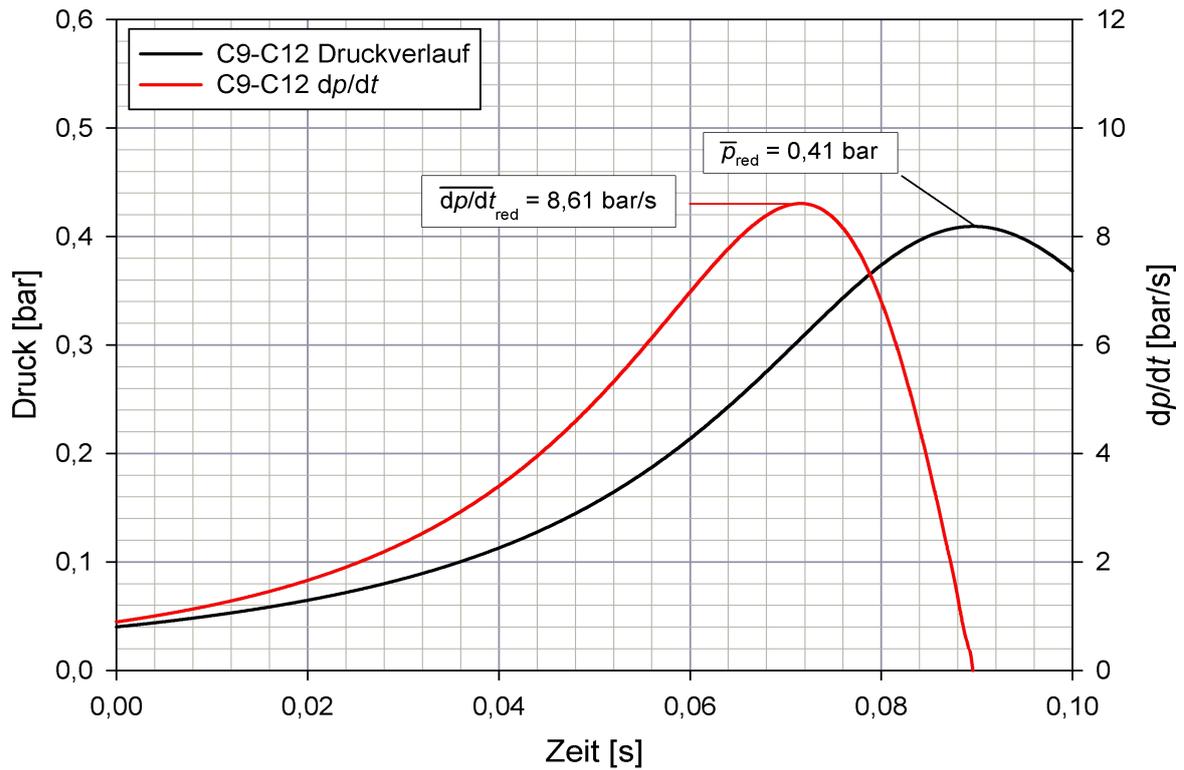


Abbildung B.2: Fit und erste zeitliche Ableitung der Druckkurven der Versuche C9-C12 (oben). Fits der Winkel- und Druckkurven der Versuche C9-C12. Bei der Klappenstellung $\varphi = 1^\circ$ beginnt der Klappenöffnungsvorgang (unten).

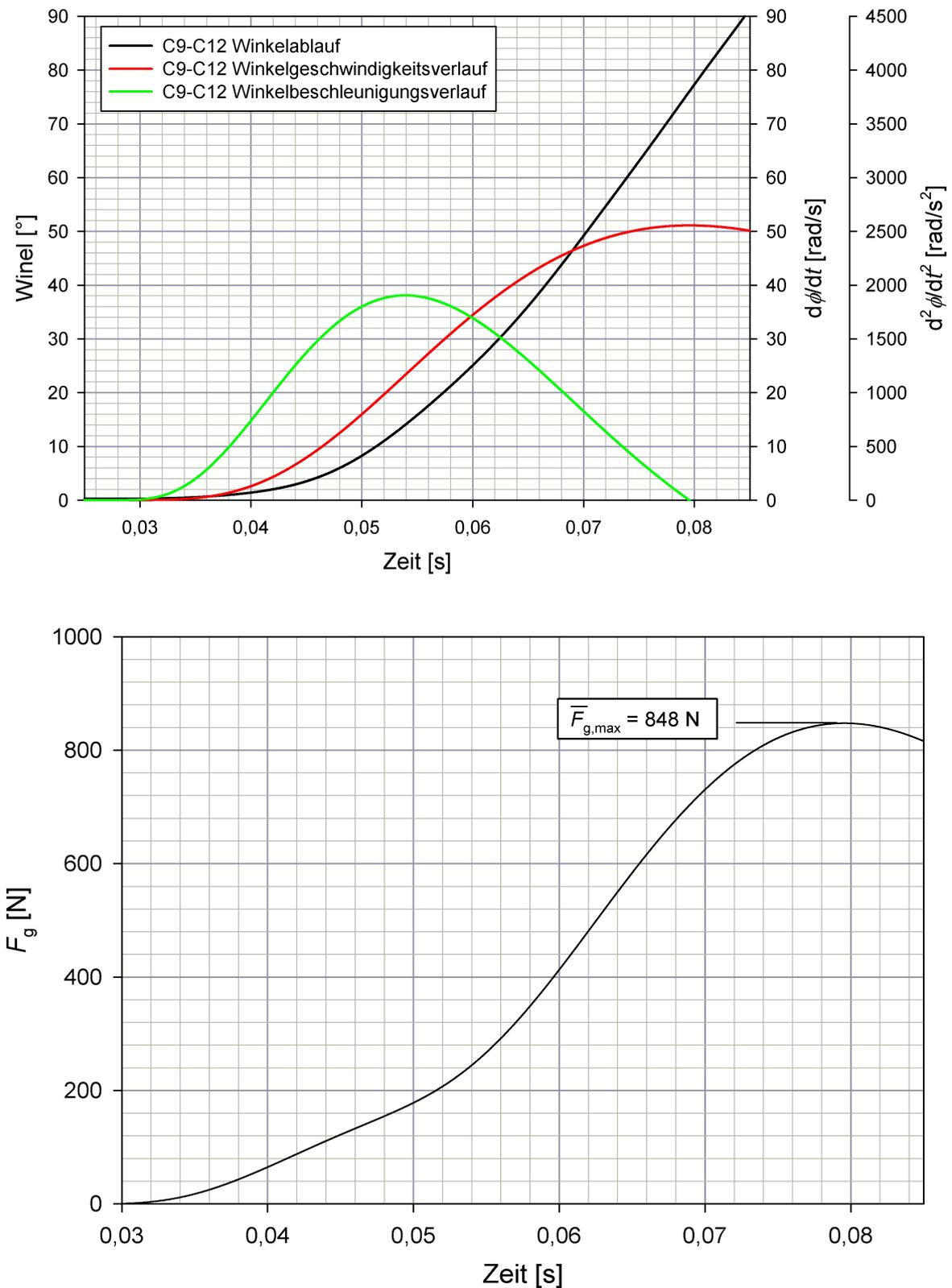


Abbildung B.3: Mittlerer zeitlicher Winkelverlauf der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen C9-C12. Weiterhin sind die Verläufe der mittleren Klappenwinkelgeschwindigkeit und Klappenwinkelbeschleunigung gezeigt (oben). Verlauf der Gesamtkraft auf die Scharniere der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen C9-C12 (unten).

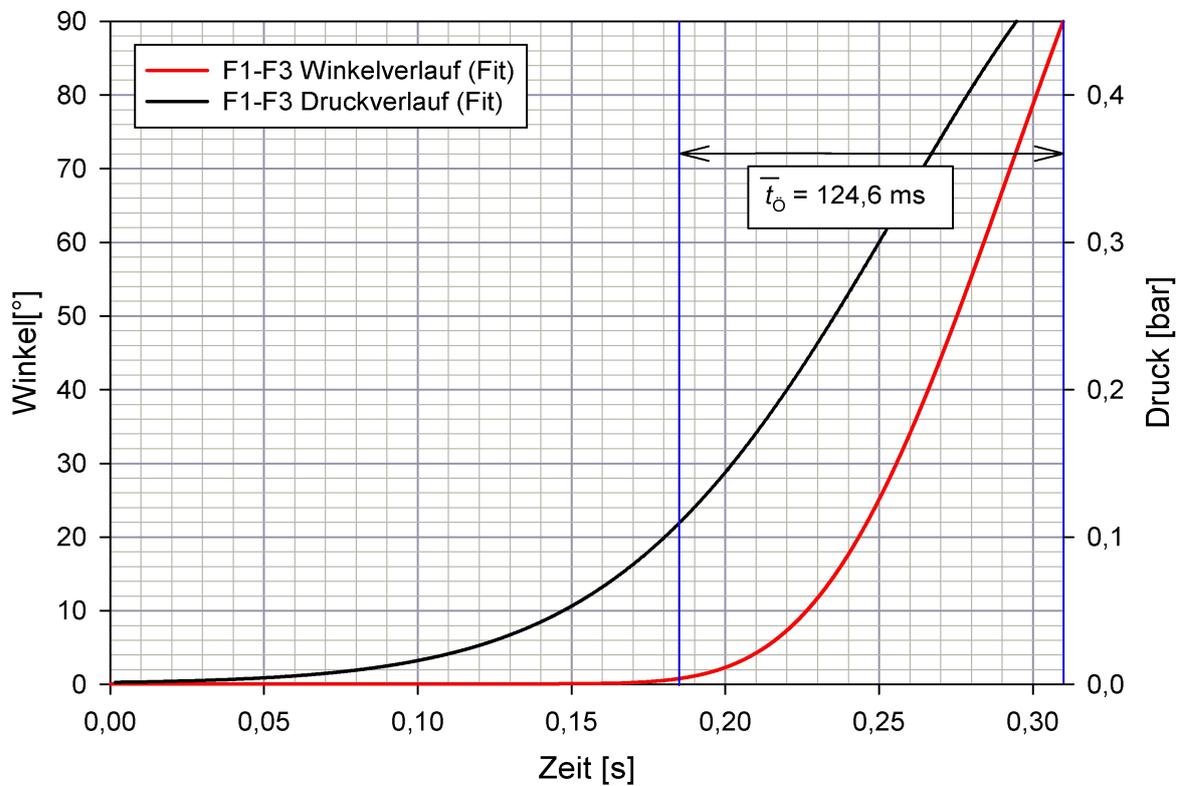
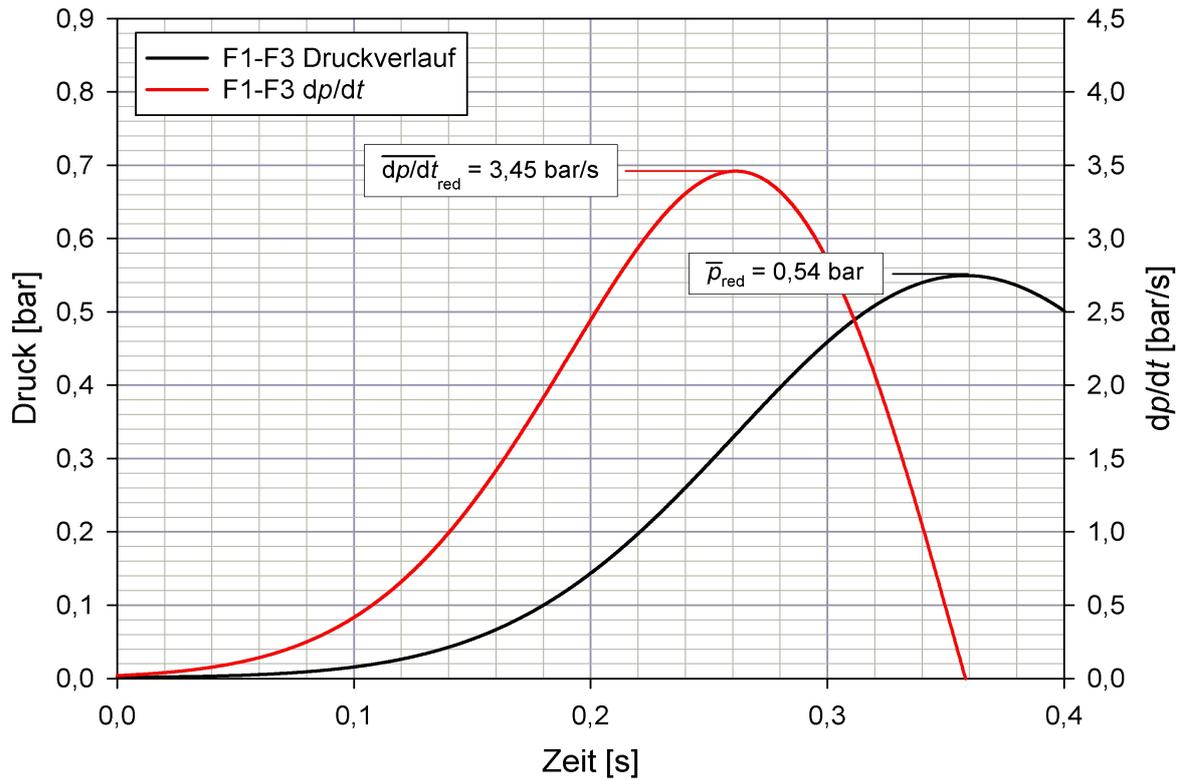


Abbildung B.4: Fit und erste zeitliche Ableitung der Druckkurven der Versuche F1-F3 (oben). Fits der Winkel- und Druckkurven der Versuche F1-F3. Bei der Klappenstellung $\varphi = 1^\circ$ beginnt der Klappenöffnungsvorgang (unten).

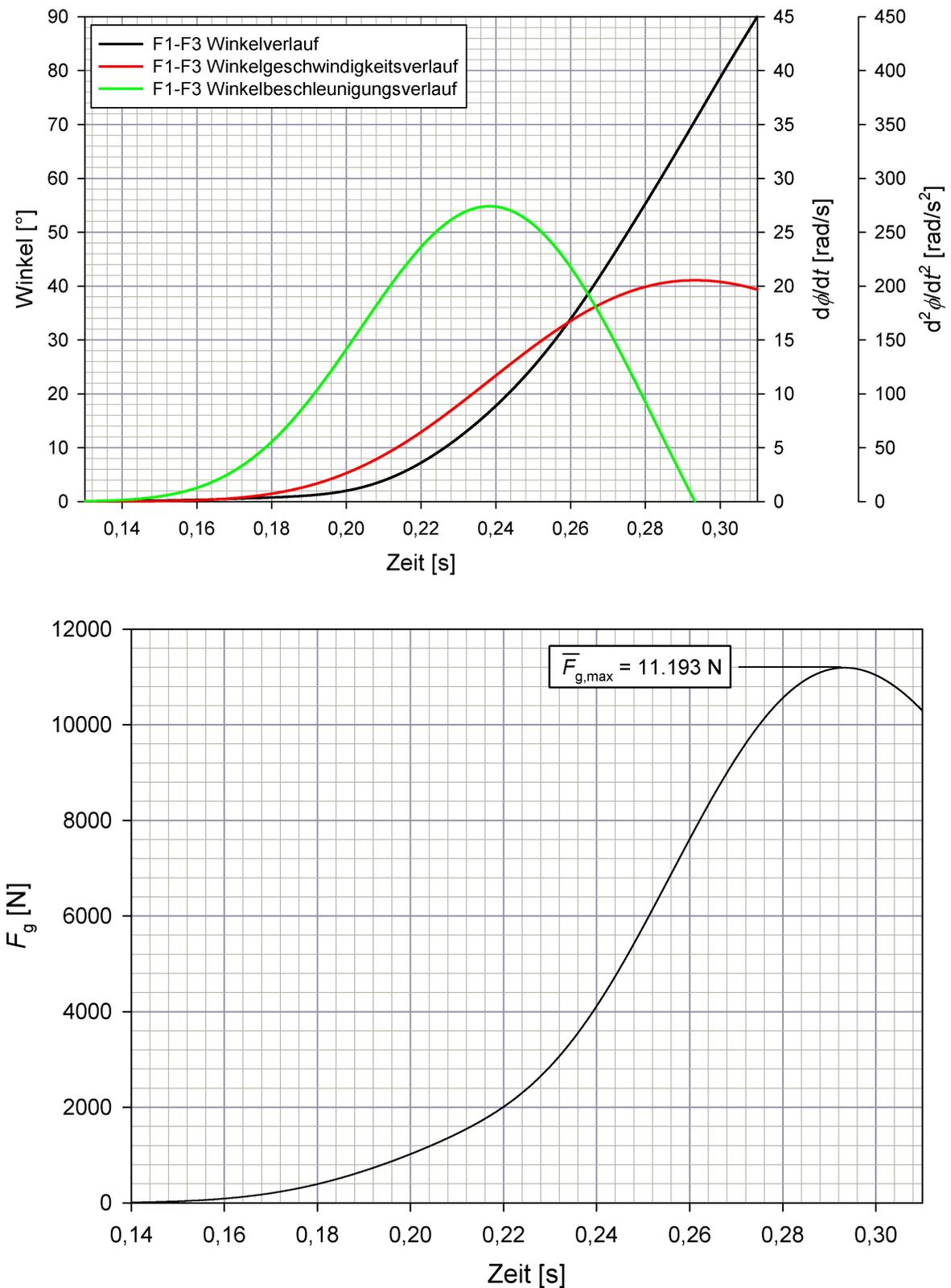
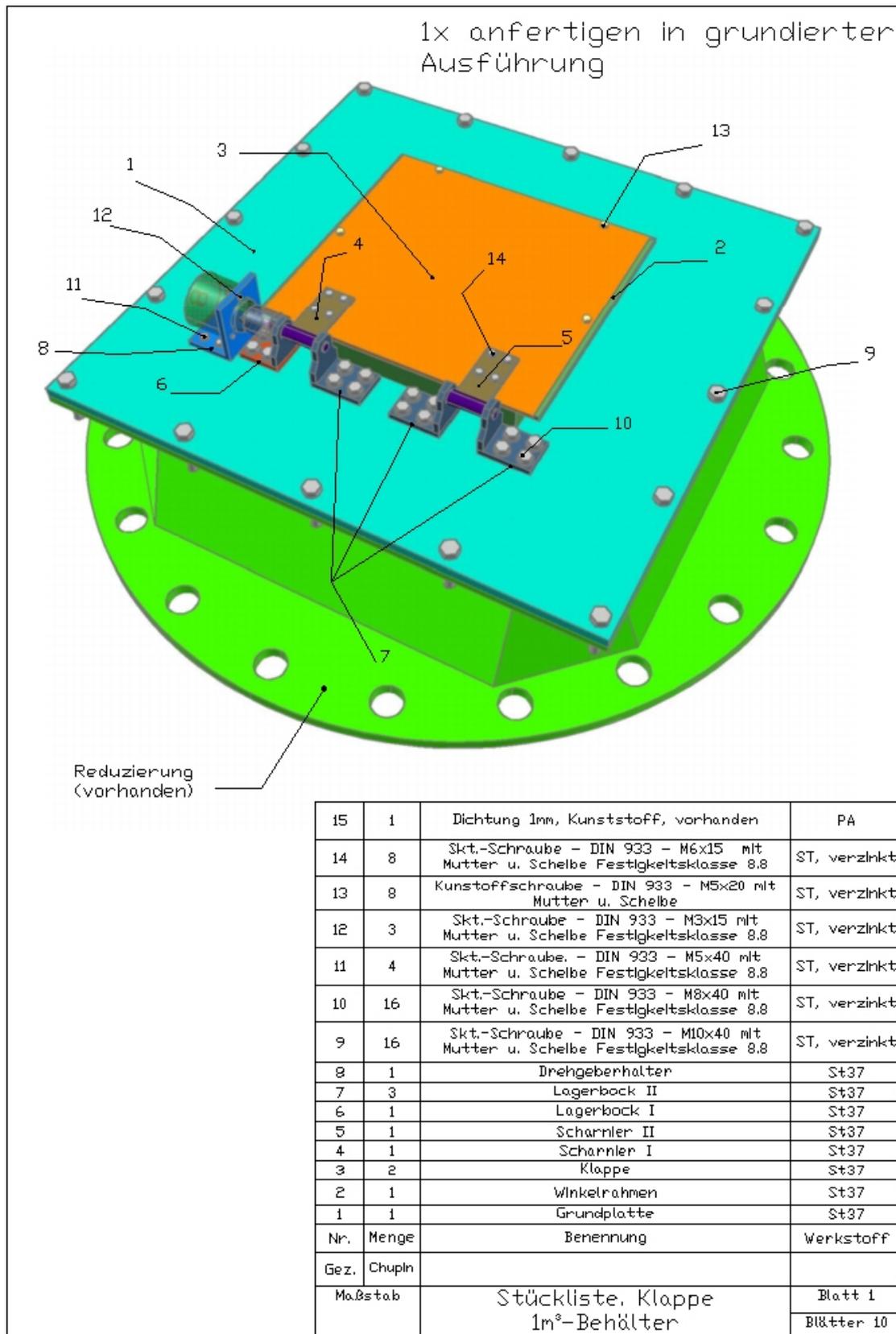
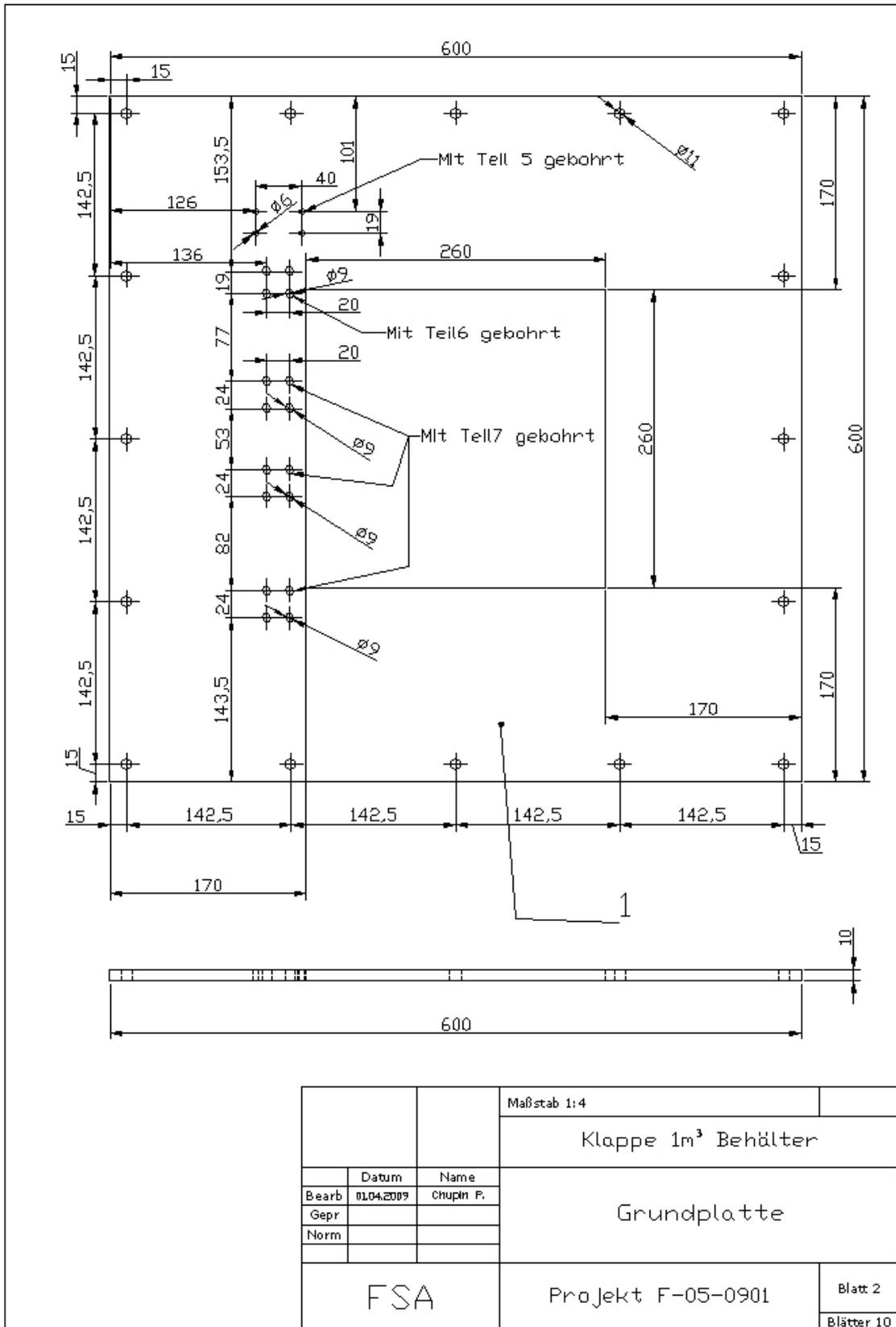


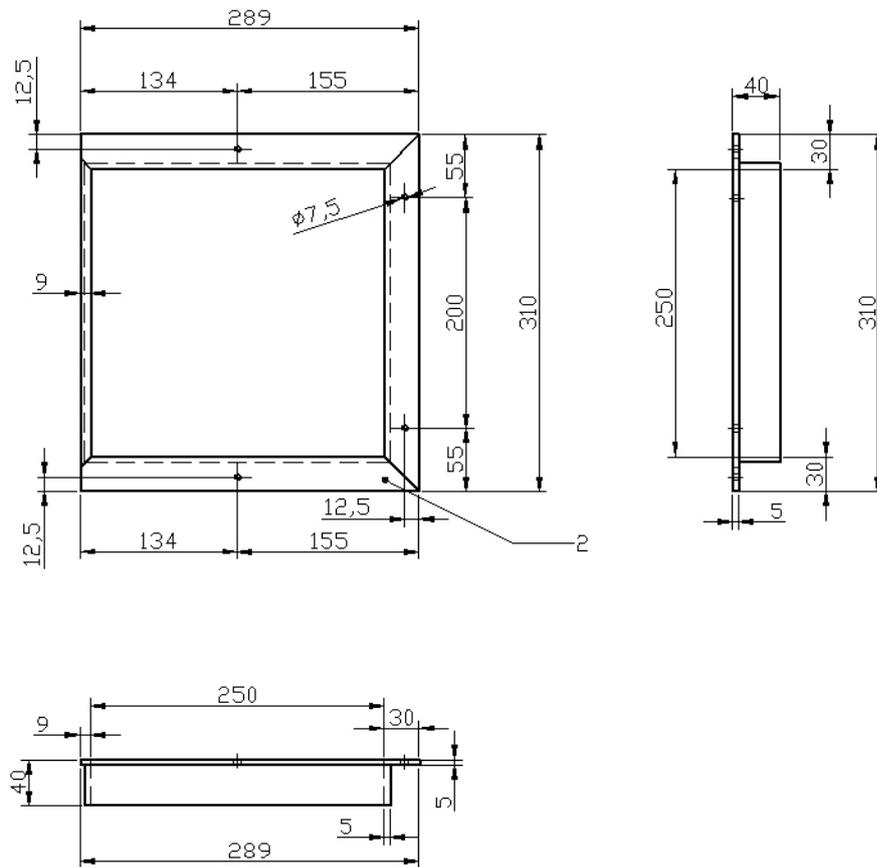
Abbildung B.5: Mittlerer zeitlicher Winkelverlauf der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen F1-F3. Weiterhin sind die Verläufe der mittleren Klappenwinkelgeschwindigkeit und Klappenwinkelbeschleunigung gezeigt (oben). Verlauf der Gesamtkraft auf die Scharniere der Druckentlastungsklappe bei den Versuchen F1-F3 (unten).

Anhang C

Konstruktionszeichnungen

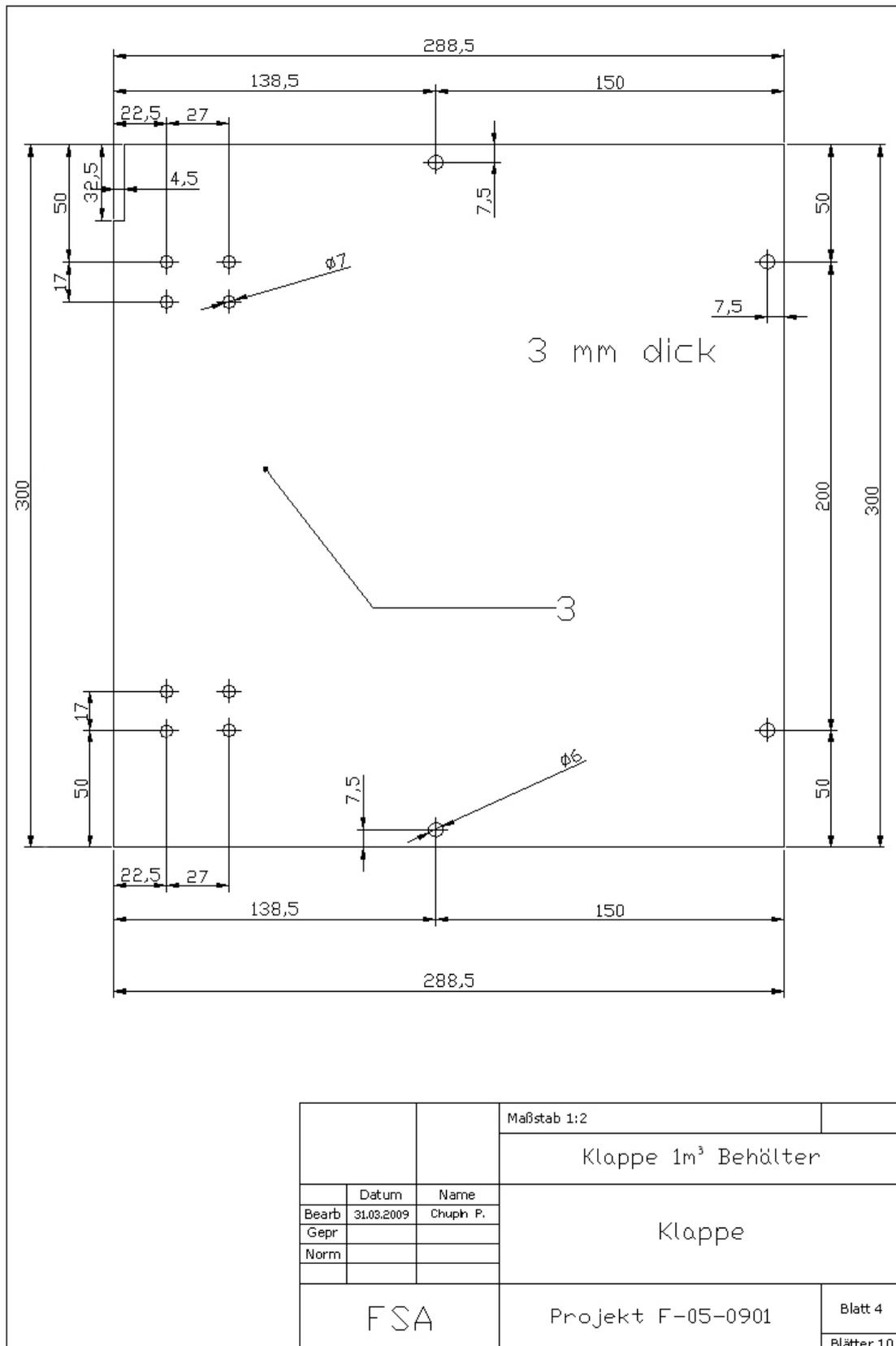


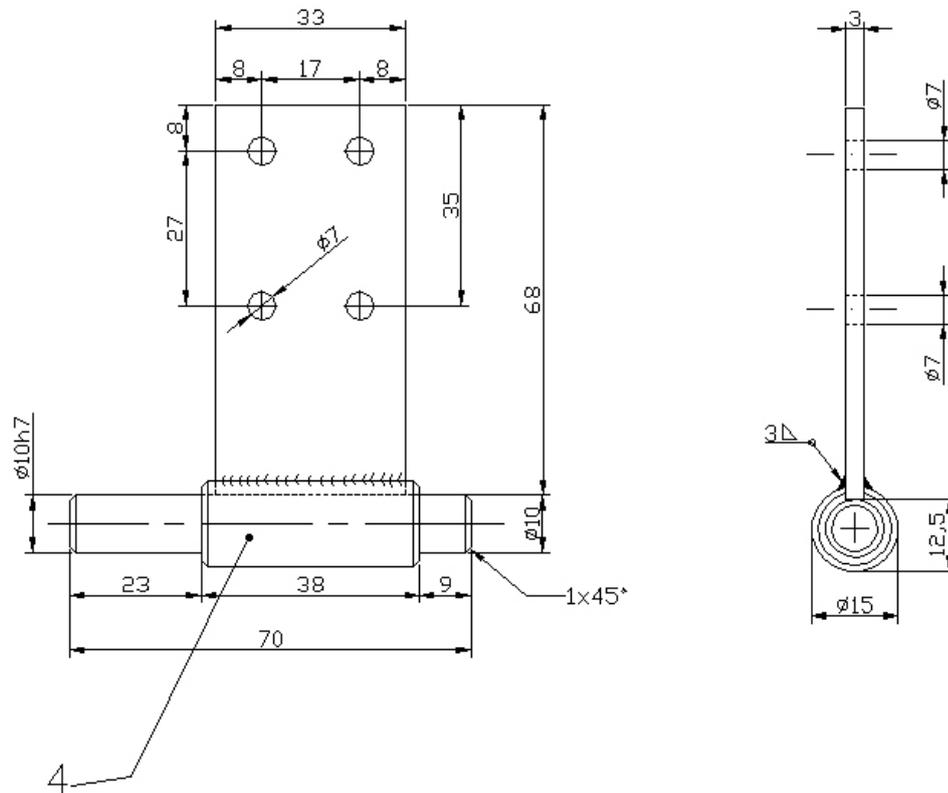




Winkelrahmen in Gehrung schneiden und
schweißen, einseitig auf 9mm Breite abschneiden

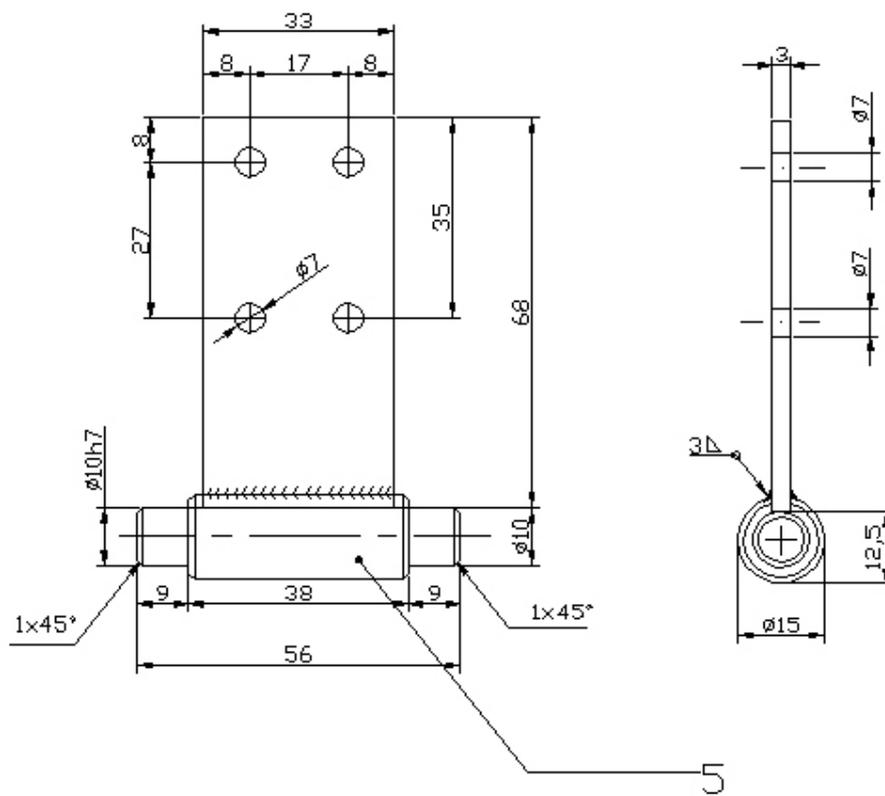
		Maßstab 1:5		
		Klappe 1m ³ Behälter		
	Datum	Name		Winkelrahmen
Bearb	27.04.2009	Chupin P.		
Gepr				
Norm				
FSA		Projekt F-05-0901		Blatt 3
				Blätter 9





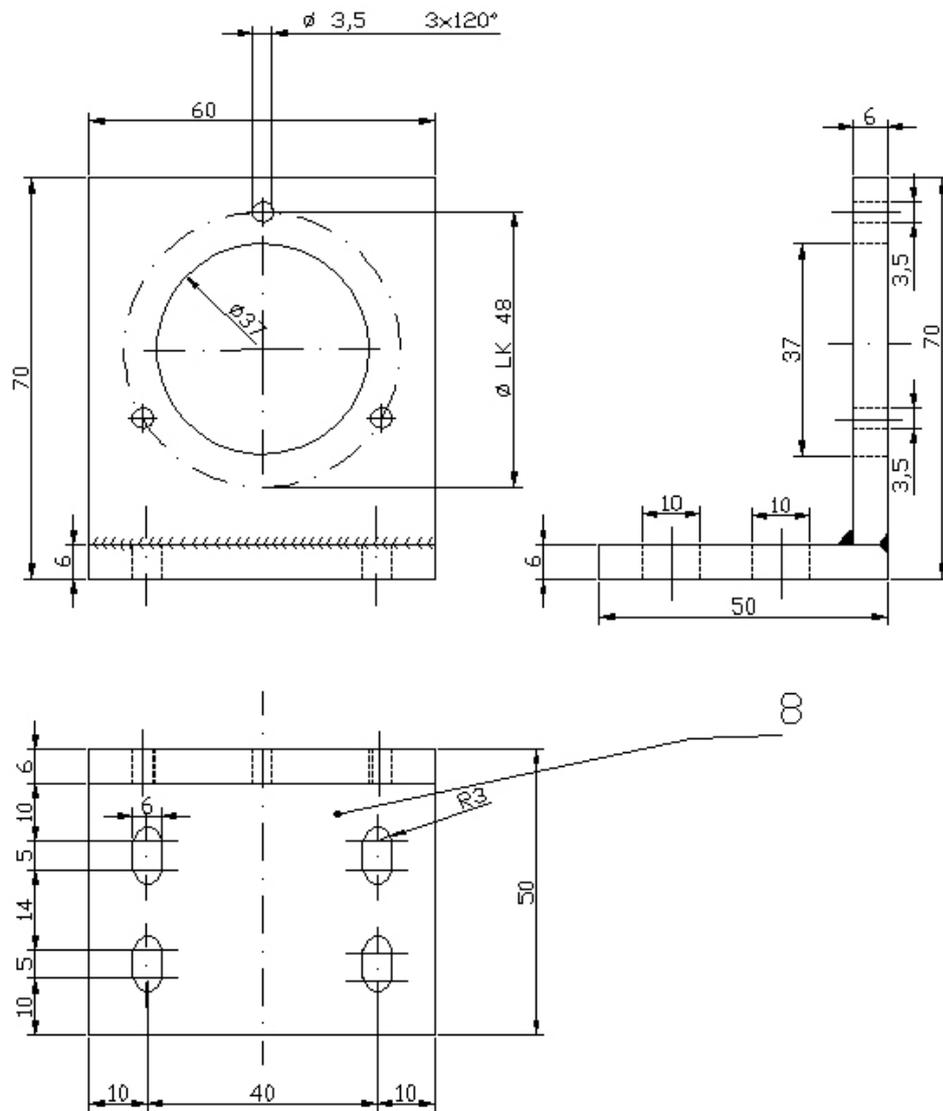
DIN 7168-fein

		Maßstab 1:1	
		Klappe 1m ³ Behälter	
	Datum	Name	
Bearb	31.03.2009	Chuph P.	
Gepr			
Norm			
FSA		Projekt F-05-0901	
		Blatt 5	
		Blätter 10	



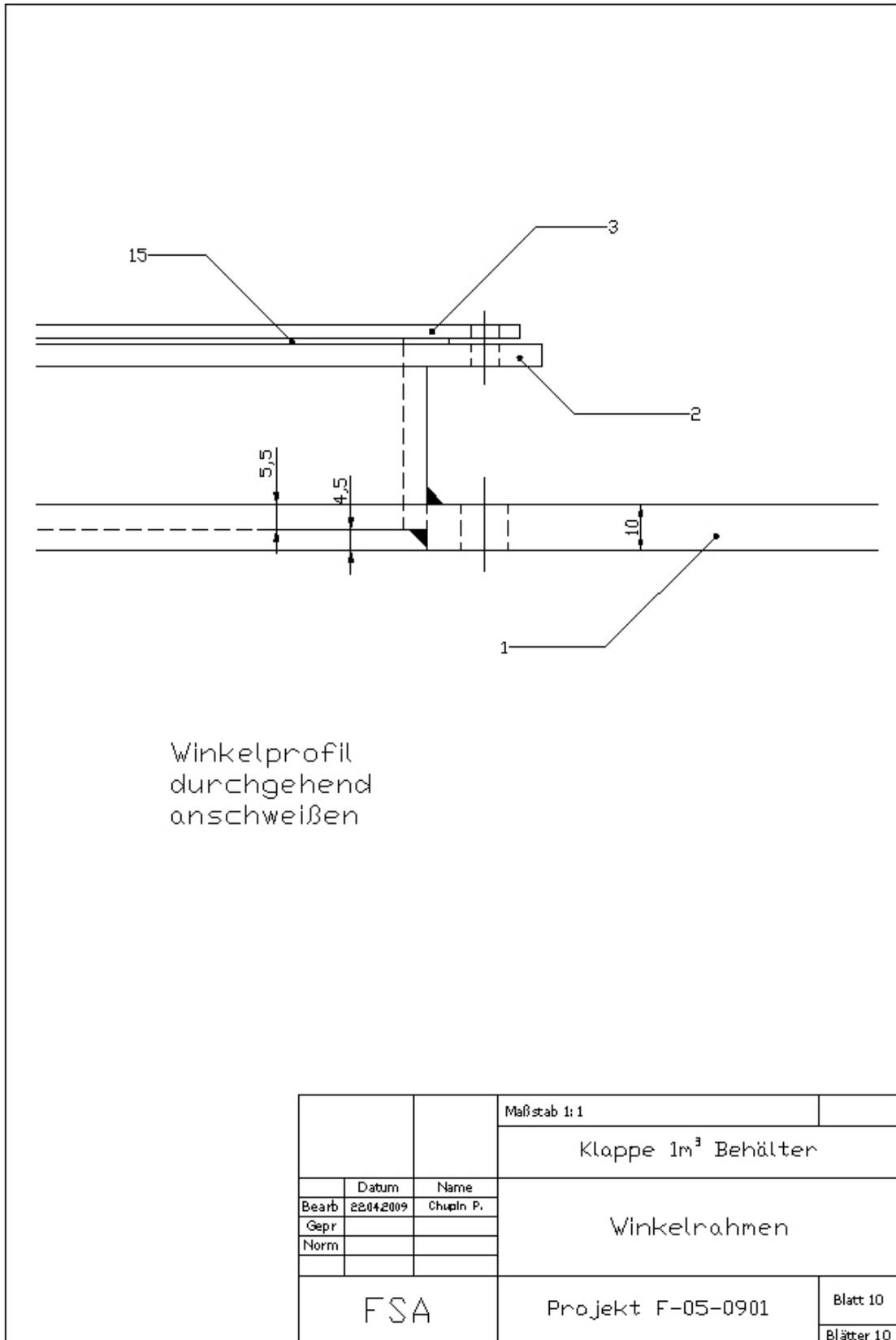
DIN 7168-fein

		Maßstab 1:1	
		Klappe 1m ³ Behälter	
	Datum	Name	
Bearb	30.03.2009	Chuph P.	
Gepr			
Norm			
FSA		Projekt F-05-0901	Blatt 6
			Blätter 10



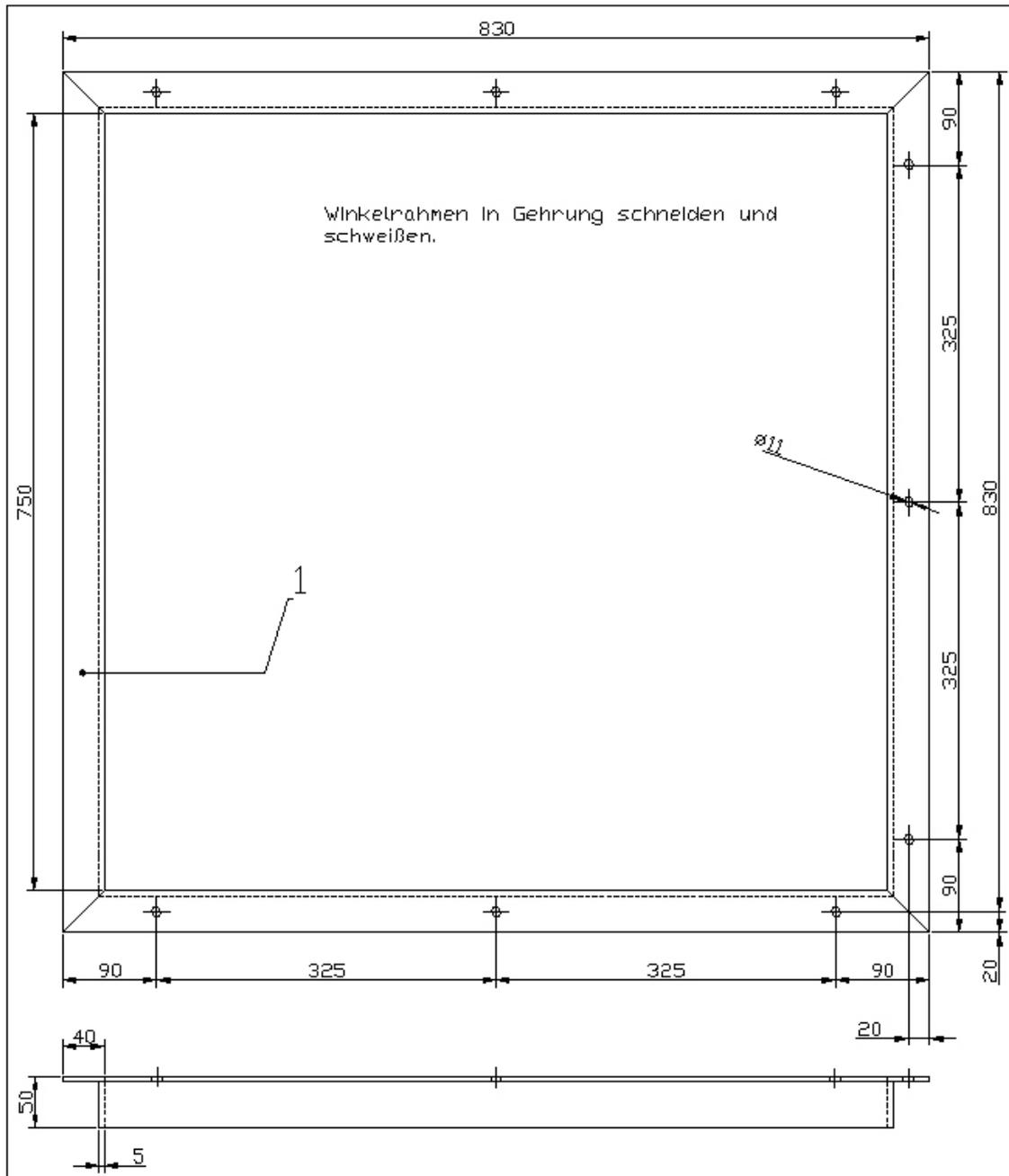
DIN 7168-fein

		Maßstab 1:1	
		Klappe 1m ³ Behälter	
	Datum	Name	Drehgeberhalter
Bearb	20.03.2009	Chuph P.	
Gepr			
Norm			
FSA		Projekt F-05-0901	
		Blatt 9	
		Blätter 10	



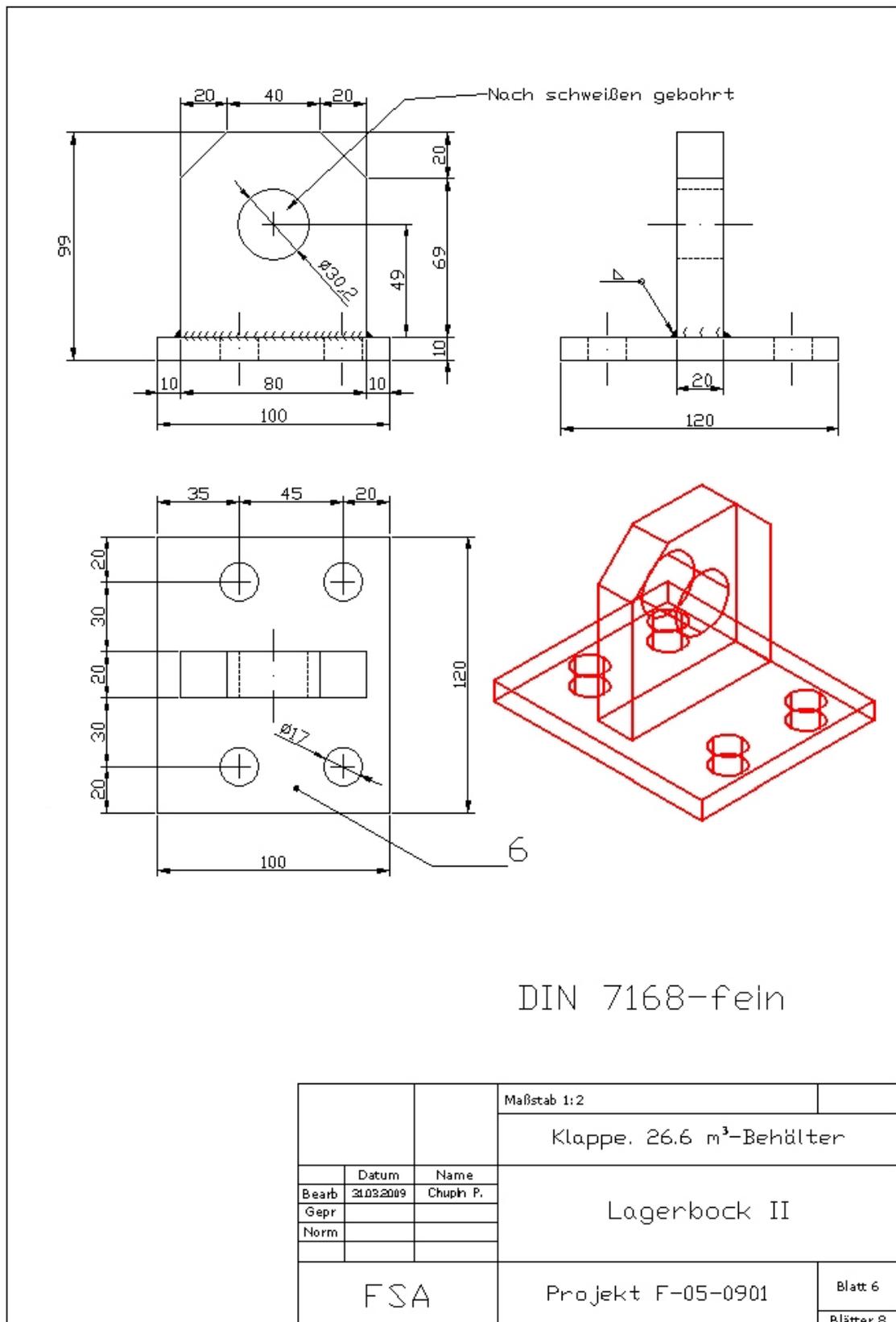
1x anfertigen in grundlatter Ausführung

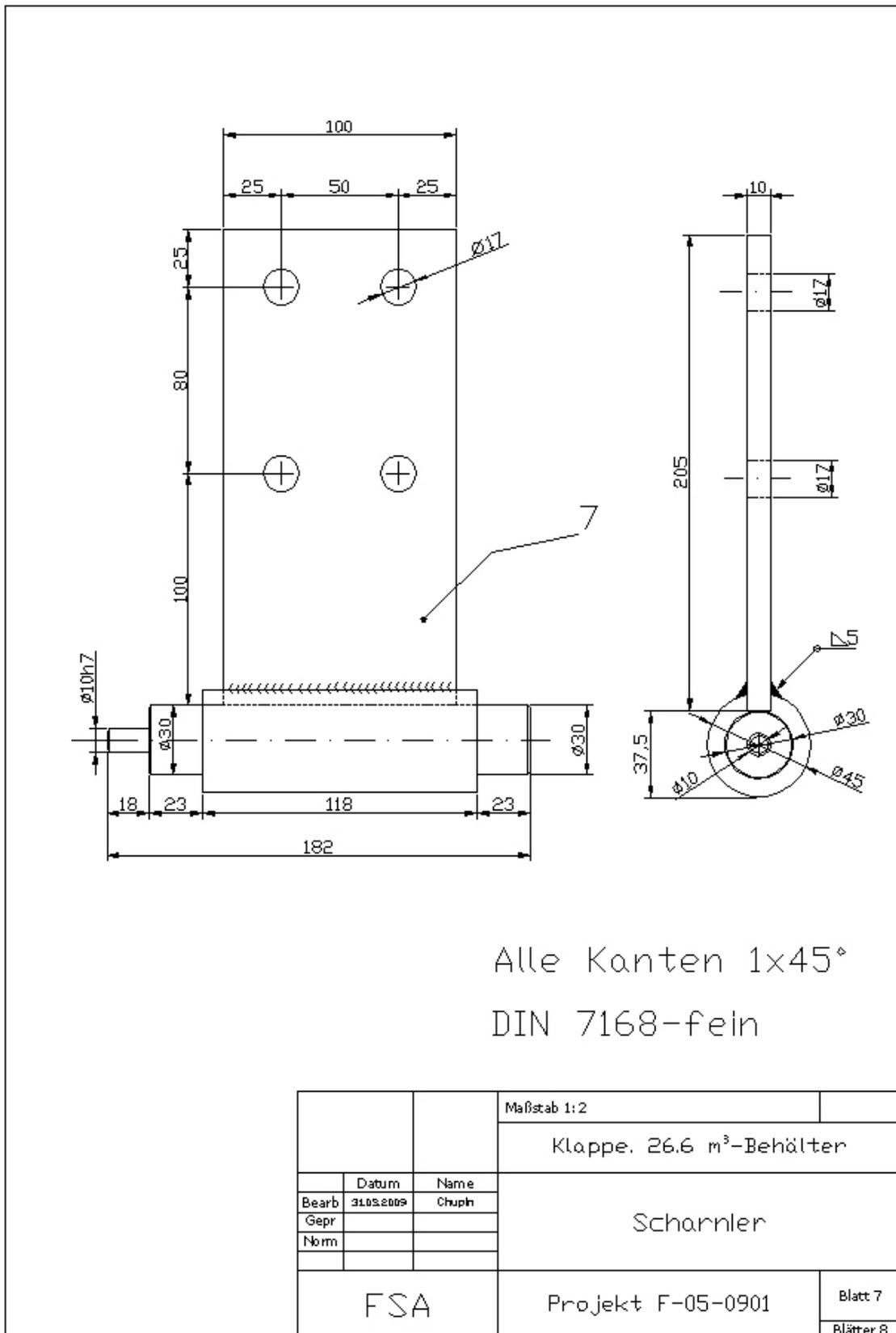
13	1	Montageflansch, vorhanden	St 37
12	40	Skt.-Schraube - DIN 933 - M10x30 mit Unterlegsscheibe u. Mutter	St, verzinkt
11	9	Kunststoffschrauben - DIN 933 - M10x30 mit Mutter, vorhanden	PA
10	4	Skt.-Schraube - DIN 933 - M6x12 mit Unterlegsscheibe u. Mutter	St, verzinkt
9	24	Skt.-Schraube - DIN 933 - M16x30 mit Unterlegsscheibe u. Mutter	St, verzinkt
8	1	Dichtung 1mm, vorhanden	Kunststoff
7	2	Scharnier	St 37
6	3	Lagerbock II	St 37
5	1	Lagerbock I	St 37
4	1	Klappe 1mm	St 37
3	1	Klappe 8mm	St 37
2	1	Grundplatte	St 37
1	1	Winkelrahmen	St 37
Lfd.Nr	Menge	Benennung	Werkstoff
Gez.	Chupin		
Gepr.			
Maßstab		Klappe, 26.6 m ³ -Behälter	Blatt 1
			Blätter 8

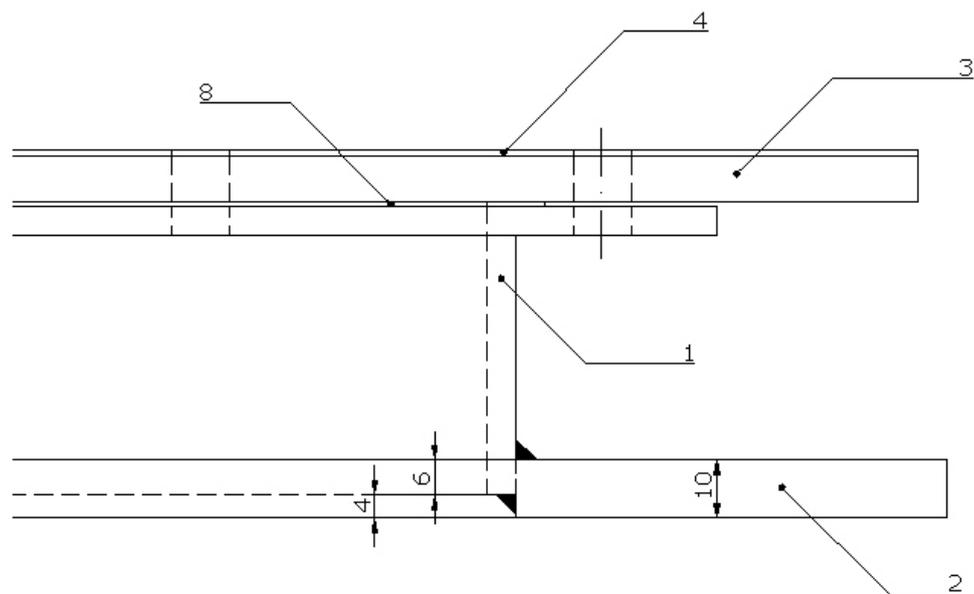


L-Profil 50x40x5

		Maßstab 1:5	
		Klappe. 26.6 m ³ -Behälter	
	Datum	Name	
Be arb	30.03.2009	Chuph P	
Gepr			
Norm			
FSA		Winkelrahmen	
		Projekt F-05-0901	Blatt 2
			Blätter 8







Winkelprofil
durchgehend
anschweißen

		Maßstab 1:1		
		Klappe, 26.6 m ³ -Behälter		
	Datum	Name		
Bearb	31.03.2009	Chupin P.		
Gepr				
Norm				
		Winkelrahmen		
FSA		Projekt F-05-0901		Blatt 8
				Blätter 8